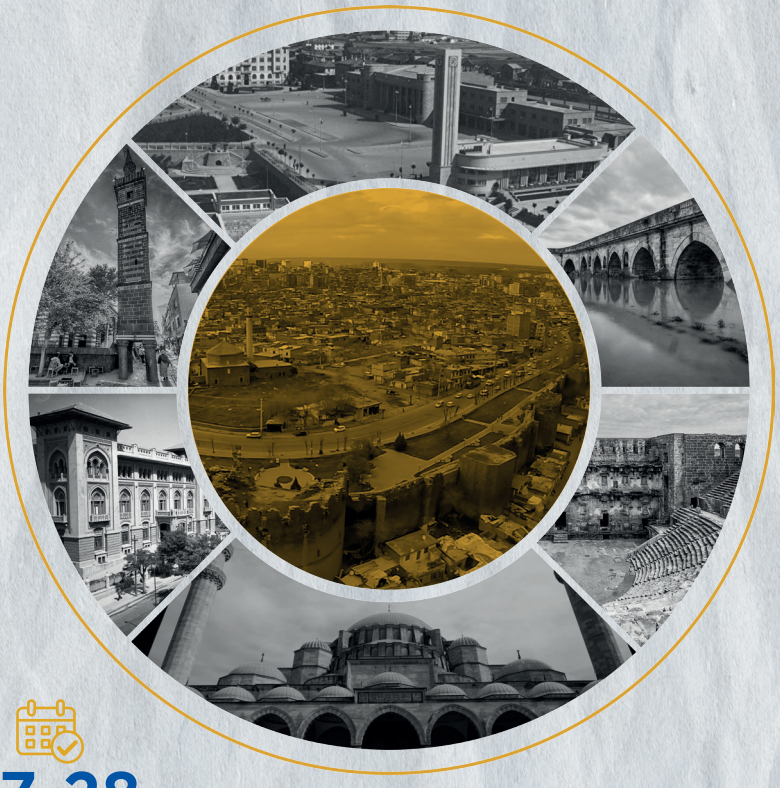
TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI
UCTEA THE TURKISH CHAMBER OF CIVIL ENGINEERS
ODEYA ENDEZYARÊN AVAHIYÊ

ULUSLARARASI

7TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRENGTHENING HISTORICAL BUILDINGS AND TRANSFERRING THEM SAFELY TO THE FUTURE

7. TARİHİ YAPILARIN GÜÇLENDİRİLMESİ ve GELECEĞE GÜVENLE DEVRİ SEMPOZYUMU BİLDİRİLER KİTABI

7. SEMPOZYÛMA NAVNETEWEYÎ LI DERBARÊ QEWÎKIRIN Û PARASTINA AVAHIYÊN DÎROKÎ



27-28
EYLÜL / SEPTEMBER / Ê ÎLONÊ 2024
DİYARBAKIR / AMED

tarihiyapilar.org | tarihiyapilar@imo.org.tr

| ERHAN KARAESMEN ANISINA
| IN MEMORY OF ERHAN KARAESMEN
| JI BO BÎRANÎNA ERHAN KARAESMEN



ULUSLARARASI

7th Symposium on Strengthening Historical Buildings and Transferring them with Confidence to the Future with International Participation

7. TARİHİ YAPILARIN

GÜÇLENDİRİLMESİ ve GELECEĞE GÜVENLE DEVRİ SEMPOZYUMU

7. SEMPOZYÛMA NAVNETEWEYÎ LI DERBARÊ QEWÎKIRIN Û PARASTINA AVAHÎYÊN DÎROKÎ

27-28 EYLÜL 2024
27-28 SEPTEMBER 2024

DİYARBAKIR
SEZAİ KARAKOÇ KÜLTÜR MERKEZİ

27-28 EYLÜL 2024
7. ULUSLARARASI TARİHİ YAPILARIN GÜÇLENDİRİLMESİ VE GELECEĞE GÜVENLE DEVRİ SEMPOZYUMU BİLDİRİLER KİTABI

7. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRENGTHENING HISTORICAL BUILDINGS AND TRANSFERRING THEM SAFELY TO THE FUTURE

DİYARBAKIR
SEZAİ KARAKOÇ KÜLTÜR MERKEZİ

Editor: Prof. Dr. İdris BEDİRHANOĞLU
Kapak Tasarım: Ayşe ÖZEN
Dizgi: Ayşe ÖZEN

ISBN: 978-605-01-1781-3

TMMOB
İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi
Necatibey Caddesi No: 57 - Kat: 3-4 Kızılay Ankara
Tel: +90 312 294 30 66 Web: ankara.imo.org.tr
E-mail: imoankara@imo.org.tr

TMMOB
İnşaat Mühendisleri Odası Diyarbakır Şubesi
Ali Emiri 5. Sokak Yılmaz 2000 Apt. No: 5
Yenişehir / Diyarbakır
Tel: 312 294 30 66 - Faks: +90 412 2239643
Web: diyarbakir.imo.org.tr - E-mail: imodiyarbakir@imo.org.tr

İMO Oda Yayın No: E/26/01

İnşaat Mühendisleri Odası adına Ankara ve Diyarbakır Şubeleri tarafından düzenlenen 7. Uluslararası Tarihi Yapıların Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devri Sempozyumu'nun ücretsiz kitabıdır.

Ekim 2026

ULUSLARARASI 7th Symposium on Strengthening Historical Buildings and Transferring them with Confidence to the Future with International Participation

7. TARİHİ YAPILARIN GÜÇLENDİRİLMESİ ve GELECEĞE GÜVENLE DEVRİ SEMPOZYUMU

7. SEMPOZYÛMA NAVNETEWEYÎ LI DERBARÊ QEWÎKIRIN Û PARASTINA AVAHÎYÊN DÎROKÎ

SPONSORLAR

Layher
Daha Fazla Olanak. İskele Sistemi.

AKMER-SAN
mermer
www.akmersan.com

DİBAZ
DİBAZ A.Ş.
www.dibaz.com.tr

DİYARBAKIR
BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
1973

SUR BELEDİYESİ

T.C.
VAKIFLAR
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

DİYARBAKIR TİCARET VE SANAYİ ODASI
1883

1931
DİYARBAKIR
TİCARET BORSASI

DİYARBAKIR
O.S.B.

DAD YAPI

gökalp
proje müşavirlik a.ş.

İÇİNDEKİLER

Açılış Konuşmaları 15

Bildiriler 25

A SALONU - 1A OTURUMU 26

Damage and Interventıons To Historıcal Masonry Buildings: Good And ILL Practices 27
Invited Speaker Elizabeth Vintzileou

Pantokrator Sarnıcı Restorasyon Süreci
Özlem Balık 47

Retrofitting in Traditional German Masonry Houses
Fevzi Saritas, Idris Bedirhanoglu 66

Tarihi Boğaz, Yıldız ve Kösepaşa Köprülerinin Restorasyon Uygulama Çalışmaları
Özge Öztürk Tokel, Ayşe Avşin, Sine Yeşilkaya 83

Tarihi Yukarı (Koca) Köprüsü'nün Restorasyon Uygulaması
Mergül Akgün, Emrah Altınok, Dr. Ayşe Avşin 107

B SALONU - 1B OTURUMU 126

Varda (Alman Köprüsü) Köprüsü'nün Restorasyonunun İncelenmesi
Raziye Peker, İnci Şentuna Şensarı 127

Kendirli Kilisesi Restorasyonu: Bir Tarih Mi Ortaya Çıkarıldı, Bir Tarih Mi Yok Edildi?
Necat Özgür 142

Hekimoğlu Ali Paşa Türbesi'nin Mevcut Durum Tahkiki ve Taşıyıcı Kemere Takviye Önerisi
Erdinç Önen 153

Merzifon Tarihi Kızlar Mektebi Restorasyon ve Deprem Güçlendirme Çalışmaları
Ali Sarıalioğlu, Mahitap Sel 179

A SALONU - 2A OTURUMU 215

Geleneksel Sivil Mimari Yapılarının Deprem Sonrası Keşif Verisinin Toplanması için Bir Yaklaşım: Antakya'nın Hımış Evleri Üzerinden 2023 Türkiye Deprem Sekansı Deneyimi
Kökcan Dönmez, Yasemin Didem Aktaş, Barış Erdil, Filiz Diri Akyıldız, Felat Dursun 216

Lazer Doppler Vibrometrisi Kullanılarak Tarihi Duvar Yapılarının Deprem Sonrası Titreşim Frekanslarının Hızlı Tahmini
Baran Bozyiğit, Sinan Açıkgöz 241

Kahramanmaraş ve Hatay Merkezli Depremlerden Etkilenen Tarihi Köprüler 255
Ayşe Avşin

Nirxandina Endazyarî Ya Avahiyên Erdhêja 2023 Tırkîye-Surî De Hilweşayîr
İdris Bedirhanoğlu 278

Seismic Evaluation of Historical Stone Masonry Mosques in Southeast Turkey
Arova Konak, İdris Bedirhanoğlu, Sinan Açıkgöz 295

Exploring The Collapse Mechanism of Unreinforced Masonry Buildings Vıa Discontinuum-Based Analysis
Andrei Farcasiu, Peter Griesbach, Rhea Wilson,
Sinan Açıkgöz, Bora Pulatsu 311

B SALONU - 2B OTURUMU 339

Anıtsal Yapılarda Zemin Çağdaş Güçlendirme Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Analizi: Uygulanmış Koruma Çalışmaları Üzerinden Bir Değerlendirme
Şule Ergün, Nursen Işık 340

Tarihi Ahşap Çatı Birleşim Davranışının Deneysel İncelenmesi
Büşra Nur Gürgün, Nihan Doğramacı Aksoylar,
Mehmet Selim Ökten 355

Tarihi Yapılarda Tespit Edilen Sorunların Yapı Malzemeleri Üzerinden İyileştirilmesi
Ebru Kılıç Bakırhan 370

Kılıçlama Yöntemi ile Duvar ve Döşeme Bağlantılarının Depreme Karşı Davranışa Etkisi
Cevdet Şentürk, Rabia Aydın 382

19. Yüzyıl Anadolu Rum Ortodoks Kiliseleri: Krom Vadisi Örneği
Merve Ertürk, Neslihan Kulözü 402

A SALONU - 3A OTURUMU 430

A Short Story of On-Going Restoration Project of Lefkoşa Ayasofya (Selimiye) Mosque (Nicosia Hagia Sophia Church) Focusing on Structural and Eearthquake Engineering Aspects
Invited Speaker Alper İlki, Ömer F. Halıcı, Pınar İnci, Cem Demir,
Esin Yaren, Mustafa Uzun, Soner Uğurlu 431

Düzlem İçi Yüklü Yığma Duvarların Lif Takviyeli Polimer ile Optimum Güçlendirilmesi
İsmail Hakkı Tarhan 455

Donatılı Harçlar ile Güçlendirmede Farklı Bileşen Etkilerinin Araştırılması
Mustafa Esat Güneş, Zehra Canan Girgin 470

Bergama Bedesteni'nin Strüktürel Analizi ve Deprem Performansı
Hatice Ayşegül Demir, Mine Hamamcıoğluturan, KutayYücetürk, Engin Aktaş 489

B SALONU - 3B OTURUMU 519

Tekstil Donatılı Harç Şeritlerle Güçlendirilen Tuğla Duvarlarda Arayüzey Kayma Gerilmesi – Sıyrılma Deplasmanı Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi
Alper Çelik, Ömer Mercimek, Özgür Anıl, Sercan Tuna Akkaya 520

Kapadokya Atık Volkanik Tüfü ile Üretilmiş Enjeksiyon Malzemesinin Yerinde Uygulaması
Burcu Dinç Şengönül, Muhammed Bayram, Şerife Özata, Didem Oktay, Nabi Yüzer 533

Nanofiber Selüloz Katkılı Kireç Esaslı Enjeksiyon Malzemelerinin Tasarımı ve İncelenmesi
Ali Sayar, Didem Oktay 547

A SALONU - 4A OTURUMU 565

Tarihi Gümüşhane Kamberli Köprüsü'nün Sismik Davranışının İncelenmesi
Oğuzhan Uğurlu, Atakan Yıldırım, Ahmet Muhammet Mecit Işık, Oğuzhan Çelebi, Mahmut Kılıç, Abdulkadir Cüneyt Aydın 566

Procedures For Seismic Analysis of Historic Masonry Buildings
Cesar Alfonso Alanoca Chambi, Rashid Mangushev, Lidia Kondratieva 586

Structural Analysis, Conservation and Retrofitting Propasals for the Tekirdağ Rustem Pasha Mosque
Selin Koca, Ahmet Bal 612

Kohezif Ara Yüzey Elemanlar ile Modellenen Dairesel Yığma Kemerlerinin Kırılma Mekanizmalarının Belirlenmesi
Sedat Kömürcü 626

B SALONU - 4B OTURUMU 644

Diyarbakır'daki Dört Ayaklı Minare'nin Mw7.7 Kahramanmaraş Depremi Sonrası Performans Değerlendirmesi
H. Polat Gülkan, İlker Kazaz, Emriye Kazaz 645

Strenghtening and Retrofitting of Historical Masonry Arch Bridge Under Blast Load
Amin Bagherzadeh Azar, Ali Sarı 663

Seismic Retrofitting Deficient Historical Vocational Educational Complex
Orhan Yapıcı, Şahin Güneş, İdris Bedirhanoğlu 687

Tarihi Yapılarda Deprem Sonrası Yangınla Mücadele
Bilgehan Bakırhan 708

A SALONU - 5A OTURUMU 721

Çimento Esaslı Harçların Tarihi Yapılar Üzerine Etkisi
Mustafa Başboğa, Mirza Taşçı, Murat Doğruyol, Osman Hulusi Ören 722

Simulating the In-Plane Failure Mechanism of Unreinforced Masonry Walls With Timber-Based Retrofit
Emma Babula, Danielle Malomo, Daniel Chung, Philip Tidwell, Bora Pulatsu 740

Doğal Zeolit ve Polipropilen Lif Katkılı Kireç Harçlarının Fiziko-Mekanik Özellikleri
Muhammet Ahmet Mecit Işık, Gamze Üçdemir, Oğuzhan Uğurlu, Gökhan Kaplan, Abdulkadir Cüneyt Aydın 756

Kan ununun Kireç Esaslı Harçlarda Katkı Malzemesi Olarak Kullanılması
Emine Özdoğru, Kemal Erdil, Nabi Yüzer, Oruç Kaan Türk 775

Comparison of Stone Compressive Strenghts Obtained From Non-Destructive In-Situ Measurement Techniques With Destructive Laboratory Tests
Yunus Arca, Kerem Kurnaz, Medine İspir, Sinan Açıkgöz, Anıl Özdemir 787

B SALONU - 5B OTURUMU 802

Denetimli Makine Öğrenimi Yöntemleriyle Tarihi Yığma Minarelerde Hasar Tespiti 803
Cemile Duman, Kemal Hacıefendioğlu, Tekin Gültop

Mardin'in Eryeri Mahallesi'nde Bulunan Geleneksel Evlerin Yapısal Koruma Sorunları
Yasemin Ercan Gündüz, Mine Turan, Engin Aktaş 827

Diyarbakır On Gözlü Köprü'nün Değişen Çevresi ve Dijital Modelleme Yaklaşımı
İzzettin Kutlu, Deryanur Şimşek 851

Van Ernis Köy Enstitüsü Taş Yığma Hamam Yapısının Deprem Performansının Belirlenmesi
Yaşar Subaşı Direk, Fırat Kuas, Elif Su Direk 870

Tarihi Yapılarda Su Odaklı Tasarım: Konya İnce Minareli Medrese Donanım Kuruluşu Üzerinden Bir Bakış
Kolbay, SD. 887

BİLİM KURULU

A. Halim Karaşin	Dicle Üniversitesi
Akbar Javadi	University of Exeter
Ali İhsan Ünay	Gazi Üniversitesi
Ali Koçak	Yıldız Teknik Üniversitesi
Alper İlki	İstanbul Teknik Üniversitesi
Anıl Özdemir	Gazi Üniversitesi
Ayhan İrfanoğlu	Purdue University
Bahman Ghiassi	University of Birmingham
Baran Bozyiğit	Dokuz Eylül Üniversitesi
Bengin Masih	Awdel Soran University
Bora Pulatsu	Carleton University
Brian Sheil	Cambridge University
Cem Demir	İstanbul Teknik Üniversitesi
Cem Yalçın	Boğaziçi Üniversitesi
Dilek Okuyucu	Erzurum Teknik Üniversitesi
Dina D'Ayala	University College London
Eleni Smyrou Hanze	University of Applied Sciences Groningen
Elizabeth Vintzileou	National Technical University of Athens
Emine Dağtekin	Dicle Üniversitesi
Erhan Karaesmen	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Felat Dursun	Dicle Üniversitesi
Fevzi Sarıtaş	İstanbul Teknik Üniversitesi
Gianmarco de Felice	Roma Tre University
Görün Arun	Yıldız Teknik Üniversitesi
Gülay Yalçın Bayar	Dicle Üniversitesi
Güney Özcebe	TED Üniversitesi
Halil Görgün	Dicle Üniversitesi
Haluk Sucuoğlu	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Hulusi Özkul	İstanbul Teknik Üniversitesi
Humberto Varum	University of Porto
İ. Özgür Yaman	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
İdris Bedirhanoğlu	Dicle Üniversitesi (Oxford Üniversitesi)
İhsan Engin Bal Hanze	University of Applied Sciences Groningen
İlker Kazaz	Erzurum Teknik Üniversitesi
İrem Bozyiğit	Ege Üniversitesi

Kutay Özaydın	Yıldız Teknik Üniversitesi
Medine İspir Arslan	İstanbul Teknik Üniversitesi
Mehmet Ali Taşdemir	İstanbul Teknik Üniversitesi
Mehmet Emin Öncü	Dicle Üniversitesi
Mehmet Salih Keskin	Dicle Üniversitesi
Meral Halifeoğlu	Dicle Üniversitesi
Mesut Gör	Fırat Üniversitesi
Murat Altuğ Elberik	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Murat Doğruyol	Siirt Üniversitesi
Mustafa Laman	Çukurova Üniversitesi
Mustafa Tokyay	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Neslihan Dalkılıç	Dicle Üniversitesi
Orhan Yapıcı	Heriot-Watt University
Paulo B. Lourenco	University of Minho
S. Özgür Değertekin	Dicle Üniversitesi
Samir Dirar	University of Birmingham
Sedat Hayalioğlu	Dicle Üniversitesi
Senem Yılmaz	Dicle Üniversitesi
Serdar Soyöz	Boğaziçi Üniversitesi
Sergio Lagomarsino	University of Genoa
Sinan Açıkgöz	University of Oxford
Süleyman İpek	Bingöl Üniversitesi
Şahin Güneş	University of Birmingham
Şefik İmamoğlu	DilBa Mühendislik Müşavirlik
Taha Taşkıran	Yıldırım Beyazıt Üniversitesi
Twana Kamal Haji	RSK Group
Vasilis Sarhosis	University of Leeds
Yasemin Didem Aktaş	University College London
Z. Fuat Toprak	Dicle Üniversitesi
Zekai Celep	Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi

DÜZENLEME KURULU

Prof. Dr. İdris Bedirhanoğlu (Başkan)	Dicle Üniversitesi (Oxford Üniversitesi)
Prof. Dr. A. Halim Karaşin	Dicle Üniversitesi
Dr. Erhan Karaesmen	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. M. Salih Keskin	Dicle Üniversitesi
Prof. Dr. Mustafa Tokyay	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Bülent Tatlı	İMO YK Sekreter Üyesi
Tansel Önal	İMO YK Üyesi
Ahmet Onur Özergene	İMO Ankara Şubesi YK Başkanı
Mahsum Çiya Korkmaz	İMO Diyarbakır Şubesi YK Başkanı
Berivan Yaşar	İMO Diyarbakır Şubesi YK Sekreter Üyesi
Bedri Akarsu	İMO Diyarbakır Şubesi YK Sayman Üyesi
Mahir Kaygusuz	İMO Ankara Şubesi Sekreteri
Mehdi Mazlum Orak	İMO Diyarbakır Şubesi YK Üyesi
Ebru Aydın Tekyıldız	İMO Diyarbakır Şubesi YK Üyesi
Mizgin Bektaş	İMO Ankara Şubesi Sekreter Yardımcısı
Buket Çelik	İMO Ankara Şubesi Proje Yöneticisi
Arova Konak	Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

DANIŞMA KURULU

Nusret Suna	İMO YK Başkanı
Bülent Tatlı	İMO YK Sekreter Üyesi
Tansel Önal	İMO YK Üyesi
Serap Dedeoğlu	İMO Genel Sekreteri
Yunus Efe	Karacadağ Kalkınma Ajansı
Zülfikar Halifeoğlu	Özel Sektör

SEKRETERYA

Zeki Şimşek	İMO Diyarbakır Şubesi Sekreteri
Zinnar Aktaş	İMO Diyarbakır Şubesi YK Üyesi
Mizgin Bektaş	İMO Ankara Şubesi Sekreter Yardımcısı
Buket Çelik	İMO Ankara Şubesi Proje Yöneticisi

AÇILIŞ KONUŞMALARI

Ülkemizde mülkiyeti kamu kurumlarına ait olan resmi nitelikli yapıların ve anıtların korunması yolunda ilgili devlet kurumlarının görevlendirildiği bilinegelir. Bunun yanı sıra özel mülkiyetli yapıların korunması yolunda kişiler, aileler, şirketler vb. özel kurumlar tarafından gösterilen gayretler de yoğunlaşmaktadır. Korumacılığın, yapının dayanım gücünü arttırarak ömrünü uzatması ancak bununla ilgili işlemleri yapılırken tarihi karakterinin bozulmaması ya da çok kısmi olarak değiştirilmesi gibi unsurlarla birlikte karmaşık bir mekanizma olduğu hatırlanmalıdır. Ülkemizdeki yoğunlaşmada, projelendirme ile yapım onarımı ve güçlendirme işlemlerine başlanmadan önce gerçekleştirilmesi gerekli olan "yapı ile ilgili mevcut durumun saptanması, değerlendirilmesi, teknik ve tarihi özellikleriyle tanımlanması" aşamasının zayıf kaldığı bilinmektedir. Korumacılık felsefesinde ve teknolojisinde ileri gitmiş ülkelerde bu aşamaya yaşamsal önem atfedilir. Sonraki teknik işlemlere girişilmeden önce ayları, hatta bazı önemli yapılar için yılları dolduracak sürelerde ayrıntılı çalışmalar yapılır. Bu sempozyumun ülkemizdeki uygulamalarda çok eksik kaldığı bilinen önemli çalışma aşamasının teknik dünyamız tarafından çok daha net algılanmasına yardımcı olabileceği umulmaktadır.

Bu sözü edilen nazik ve duyarlı konu dahil olmak kaydıyla tarihi eserlerin onarım ve güçlendirilmesi konularında kendince gayretler göstermiş ve katkılarda bulunmuş bir deneyimli uzman olarak bana bu sempozyumun açılış konuşmalarından birini yapma onurunun ve zevkinin bahşedilmiş olmasından büyük memnuniyet duydum. İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi'ne ve toplantının düzenleyici yetkililerine teşekkürlerimi sunuyorum.

27 Eylül 2007
1. Tarihi Yapılar Sempozyumu
Erhan KARAESMEN

17 yıl önce bugün birincisi yapılan Tarihi Eserler Sempozyumu'nun açılış konuşmasını Erhan Hocamız yapmıştı. Hiçbir değişiklik yapmadan sizinle paylaşmak istedim. Diyarbakır Şube'ye de ben teşekkür ediyorum. Sempozyumun hazırlanmasında emeği geçen tüm hocalarımıza, Ankara ve Diyarbakır şube çalışan ve yöneticilerine, destek olan kurumlara kuruluşlara teşekkür ediyor, güzel bir sempozyum geçmesini temenni ediyorum.

Ahmet Onur Özergene
İMO Ankara Şubesi
Yönetim Kurulu Başkanı

Kıymetli hocalarım, sivil toplum kurumlarının değerli temsilcileri, saygıdeğer meslektaşlarım, sevgili konuklar;

Öncelikle hepinize hoşgeldiniz, sefalar getirdiniz demek istiyorum. Bugün yurtdışından ve yurtiçinden misafirlerimizle Amed'te, Diyarbakır'da; medeniyetlerin doğduğu kadim bir kentte buluştuk. Yaklaşık 12.000 yıllık bir geçmişe sahip bu kentte 'insanlığın ortak mirası' kabul görülen tarihi yapıları nasıl koruyacağımızı ve geleceğe güvenle nasıl devredeceğimizi konuşacağız. Dünyanın birçok farklı noktasından sempozyumumuza sunulan bildiriler okunacak ve umulur ki birbirimizden çok şey öğreneceğiz.

Sevgili konuklarımız,

İnşaat Mühendisleri Odası Diyarbakır ve Ankara Şubeleri olarak böyle bir organizasyonu gerçekleştirmekten büyük bir mutluluk duyuyoruz. Bu organizasyonun Diyarbakır'da gerçekleşiyor oluşu bizim için ayrı bir gurur kaynağıdır. Biraz önce bahsettiğim gibi; kentimiz kadim bir tarihe sahiptir. Birçok medeniyete ev sahipliği yapmıştır. Yaklaşık 8000 yıllık geçmişe sahip, yaklaşık 8000 yıldır aralıksız tarım yapılan Hevsel Bahçeleri bu gerçeği gözler önüne sermektedir. Milattan Önce 3000 yıllarında yapılan Diyarbakır Surları, Çin Seddi'nden sonra dünyanın en uzun, en geniş ve en sağlam ikinci surudur.

İşte sempozyumumuzun açılış konuşmalarını Ortadoğu'nun en büyük Ermeni kilisesi Surp Giragos'ta yapıyoruz. Hemen yakınımızda bulunan Ulu Camii Anadolu'nun ilk camisidir. Bir zamanlar Süryani Patrikhanesi olan Meryem Ana Kilisesi çok uzağımızda değil. Dinlerin, dillerin, kültürlerin önemli izler bıraktığı bir şehirdir Diyarbakır. 2015 yılında da Diyarbakır Kalesi ve Hevsel Bahçeleri Kültürel Peyzaj Alanı UNESCO Dünya Miras Listesi'ne kaydedilmiştir. Bu kadim geçmişe, bu kültürel birikime sahip çıkmak önce biz Diyarbakırlıların, sonra da tüm insanlığın boynunun borcudur.

Fakat ne yazık ki 2016 senesinde Sur'da yaşanan çatışmalı iklim, bu kadim kente geri dönüşü olmayacak zararlar verdi. 2013 yılında restore edilmiş bu kilise, o süreçte aldığı tahribat nedeniyle yeniden restorasyon görmek durumunda kılmıştır örneğin. Dört Ayaklı Minare'nin önünden geçip geldik hepimiz. O minarenin ayaklarında hâlâ kurşun izleri bulunmaktadır. Buradan Diyarbakır Barosu eski başkanımız Tahir Elçi'yi de rahmetle anmak istiyorum. Dört ayaklı Minare önünde yaptığı açıklamada Sur gibi kadim bir kentte çatışmaların yaşanmaması gerektiğini ifade etmişti. Bizler de bu sürecin her aşamasında itirazlarda bulunduk, her aşamada uyarılarımızı dile getirdik. Lâkin birçok tescilli yapının yıkıldığına şahit olduk. Sur'un dokusuna uymayan bir mimariyle yeni-

den yapılaşmaya gidildiğini gördük. Bugün gelinen noktada Sur'un bir kısmı Sur olmaktan fersah fersah uzaklaşmıştır.

Yaşadığımız bu vahim durumu aklımızın bir köşesinde her daim diri tutmamız gerekmektedir. Böylelikle yıkmadan, insanları göç etmeye mecbur bırakmadan, bu kadim kente hassasiyetle yaklaşarak yerinde dönüşümün yol ve yöntemlerini bulmak mecburiyetindeyiz. Hem evrensel insan haklarının dayattığı bir duruşa sahip olma zorunluluğu, hem de Dünya Kültür Mirası Listesi'ne girmiş bu kenti koruma mücadelesi hepimizin sorumluluğudur.

Yaşadığımız bir diğer vahim hadise ise 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş merkezli gerçekleşen depremlerdir. 50 binden fazla insanımızın hayatını kaybettiği, yüzbinlerce vatandaşımızın evsiz kaldığı bir sürecin manevi ağırlığını yaşadık hepimiz. Fakat toplum olarak şöyle bir gerçekliğe ulaştığımızı temenni ediyorum: deprem bir doğa olayıdır ve dünyanın her yerinde meydana gelebilir. Depremden kaynaklanan afet ise yalnızca bilimden ve teknikten uzaklaşmış toplumlarda meydana gelebilir.

Diyarbakır'da yıkılan bina sayısı görece az olsa da ağır hasar ve orta hasar aldığı tespit edilen binlerce yapı on binlerce insanın mağduriyetine neden oldu. Görüldü ki bilim ve teknik yüzü görmemiş yapılar, hiçbir merci tarafından denetlenmemiş yapılar, 'imar barışıyla' ruhsat almış kaçak yapılar bizlere depremi bir doğa olayı gibi değil; bir afet gibi yaşatmıştır.

Depremden ötürü evi hasar almış insanlarımız için -bütün uyarılarımıza rağmen- Dicle Nehri kenarında bir çadır kent kurulmuştu. Bu çadır kentte sel meydana geldi ve ikinci kez bir doğa olayının bir afet haline geldiğine şahit olduk. Umarım bilimsel yöntemlere kulak tıkamanın bizleri her daim olumsuz sonuçlara sevk ettiği bir gün anlaşılır ve bu olumsuzlukları yaşamamak için bir an önce bilimin önerdiği yol ve yöntemlere başvurulur.

Mahsum Çiya Korkmaz
İMO Diyarbakır Şubesi
Yönetim Kurulu Başkanı

Değerli Katılımcılar,
Değerli Konuklar,
Değerli Meslektaşlarım,

Ankara ve Diyarbakır Şubelerimizin yürütücülüğünde gerçekleştirdiğimiz Sempozyumumuza hoş geldiniz diyor, hepinizi İnşaat Mühendisleri Odası Yönetim Kurulu adına saygıyla selamlıyorum.

İlkini 2007 yılında düzenlediğimiz Sempozyumumuzun 7.'sini, mesleğimizin duayen ismi, hocaların hocası Erhan Karaesmen anısına gerçekleştiriyoruz. Odamızın birçok bilimsel etkinliğinde görev alan, çeşitli kongre ve sempozyumlarda düzenleme kurullarında yer alan, hazırlanan raporlara, görüş ve önerilere önemli katkılar sunan değerli hocamızı bu önemli etkinlik vasıtasıyla bir kez daha saygıyla anıyoruz.

Kuşkusuz ki, 7. Uluslararası Tarihi Yapıların Korunması ve Geleceğe Güvenle Devri Sempozyumu da bundan öncekiler gibi başarılı geçecek, bu alanda yapılacak pek çok kıymetli bilimsel çalışmaya önayak olacaktır.

Etkinliğimizin açılışının, Diyarbakır şehrinin en güzel yapılarından olan Surp Giragos Kilisesi'nde yapılmasını da anlamlı bulduğumu ifade etmek isterim. Sempozyumun açılış törenini yaptığımız bu yapı, tarihi yapıların modern mühendislik yöntemleriyle nasıl güçlendirilebileceğine dair önemli bir örnektir. Önemli bir kültür mirasının korunması, Diyarbakır'ın tarihsel yapısının devam ettirilmesi ve modern restorasyon tekniklerinin uygulanması açısından büyük önem taşımaktadır. Yapım tarihi tam olarak belirlenemese de en az 500 yıllık geçmişi olduğu bilinen bu yapının geleceğe güvenli bir şekilde devredilmesinin, kentin tarihinin, kültürünün ve kimliğinin korunması açısından özel bir önemi olduğuna hiç şüphe yoktur.

Değerli Konuklar,
Değerli Meslektaşlarım,

Bizler, inşaat mühendisliği meslek alanının medeniyet mühendisliği olarak tanımlarız. Kuşkusuz inşaat mühendislerini de tarih yapıcıları olarak tanımlamamız boşuna değildir. Kadim çağlarda yaşamış toplumların kültürel, ekonomik ve siyasi yapılarını incelemek için başvurulan en önemli ve somut eserler günümüze ulaşan mühendislik yapılarıdır. Denilebilir ki yüzlerce, hatta binlerce yıl öncesinde inşa edilen mühendislik yapıları o toplumların varlıklarını günümüze ulaştıran eserlerdir.

Bugün inşaat mühendislerinin üzerine düşen en önemli sorumluluklardan biri de işte böylesi önemli eserleri gelecek kuşaklara devredilmesini sağlayacak

mühendislik çözümlerinin bulunması ve uygulanmasıdır. Bizler tarihi yapıların orijinal karakterini korurken, modern mühendislik teknikleri ile yapıların dayanıklılığını ve güvenliğini artırmayı hedefleriz.

İnşaat mühendisleri tarafından bu yapıların yapısal analizi yapılarak mevcut durumları değerlendirilir ve bu analizler sayesinde olası zayıflıklar belirlenerek uygun müdahale yöntemleri geliştirilir. Tarihi binaların depremler gibi doğal afetlere karşı dayanıklılığının artırılması, özellikle deprem kuşağında bulunan Türkiye gibi bir ülkede çok önemli bir yerde durmaktadır. Güçlendirme işlemleri sırasında, yapının tarihi ve mimari özelliklerinin korunması da ayrıca büyük bir özenle yapılmalıdır.

Ne yazık ki tarihi eserler sadece doğal afetler nedeniyle değil, restorasyon çalışmalarındaki özensizlik, bilinçsiz kullanım, koruma çalışmaları için yeterli kaynak ayrılmaması gibi pek çok farklı nedenle zarar görmekte ve giderek yok olmaktadır.

Son yıllarda basına yansıyan bazı restorasyon çalışmalarının, yapının özgün görünümüne etki etmesi dolayısıyla haklı bir biçimde eleştiri konusu yapıldığı görülmektedir. Zira tarihi yapılara uygulanacak restorasyon çalışmalarında yapısal müdahalelerin görünmezliği esastır. Yapıdaki müdahalelerin, yapının estetiğini bozmayacak şekilde tasarlanması sağlanmalı, estetik ve teknik detaylar arasında bir denge kurulmalıdır. Tarihi eserlerin onarımı sırasında yapılan mühendislik müdahalelerinin, yapının görsel bütünlüğünü bozmaması, aynı zamanda hem yapısal güvenliği sağlaması hem de eserin kültürel ve tarihi değerine zarar vermemesi gerekir.

Değerli Konuklar,
Değerli Meslektaşlarım,

Ülkemizde tarihi eserlerin maalesef çoğunlukla kaderine terkedildiği hepimizin malumudur. Bizler İnşaat Mühendisleri Odası olarak bu ihmalkarlıkla ilgili yerel ve merkezi yöneticilerin dikkatini çekmek, toplumda duyarlılık oluşturmak amacıyla birçok çalıştay ve sempozyum düzenledik, düzenlemeye de devam ediyoruz.

Tarihi eserlerin güvenle geleceğe devredilmesini, inşaat mühendisliği mesleği açısından çok önemli bir uzmanlık ve sorumluluk alanı olarak görüyoruz. Bu yüzden de Sempozyumumuza özel bir önem ve anlam atfettiğimiz doğrudur. Bugün burada, çok değerli bir çabaya hep birlikte tanık olacağımızdan kuşkumuz yoktur.

Elbette bu gibi bilimsel etkinliklerde sadece durum tespiti yapmakla yetinmiyor, beraberinde mesleki bilgi birikimi, uzmanlık alanlarına göre teknik anlamda neler yapılabileceğini tartışıyoruz.

Sempozyum boyunca yapılacak sunum başlıkları incelendiğinde, tarihi yapıların güçlendirilmesi ve güvenle geleceğe devredilmesi alanında, modern analiz ve modelleme teknikleri, yeni mühendislik tekniklerinin uyarlanması, kalıcı ve sürdürülebilir çözümler, kültürel mirasın korunması, toplumsal bilincin artırılması gibi birçok konuya değinileceği, restorasyon uygulamalarında yaşanan sorunlara ve çözüm önerilerine ışık tutulacağı görülecektir.

Değerli Konuklar,
Değerli Meslektaşlarım,

Böylesine kapsamlı, uluslararası katılımlı bir sempozyumun, baştan sona zorlu hazırlık sürecini kolektif bir ruhla örgütleyen ve verilen yoğun emeklerin sonucu olarak bugün burada hayata geçiren Ankara ve Diyarbakır Şube Yönetim Kurullarımıza hepinizin huzurlarında teşekkür ediyorum.

Başta Bilim, Danışma ve Düzenleme Kurulu üyeleri olmak üzere, çağrılı konuşmacılara, bildiri sunan meslektaşlarımıza ve işin mutfağında görev alan Oda personelimize de ayrı ayrı teşekkür ediyorum.

İki gün sürecek olan Sempozyumun meslek alanımıza önemli katkılar sunacağına inanıyor, başarıyla geçmesini diliyorum.

Nusret Suna
İMO Yönetim
Kurulu Başkanı

Sayın rektörüm, sayın belediye başkanımız, sayın valimiz, ticaret sanayi odası temsilcileri, kıymetli mühendisler odası temsilcileri ve, değerli katılımcılar, Welcome to Diyarbakır, the ancient city where we follow the traces of civilizations from stones, xêr hatin Ameda rengin, veke rengên biharê xemilandiye hemû çandên mezopotamyayê, sersera ser çavan hatin.

Ülkemiz, üzerinde bulunduğu kadim yukarı Mezopotamya ve Anadolu toprakları, tarihe tanıklık eden tarihi yapılarla ön plana çıkan bir coğrafyada olmasının yanı sıra dünyadaki en aktif deprem kuşakları üzerinde bulunmaktadır. Bu iki olgu tarihi yapı güvenliğinin ve güçlendirilmesinin hayati önemini oldukça net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bunun yanı sıra tarih mirasının korunması geçmiş ile günümüz ve gelecek arasındaki köprünün ayakta kalması ve bu şekilde kuşaklararası bağların kopmamasına katkı sunması ile toplum gelişimi açısından hayati önem arz etmektedir. İnşaat Mühendisleri Odası olarak üzerimize düşen sorumluluğu yerine getirmek amacı ile tarihi yapılarımızın korunması amacına katkı sunacağını düşündüğümüz bir sempozyum serisi düzenlemeye başladık. İlki 2007 yılında ulusal çapta Ankara'da ikincisi 2009 yılında uluslararası katılımlı olarak Diyarbakır'da gerçekleştirilmiş ve bu sempozyumlar sayesinde tarihi yapı restorasyon proje ve uygulama hizmetlerine yaklaşımların iyileştirilmesi sağlanmıştır. Bu sayede yapıların statik ve dinamik davranışları da sorgulanır hale gelmiş ve daha sağlıklı bir restorasyon süreci için inşaat mühendislerinin de daha çok söz sahibi olması gerekliliği vusul bulmuştur. Daha sonraları Trabzon, İstanbul, ve Erzurum'da yapılan sempozyumun son olarak 7.si odamız adına İMO Ankara ve İMO Diyarbakır Şubeleri tarafından Diyarbakır'da ve uluslararası olarak gerçekleştirmekteyiz.

Ülkemiz mevcut tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesi konusunda daha yolun başındadır ve yapması gereken çok çalışma bulunmaktadır. Tarihi yapıların gerçeğe uygun modellenmesi yeteri düzeyde ve pratik bir şekilde yapılamamaktadır. Analiz konusunda birçok belirsizlik olduğu gibi uygulama konusunda da birçok eksiklik ve çözüm bekleyen sorunlar mevcuttur. Özellikle son yıllarda, tarihi yapıların restorasyonu çalışmalarının hız kazanması ile bu soru işaretleri daha belirgin olmuş ve problemlere bir nebze cevap vermek için Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından oluşturulan bir komisyon 'Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi' kılavuzunu hazırlanmıştır. Deprem yönetmeliğine ek olarak böyle bir kılavuz, tarihi yapıların analizi konusunda çalışan mühendisler için önemli kaynak olmuştur. Bu sempozyumun da başta gelen bir amacı bu konudaki bilgi açığını gidermeye yönelik katkı sağlamaktır. Özellikle bu süreçte inşaat mühendislerinin de tarihi yapı konusunda ilerleme kat etmeleri ve daha aktif görev almaları bu yapılarımızın yapısal güvenliği açısından büyük önem arz etmektedir. Bu sempozyumun uluslararası düzeyde, konunun uzmanlarını bir araya getirerek ülkemiz inşaat mühendislerinin de konuya ilgilerinin artmasını sağlayacak ve ta-

rihi yapı değerlendirme ve güçlendirilmesi konusundaki uzman inşaat mühendislerin artmasını sağlamaktır.

Sempozyumun temel amacına hizmet edecek hedeflerinden birisi de tarihi yapıların değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi ile ilgili uluslararası düzeyde yapılan en güncel çalışmaların bölgemize gelecek bilim insanları nezdinde tartışılmasıdır. Yereldeki mühendisler, mimarlar, kamu kurumları ve uygulayıcı firmaların bu sempozyuma aktif katılım sağlaması ile günümüzde hem analiz için hem de uygulama için kullanılan ileri tekniklerin ülkemize ve bölgemize taşınması hedeflenmektedir. Sonuç olarak bu sempozyum analizleri yapan mühendislerimizin kafalarındaki soru işaretlerinin giderilmesi ve daha gerçekçi analiz yöntemleri kullanarak tarihi yapılara müdahale için daha doğru projelerin geliştirilmesi ve uygulama için daha yenilikçi malzeme ve tekniklerin kullanılmasını sağlayacaktır. Bu sempozyumda 'Tarihi Yapıların Yapı Sağlığının Hasarsız Yöntemlerle Belirlenmesi ve İzlenmesi', 'Tarihin Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesi ve Güçlendirme', 'Yapısal Analiz', 'Güçlendirme Çalışmaları ve Uygulama Örnekleri', 'Tarihi Yapılarda Zeminden Kaynaklanan Hasarlar ve Uygun Müdahale Önerileri' gibi önemli konuların tartışılması hedeflenmektedir. Neticede bu sempozyum tarihi yapıların korunması ile ilgili her türlü konu için uluslararası bir tartışma platformu sağlayacaktır. iki tane mini sempozyum ile sempozyum kapsamının mümkün olduğunca genişletilmesi hedeflenmektedir.

Bu sempozyumun yedincisinin tarihi yapı açısından zengin bir kent olan hatta bu sayede tarihin taşlara kazındığı şehir lakabına sahip olan Diyarbakır'da düzenlenmesi ayrıca büyük önem arz etmektedir. Sempozyumumuzda 50'nin üzerinde ulusal ve uluslararası üniversitelerden ve üç dilde bildiri kabul edilmiştir. 9 ülkeden 129 yazar ile 10 tane oturum, iki mini sempozyum, 4 çağrılı ve bir davetli konuşmacı ile sempozyumumuzun verimli geçmesini diliyoruz. Ayrıca sempozyumun sonucunda bildirilerin bir araya getirilerek tarihi yapıların değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi konusunda literatüre bir kaynak kitap kazandırılması amaçlanmaktadır.

Son olarak sözlerimi bitirmeden, Sempozyumumuza sponsor olan firmalarımıza ve bizi destekleyen kurum ve kuruluşlarımıza teşekkürlerimizi sunarız. Arka planda büyük emekleri olan Diyarbakır ve Ankara şubeden arkadaşlarımıza da minnet borçluyuz.

Bütün konuklarımız için sempozyumun verimli geçmesini diler, selam ve saygılarımı sunarım.

Sempozyum Düzenleme Kurulu Başkanı
İdris Bedirhanoğlu

BİLDİRİLER

27 EYLÜL 2024

7. ULUSLARARASI TARİHİ YAPILARIN GÜÇLENDİRİLMESİ VE GELECEĞE GÜVENLE DEVRİ SEMPOZYUMU

7. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRENGTHENING HISTORICAL BUILDINGS AND TRANSFERRING THEM SAFELY TO THE FUTURE

7. SEMPOZYÛMA NAVNETEWEYÎ LI DERBARÊ QEWÎKIRIN Û PARASTINA AVAHÎYÊN DÎROKÎ

DİYARBAKIR, SEZAİ KARAKOÇ KÜLTÜR MERKEZİ

A SALONU - 1A OTURUMU

Oturum Başkanları
Gianmarco de Felice, Selçuk Uluata

Damage and Interventions to Historical Masonry Buildings: Good And Ill Practices
Elizabeth Vintzileou

Pantokrator Sarnıcı Restorasyon Süreci
Özlem Balık

Retrofitting In Traditional German Masonry Houses
Fevzi Saritas, Idris Bedirhanoglu

Tarihi Boğaz, Yıldız Ve Kösepaşa Köprülerinin Restorasyon Uygulama Çalışmaları
Özge Öztürk Tokel, Ayşe Avşin, Sine Yeşilkaya

Tarihi Yukarı (Koca) Köprüsü'nün Restorasyon Uygulaması
Mergül Akgün, Emrah Altınok, Dr. Ayşe Avşin

DAMAGE AND INTERVENTIONS T HISTORICAL MASONRY BUILDINGS: GOOD AND ILL PRACTICES

Elizabeth Vintzileou[1]

[1]Emeritus Professor, National Technical Universityof Athens, Greece,
elvintz@central.ntua.gr

Abstract

This paper presents typical damage observed during recent earthquakes in Türkiye and elsewhere, along with their qualitative interpretation revealing the main weaknesses of existing stone masonry buildings. Historical structural systems, having a stone masonry ground storey and upper storeys made of timber framed masonry are also included. Strengthening techniques, frequently applied to alleviate the inherent inadequacies of stone masonry buildings are commentedon, while their rationale, their efficiency and the effect of their misuse are presented, based on field observations afterrecent earthquakes and/or experimental results. The paper focuses on good and ill practices with the purpose of opening the discussion on the selection of adequate intervention techniques that may ensure an improved seismic behaviour, thus protecting human lives and property and contributing to the preservation of the built cultural heritage.

Keywords: Stone masonry, timber-framed masonry, earthquake damage, strengthening, grouting, stiffening of floors.

Introduction

Earthquakes in several countries throughout the globe have repeatedly demostrated the inherent weaknesses of old unreinforced stone masonry buildings. On the contrary, there is evidence about the satisfactory behaviour of some historical structural systems, e.g., buildings made of timber-laced or timber-framed masonry. In countries around the Mediterranean and elsewhere, heritage buildings present similarities in their structural system and, hence, they undergo similar damage due to seismic events. Consequently, similar interventions are adequate for their pre- or post-earthquake strengthening and improvement of their overall behaviour. The international engineering community is being quite active in this field in the recent decades, while several national and regional regulatory documents were or are being produced, providing guidance related to the selection of adequate intervention techniques, to the investigation of their efficiency, as well as to their design and application. A survey of the internationally availablerelevant researchdataandguidelinesisobviouslybeyondthescopeofthispaper.The purpose of this work is to briefly identify the main weaknesses or strong points of historical structural systems, as revealed by in situ observations after several earthquakes. On this ground, and based on the effect of recent earthquakes, including the 2023 Türkiye-Syria earthquakes, this paper focuses on some frequently applied intervention techniques and offers evidence on their positive or negative effects on the seismic behaviour of stone masonry buildings.

The main weaknesses of stone masonry buildings

Unreinforced stone masonry is known to be a heavy, composite, anisotropic and brittle material, with mechanical properties of low value. The old Constructors, building using this material were frequently taking measures to ensure the survival of their constructions, especially in earthquake prone areas. Some of those measures are: Thick walls of significant lateral stiffness, limited length of openings (doors and windows) compared to the total

length of the building, strengthening of the perimeter of the openings (e.g., arched lintels, elaborate construction using larger stones embedded to masonry piers, etc.), proper connection of cross walls, etc. There are, however, some typical weaknesses of old masonry buildings, repeatedly revealed because of many earthquakes in the last decades. Those weaknesses, aggravated by non-repaired slight to moderate damage due to previous earthquakes, by ageing and decay, by the lack of maintenance, by the abandonment of rural areas, etc., can serve as a basis for the selection of adequate remedial measures to protect the lives and the property of the inhabitants and, indeed, the built cultural heritage.

Vulnerable Construction Typology of Masonry

There is a vast variety of construction typologies of masonry, both on the faces of bearing elements and within their thickness. Quite frequently, the exterior face of masonry is of more elaborate construction than the interior one and it remains unplastered. Therefore, within the thickness, there are two leaves of different construction typology either in contact between them (two-leaf masonry) or with a space between them (three-leaf masonry). That space may be of more or less solid structure, made of small stones and large mortar quantity. As a rule, the exterior leaves of masonry are not transversely connected, using header stones (Figure 1).



Figure1 Typical construction typologies of stone masonriesin Greece, Italyand Türkiye

The seismic vulnerability of those construction typologies is two-fold: (a) The material filling the space between the two exterior leaves of masonry being of poor mechanical properties, the actual resisting thickness of the masonry elements is substantially smaller than their nominal thickness. Thus, the bearing capacity in compression, shear and out- of-plane bending is significantly reduced as compared to a solid wall of the same thickness. Moreimportantly (b) the weak bond between the exterior leaves and the filling material can be broken, either due to decay or due to previous even slight to moderate earthquakes. Thus, with the masonry transversely delaminated, the bearing elements become more slender, the exterior leaves resist the seismic action separately from one another, both in- and out-of-their plane. The consequence of this behaviour was repeatedly observed after strong earthquakes (Figure 1 and Figure 2).

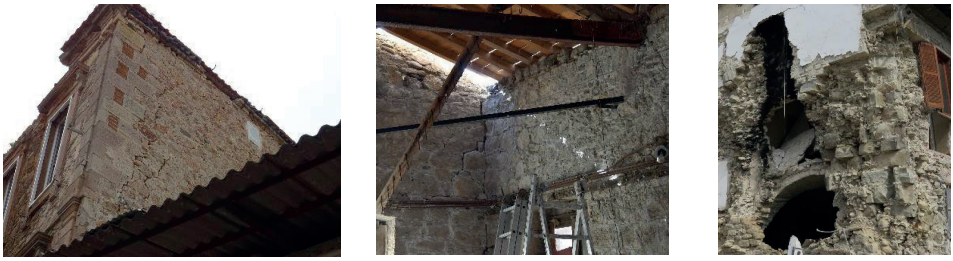


Figure2 Delamination of three-leaf masonry and damage due to seismic actions in Amatrice and in Samos

Inadequate connection between cross walls

Although special attention was often given by the Constructors in the connection of walls at the corners of buildings (Figure 3a), there are cases where this rule was not applied. Indeed, especially in case of three-leaf masonry, the transverse connection of the exterior leaves of masonry (by interlocking of the corner stones) was not always ensured. Furthermore, quite frequently,

the perimeter bearing walls were constructed first, and the interior bearingwalls were following, unconnected with the perimeter ones. The ensuing damages (Figure 3b, c) are quite eloquent. The almost linear vertical crack in Figure 3b proves the lack of connection of the two walls, while in Figure 3c, one may observe the large stones at the corner of the building, connecting the interior leaves of the two walls. The lack of connection between the interior and the exterior leaf is proven by the collapse of the latter, at the corner of the building as well.



(a) (b) (c)

Figure 3 (a) Solid connection of cross walls, (b) Almost vertical crack suggesting a deficient connection between walls, (c) Lack of connection between the exterior and the interior leaves of the three-leaf masonry walls.

Flexible diaphragms loosely connected to walls

Typically, floors and roof in unreinforced stone masonry buildings are made of timber (e.g., joists or trusses, and timber planking). The diaphragms, flexible in their plane, are connected only to the supporting them vertical elements, this connection being of limited fixity. Thus, the walls are subjected to largely different deformations during a seismic event. Furthermore, the overall lateral stiffness of the building is decreased (compared to a box-like building composed of well connected among them walls and diaphragms) and, thus, the deformation simposed to the walls are larger.This behaviour affects mainly the out-of-plane behaviour of walls, increasing the probability of damage and out-of-plane partial or total collapse. The situation is aggravated by the vulnerable construction typologies of masonry, typical for

those buildings. The related damage is very frequent and illustrated also in the photographs of Figures 1 to 3.

Interventions to alleviate the weaknesses of unreinforced stone masonry buildings

The aforementioned typical construction characteristics of stone masonry buildings, leading to the repeatedly observed problematic seismic behaviour thereof, may guide the engineer to adopt the most adequate measures to wards the improvement of this behaviour. Indeed, providing a monolithic behaviour to two-andthree-leafmasonries, enhancingthe in-plane stiffness of floors and roof and ensuring proper connection among all bearing elements (horizontal and vertical) would allot box-like behaviour to the building, reducing the deformations imposed to the bearing elements for the same input action, imposing practically equal deformations to all vertical elements, etc. Therefore, the following paragraphs focus on systemic schemes of interventions that may alleviate the seismic vulnerability of historical buildings and, hence, contribute to their preservation. It has to be admitted that there are cases where the difference between the targeted behaviour and that ensured by the aforementioned techniques is such that further measures are to be taken. Those buildings are to be examined on a case by case basis. General solutions, applicable to the vast majority of buildings to be preserved, may not be sufficient.

Transversely connecting the leaves of masonry

This is an intervention of major importance, and it constitutes a precondition for the application and the efficiency of several other intervention techniques, as explained herein. The transverse connection of the leaves of masonry and, hence, the monolithic behaviour of masonry can be achieved through grouting and by using transverse (metallic or non-metallic) connectors. The development of grouts able to be injected (at low pressure) to historical masonries and to fill internal cracks and voids was a long process.



(a) (b)

Figure 4 Athree-leaf masonry (a) before and (b) after the application of a hydraulic grout (courtesy Dr. E.Tsakanika)

While the first attempts were directed to grouts with high cement content, the current state-of-the-art (Miltiadou-Fezans and Tassios, 2022), based on numerous experimental campaigns and applications, shows the preponderance of hydraulic lime-based or ternary grouts. Indeed, those grouts constitute a durable intervention, they ensure the homogenization of masonry (Figure 4), while they provide significant enhancement of the mechanical properties of masonry (Valluzzi, 2000,Vintzileouand Miltiadou-Fezans, 2008, Vintzileou, 2011). Thanks to the improved bond of masonry materials within the thickness of the bearing elements, delamination of masonry is significantly delayed or avoided and the severe damages shown in Figures 1 and 2 are prevented.

Some documents (e.g., Bothara and Brzev, 2011) focus on the transverse connection of masonry leaves, using connectors. Those connectors may be steel bars, arranged at intervals, and bonded to masonry elements using a strong cementitious mortar. Alternatively, the steel connectors are positioned in drilled-through holes, they are bonded to masonry and anchored

on the faces of masonry elements using steel anchorage plates.Therecentlyapproved Greek Code for the assessment and structural interventions of masonry structures (EPPO, 2023) does not allow the transverse connectors to be the only technique. Indeed, the positioning of such connectors at distances to a non-grouted masonry (like in Figure 4a) provides only local connection of masonry leaves and it does not prevent delmination and damage in regions between the anchors locations. The results of tests on three-leaf masonry walls (e.g., Modena 2012) have proven that the application of transverse connectors does not increase neither their bearing capacity in compression nor their stiffness. The most efficient technique is grouting, while the combination of grouting and transverse connectors yields the best results in terms of transverse deformations of masonry walls. It is noted that the same techniques are adequate for the re-instatement or the improvement of the connection between bearing walls.

Enhancement of thein-plane stiffness of floors and roof

As aforementioned, the in-plane flexibility of timber floors and roofs of historical stone masonry buildings, and their loose connection to the vertical bearing elements are responsible for severe damage, especially, due to out-of-plane actions.This is more so, when flexible diaphragms are resting on vulnerable masonries liable to delamination. It has to be noted that any technique to enhance the in-plane stiffness of diaphragms should be applied to homogenized masonry elements and it should include the adequate connection of the diaphragms to the walls (EPPO, 2023). The examples presented and commented on herein prove the necessity of those measures.

Until few decades ago, the replacement of timber roofs by reinforced concrete slabs was a rather frequent intervention to existing masonry buildings. RC slabs were combined with the construction of an RC tie beam. The latter was usually cast on top of the walls, its width being smaller than or equal to the thickness of the masonry walls. At intermediate floors, casting a con-

tinuous RC tie-beam over a significant portion of the wall thickness is not feasible and, thus, the slabs replacing the timber floors did not extend to the outer face of the walls. It should also be noted that there are many cases, where the timber roof was preserved (or replaced by a new timber one, of the same geometry). In thosecases, typically, a RC tie-beam was cast on top of the walls and underneath the roof, presumably ensuring diaphragm action at roof level. Nonetheless, simple mechanics may prove and, unfortunately, several earthquakes have evidenced that this assumption is far from being accurate. Another ill practice related to interventions at roof level is that no connection (using dowels) was provided between the RC tie beam and the walls. It was assumed that the friction between the concrete and the top face of the wall was sufficient for the transfer of actions from the roof to the walls. However, the vertical loads at the top of the building being of small value, the frictional force at that level may not be adequate.

Modena (2012) refers also to damage observed in strengthened buildings, following earthquakes in Italy. For example, a RC slab was cast monolithically with a tie beam at the level of an intermediate floor. The tie beam was cast on the interior leaf of masonry walls only, while the three-leaf masonry walls were not strengthened. The eccentric application of actions (due to the eccentricity of the tie beam), combined with the horizontal movement of the added mass of the RC slab with respect to the vulnerable three-leaf walls have led to the out-of-plane expulsion and collapse of the latter. In another building, the stiffRC roof, seated on top of unstrengthened three-leafmasonry, has moved as a solid body by almost one meter out of the facade of the building.The inadequacy of replacing timber roofs by RC slabs and tie beams simply seated on masonry walls was observed also by Munari et al. (2011) after the 2009L'Aquila earthquake.



(a) (b)



(c) (d)



(e) (f)

Figure5 The effec to fRC slabs on top of unstrengthened masonry walls. (a) to (d) Italy, 2016, (e) and (f) Antakya, Türkiye, 2023.

Similar are the observations that can be made on the photographs of Figure 5. The significant mass of the RC slab added at the top of unstrengthened masonry walls of vulnerable construction typology, without any connection to them, cannot prevent the out-of-plane failureof the walls and, thus, it does not offer any improvement to the seismic behaviour of the building. On the contrary, in cases where (e.g., Figure5c, eand f) the slab loses support due to the collapse of the walls, casualties or injuries of the inhabitants are imminent.

The purpose to enhance the in-plane stiffness of floors and roofs can beserved by means other than the construction of RC slabs. Several techniques are studied (e.g., Piazza, 2008, Valluzzi et al., 2010, Valluzzi et al., 2013) and applied in historical buildings and monuments, namely, the addition of a second planking in floors and roofs (at an angle with respect to the originalones), the use of a system of steel ties (parallel, perpendicular, anddiagonal with respect to the walls), etc. A non-negligible advantage of the alternative techniques is their application in-dryand the minimal increase of the mass of the building.

The application of those alternative techniques as well, is paired with the consolidation of masonry and the provision of adequate connection among the vertical and the horizontal bearing elements. Shake table tests on a two-storey building model (scale 1:2), made of three-leafstone masonry (Vintzileou et al. 2015), strengthened through grouting and enhancement of the diaphragm action of the floors (by double timber planking) have proven the adequacy of the interventions, as the box-action of the model was achieved, while the model was able to sustain significantly higher base accelerations than at its as- built state.

Enhancing the bearing capacity of stone masonry buildings

In addition to the systemic interventions applied to improve the overall be-

haviour of stone masonry buildings, interventions aiming at enhancing the mechanical properties of masonry (and, by way of consequence, of the masonry structural members) are often needed for the building to meet the requirements dictated by its new use, as well as by current seismic codes. In addition to grouting of masonry, deep rejointing of masonry is considered as an adequate and efficient intervention. This may be the case, provided that many conditions are fulfilled, namely, (a) the masonry is grouted (Modena, 2012), (b) the thickness of the masonry elements is limited (say, to 0.50mapprox.), (c) the workmanship (meticulous removal of mortar from all joints, cleaning, application of the stronger mortar to completely fill all the joints) is of high quality, etc. Thus, deep rejointing is, in the majority of cases, an intervention of high costand of limited efficiency. Last but not least, the new mortar cannot be of excessively higher mechanical properties than the replaced one. Otherwise, the concentration of stresses close to the outer faces of masonry-where the strong and stiff mortar is located-may lead to spalling of the masonry units and, finally, even to reduction of the pre-intervention mechanical properties of masonry, as observed by Vintzileou (2001) for the compressive strength.

Another technique, frequently applied in the past and currently prohibited by the competent authorities in several countries, is RC jacketing of stone masonry walls. In addition to the obvious reason of the harm caused by jacketing to the aesthetic and architecturalvaluesofhistoricalbuildings (Figure 6), there are further reasons that justify the exclusion of this intervention, namely, the increase of themass of the building, the radical change of the movement of moisture and vapour within walls enclosed in concrete (leading with time to the disintegration of masonry), the limited efficiency of one-sided RC jackets, usually applied in the interior of the building, etc. The need of bridging the gap between the targeted and the available bearing capacity can be served by alternative techniques (e.g., transforming partition walls to bearing ones, providing a new internal bearing system, providing

external buttresses, etc.) to be selected on a case-by-case basis. Last but not least, the new use of ahistorical building should be compatible with the potential of the structural system to safely host it,after due rehabilitation, respecting the values to be preserved.



Figure 6 RC jacket applications in listed stone masonry buildings in Greece

Mixed, stone masonry and timber-framed masonry, structural systems

In several earthquake prone areas, structural systems were developed to ensure improved seismic behaviour and, hence, protection of human lives and property. A frequently met structural system is that of timber-framed masonry, presenting several alternatives in terms of materials, arrangement of timberelements, etc. In many locations, timber-framed masonry (in the upper storey(s)) is combined with unreinforced stone masonry in the groundstorey(e.g., Figure7a, and Dikmen, 2009). A historical overview of this structural system is found in Vasconcelos et al. (2015). Timber-framed masonry is more or less elaborate. Indeed, there are cases where only vertical and horizontal timber elements are used, while in others, diagonal elements are also used (Figure7a).The connections among timber elements are simple (nails are used throughout the timber-framed masonry walls, Figure 8), while in other cases, special care is taken in the area of connection between walls and roof or floor, as well as in the corners of the building (Figure 7b).



(a) (b) (c)

Figure 7 Island of Lefkada, Greece (a) Typical historical building, (b) Connections of timber elements, (c) Protection of timber-framed wallsusingtimberplanks (Vintzileou and Touliatos, 2005).



Figure 8 Buildingin Antakya: Stone masonry at the lower storey and timber framed masonry at the upper storey

Typically, the timber frames are filled with small size stones or bricks (fired or unfired), while the thickness of the walls is equal to the respective dimension of the timber elements. The main enemy of timber-framed masonry being the changes in moisture, the walls are typically protected either by the plaster (Figure 8) or by timber planking (Figure 7c).

The historical system combining stone masonry at the lower storey and timber-framed masonry at the upper storey is found in a number of buildings in Antakya (Figure 8 and Figure 9). This structural system is reported to be-

have reasonably well after several earthquakes. For example, Bal and Vatan (2009) reporton the survival of buildings made according to thehistorical structural system, in contrast to modern buildings in thesame area. This is confirmed by Gülhan and Güney (2000), who have report on their study in Kocaeli and Sakarya, after the 1999 Marmara earthquake.

Similar are the observations after the recent strong earthquakes in Türkiye-Syria, 2023. Although statistical data on the percentage of buildings belonging to the historical structural system that has suffered significant damage or collapse are not available to the author of this paper, the in situ observations prove that many of those buildings have survived, thus offering to the inhabitants better chance to save their lives. However, in several cases, the damage typical to this building typology were observed, namely, severe cracking or partial collapse of the stone masonry at the ground storey (Figure 9b), loosening of connections between timber elements, damage tomasonry filling the timber frames (Figure 8), etc. It is admitted that the severity of damage depends on several parameters, such as the quality of stone masonry (quality of materials and construction typology), the level of elaboration of the timber-framed walls (in terms of arrangement of timber elements and their connections), as well as on the state of preservation (maintenance included).



(a) (b)

Figure 9 The historical structural system of Antakya

Regarding the pre- or post-earthquake interventions to preserve the historical structural systems, one can distinguish between techniques to be applied to the ground storey and those adequate for the rehabilitation of the upper storeys. Indeed, the aforementioned interventions aiming at transversely connecting the leaves of stone masonry, enhancing the bearing capacity of masonry walls, stiffening the floor on top of the ground storey, and providing a proper connection between vertical elements, as well as between walls and floor, are to be applied.As for the upper storeys, adequate interventions are to be chosen, depending on the state of timber-masonry. Thus, extensive biological attack of timber elements or large residual deformations may lead to the need of partial or complete reconstruction. If the state of preservation is, in general, good, local damages of filling masonry may be repaired, loose connections areto beimproved (e.g., using metal plates nailed on joints), etc. In other cases, e.g., in buildings like the one shown in Figure 9b, interventions may need to be limited to the lower storey.

Concluding remarks

The work of numerous researchers throughout the globe, and many seismic events that occurred in the last decades, have provided evidence on typical characteristics of masonry buildings that make those structures vulnerable to earthquakes. At the same time, the interpretation, in terms of Mechanics, of the observed damage shows the path to follow with the purpose of improving the seismic performance of masonry buildings.

In this paper, several systemic interventions are mentioned, aiming at alleviating the inherent weaknesses of stone masonry buildings.Those systemic interventions, aiming to improve the box-like behaviour of buildings, includ econsolidation of two-and three-leaf masonry elements through grouting (to avoid their delamination and to increase their mechanical properties), improvement of connection between cross walls (through stitchingand/orusingconnectors), enhancement of diaphragm action of floors and roofs (to

ensure almost equal displacements of all vertical elements) and adequate connection between horizontal and vertical bearing elements (to ensure the efficiency of the aforementioned interventions and the joint action of all structural elements).

Of course, there are further intervention techniques contributing to improved seismic behaviour. Those comprise repair and/or strengthening techniques. It is noted that even when strengthening of the building is required, repair of damage should precede. Repointing, plastering, grouting or stitching of cracks, local reconstruction of heavily damaged regions, etc., aim at reinstating the pre-earthquake capacity of the structure. Among the most commonly applied strengthening techniques are the reinforced plaster (preferably, double-sided and made of materials allowing masonry to breathe), the confinement of stone masonry piers and columns (using metallic or nonmetallic external reinforcement), filling of openings or the installation of (timber or steel) frames in the perimeter of openings, provision of struts and ties to reduce the detachment of walls from their transverse ones or-when installed to arches and domes-to resist the horizontal component of the thrust, constructing buttresses (adequately connected to masonry) to alleviate the out-of-plane vulnerability of long and high walls, etc. Those and other techniques the Designer may apply are distinguished from the systemic ones. Indeed, the systemic interventions aim at improving the overall behaviour of the building, whereas the aforementioned techniques may be applied to a more or less limited number of bearing elements, when the systemic interventions prove not to be sufficient to cover the gap between the available and the target margins of safety at the level of each distinct structural member. It is noted that, if the state of the building or the required performance level are such that the combined application of several techniques cannot provide the necessary safety, the construction of a new internal bearing system may be sought. For such a new bearing system to efficiently protect the existing one against seismic actions, it has to be adequately connected to it and the

compatibility of deformations of the two systems (old and new) has to be ensured.

Some final remarks are needed here:

1. In the common case of application of more than one interventiontechniques, the final overall improvement in stiffness, resistance or ductility should not be taken as the sum of the contributions of all the applied techniques, as-up to now-there is no evidence (experimental or due to seismic events) supporting this assumption.
2. There are techniques applied to the existing masonry elements themselves (e.g., grouting, rejointing, etc.) and others applied to the exterior of them (e.g., reinforced plaster, buttresses, etc.). It is advisable to first consider those techniques that are applicable to the body of the existing construction and, only if those are not sufficient, to prescribe further external interventions.
3. The in-time efficiency of theinterventions constitutes a fundamental requirement, set in Codes and Guidelines. The selection of adequate materials, techniques, and application procedures satisfying the durability requirement is, therefore, of major significance.

References

1. Bal, I. E., Vatan, M., 2009. Earthquake resistance of traditional houses in Turkey: Timber-frameinfilledstructures,in*TimberStructures:FromAntiquitytothePresent,* Publisher:T.C.HALİÇÜNİVERSİTESİ,Istanbul,Turkey,Eds.Chilton,J.,Mungan, I., ISBN: 978-975-8574-25-4.

2. Bothara, J., and Brzev, S. A. EERI (2011) Tutorial: Improving the Seismic Performance of Stone Masonry Buildings, First Edition 2011.

3. Dikmen, N. (with contributions by Randolph Langenbach) (2009) An investigation on traditional timber-framed buildings in Çankırı Province of Turkey, http://fbe.trakya.edu.tr/tujs, Trakya Univ J Sci. 11(1):15-27, ISSN 1305-6468 DIC: 282NDIT3041006100610.

4. EPPO (Earthquake Planning and Protection Organization) (2023) Code for assessment and structural interventions to masonry structures, Athens, Greece (in Greek).

5. Gülhan,D.,Güney,I.Ő.(2000):Thebehavioroftraditionalbuildingsystemsagainst earthquake and its comparison to reinforced concrete frame systems: experiences of MarmaraearthquakedamageassessmentstudiesinKocaeliandSakarya.Proceedings of Earthquake-safe: Lessons to be Learned from Traditional Construction, Istanbul, Turkey. http://www.icomos.org/iiwc/seismic/Gulhan.pdf

6. Modena C. (2012) Analisi e interventi strutturali su edifici in muratura secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni 2008, Ordine degli Ingegneri della Provincia di Pistoia (https://www.ordineingegneri.pistoia.it/wp-content/uploads/Lezione-2012-11-05_Prof-Modena.pdf,last accessed online, March 7th, 2024)

7. Miltiadou-Fezans, A., and Tassios, Th.P. (2022) Mix-design and Application of Hydraulic Grouts for Masonry Strengthening, 1stEdition, Springer Tracks in Civil Engineering, Springer Nature Switzerland AG 2022, 283pp.

8. Munari, M., da Porto, F., Bartolozzi, A., Mocellini M., Valdesolo, A., Modena, C. (2011)Analisidivulnerabilitàsismicaeinterventi dimiglioramentostrutturalediun aggregato nel centro storico di L'Aquila. *Conference ANIDIS*, Bari, Italy.

9. Piazza, M. (2008) The Role of In-Plane Floor Stiffness in the Seismic Behaviour of Traditional Buildings, in Proceedings of the 14thWorld Conference on Earthquake Engineering, 12-17 October 2008, Beijing, China.

10. Valluzzi, M. R., Garbin, E., Dalla Benetta, M., and Modena, C. (2010) In-plane strengthening of timber floors for the seismic improvement of masonry buildings,

in ProceedingsoftheWorldConferenceonTimberEngineering,20-24June2010,Riva del Garda, Italy.Valluzzi, M.R. (2000) Comportamento meccanico di murature storiche consolidate conmaterialietecnicheabasedicalce,DoctorThesis,UniversityofTrieste,Italy(in Italian).

11. Valluzzi, M.R., di Bella, A., and Garbin, E. (2013) Optimization of mechanical and acoustic performance of timber floors, Advanced Materials Research, 690–697, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.778.690.

12. Vasconcelos, G., Lourenço P.B., Poletti, E. (2015) An overview on the seismic behaviour of timber frame structures, Chapter 10 in Historical Earthquake-Resistant Timber Frames in the Mediterranean Area, Ruggieri, N., Tampone, G., Zinno, R., Eds, Springer, ISBN 978-3-319-16186-0 ISBN 978-3-319-16187-7 (eBook) DOI 10.1007/978-3-319-16187-7.

13. Vintzileou,E.,andTouliatos,P.,2005.Seismicbehaviourofthehistorical structural systemoftheislandofLefkada,Greece,in*ProceedingsoftheConferenceSTREMAH 2005*, 22-24 June, 2005, Malta, pp. 291-300.

14. Vintzileou E., Miltiadou-Fezans A. (2008) Mechanical properties of three-leaf stone masonrygroutedwithternaryorhydrauliclime-basedgrouts,EngineeringStructures, Volume 30, Issue 8, August 2008, Pages 2265-2276, doi:10.1016/j.engstruct.2007.11.003.

15. Vintzileou E. (2001) The effect of deep rejointing on the compressive strength of brick masonry, Masonry International, Vol. 15, No 1, 2001, pp. 8-12.

16. Vintzileou E. (2011) Three-leaf masonry in compression, before and after grouting: A review of literature, International Journal of ArchitecturalHeritage, Vol. 5 (4-5),
pp.513-538,DOI: 10.1080/15583058.2011.557137.

17. Vintzileou, E., Mouzakis, C., Adami, C.-E., and Karapitta, L. (2015) Seismic behaviorofthree-leafstonemasonrybuildingsbeforeandafterinterventions:Shaking table tests on a two-storey masonry model, Bulletin of Earthquake Engineering 13(10), 3107-3133, DOI: 10.1007/s10518-015-9746-x.

PANTOKRATOR SARNICI RESTORASYON SÜRECİ

Özlem Balık
İnşaat Yüksek Mühendisi, Koruma Uzmanı, İstanbul

Özet

Birçok medeniyete ev sahipliği yapan İstanbul'un geçmişinde, su ihtiyacını karşılamak amacıyla inşa edilen anıt eserler, günümüz İstanbul'unda önemli tarihi değerleri arasında yer almaktadır. Sudan yararlanmak isteyen insanlar, çeşitli yapılar inşa ederek, susuz yaşam alanlarına kilometrelerce uzaktan su getiren kanallar, su kemerleri ve su depoları inşa etmişlerdir. Bu su yapılarından birçoğu günümüze ulaşmış, bazılarının da yeni yaşam alanlarının altında kaldığı bilinmektedir. Bu çalışmada, Bizans devrinden günümüze kadar gelen, İstanbul'un önemli kültürel miraslarından biri olan Pantokrator Sarnıcı'nın Tarihi Yarımada içindeki konumu, yapının çevre ile olan ilişkisi, tarihsel gelişimi, yapısal ve mimari özellikleri, koruma süreci ve restorasyon çalışmaları aktarılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Sarnıç, Bizans dönemi, Su yapıları, Restorasyon.

Abstract

The historical monument structures built to meet the water needs of Istanbul, which has hosted many civilizations, are among its significant historical values today. For thousands of years, human has constructed various water structures to utilize water. Water channels, aqueducts, and cisters can be given as examples of these structures. Thus, water was brought to arid living areas from kilometers away. Many of these structures used in the past have survived to the present day, but it is known that some have been buried under modern living spaces. In this study, the location of the Pantokrator Cistern, which is one of Istanbul's important cultural heritages that has come from the Byzantine era to the present, within the Historical Peninsula, its relationship with the environment, historical development, structural and architectural features, conservation process, and restoration works will be conveyed.

Keywords: Cistern, Byzantine Period, Water structures, Restoration.

1. Giriş

İstanbul, tarihsel süreçte birçok medeniyete ev sahipliği yapmış ve yaşam sürecinde gerekli suyu sağlamak için her medeniyet geride izlerini taşıyan eserler bırakmıştır. Sularla çevrili bir şehir olmasına rağmen, tatlı su kaynaklarının sınırlı olması, su ile ilgili çözüm üretmeyi gerektirmiştir. Roma döneminden bu yana çevre bölgelerden su getirmek için su bentleri, su kemerleri, sarnıçlar, çeşmeler inşa ederek şehrin su ihtiyacı karşılanmıştır.

Sarayburnu civarında MÖ 667'de Byzantion olarak kurulan yerleşim alanında ve Roma dönemi gelişim sürecinde ihtiyaç duyulan su, küçük kaynaklardan ve açılan kuyular aracılığıyla yeraltı sularından sağlanırdı [1]. Su temini ile ilgili imar faaliyetleri olarak, MS 2. yüzyılda İmparator Hadrianus (117-138) döneminde Belgrat'tan kente ilk su taşınmıştır [2]. 4. yüzyılda da İstanbul Roma İmparatorluğunun yeni başkenti olması ve şehrin büyümesi ile Tarihi Yarımadanın su kaynakları yetersiz gelmeye başlaması, (346-378) Valens kemerinin inşası, 1. Theodosius (379-396) tarafından yapılan yeni irsale hatları gibi inşa faaliyetleriyle, şehrin su ihtiyacına çözümler üretildiği bilinmektedir [3].

Valens Hattı'nın inşasından sonra, daha fazla su elde etmek ve talebi karşılamak, mevcut kaynakları yönetebilmek ve depolamak için, şehir içindeki su yatırımlarında sarnıçlara odaklanıldı. Yarımada'daki sarnıçların üzerinde yapılan en yeni çalışmalarda bilinen Bizans sarnıçların sayısının 211 olduğu belgeleniyor. İstanbul'un önemli yapılarından olan, Tarihi Yarımada'nın farklı yerlerinde yüzyıllar boyu hizmet veren bu sarnıçların bazıları erken dönem (4.-7. yüzyıllar), orta dönem (8.-12. yüzyıllar), geç dönem (13.-15. yüzyıllar) ve bilinmeyen dönem olmak üzere tarihlendirilmişlerdir (Şekil 1) [4].

Tarihi Yarımada'daki sarnıç çeşitleri, bireysel hanelere ait yağmur suyu toplama sistemleri olan en küçük geleneksel yapılardan, birkaç aylık depolama yapabilen devasa açık hava yapılarına kadar uzanmaktadır. Su depolarının çoğunluğu kentin çeperinde yer alan, Aetius (Karagümrük Çukurbostanı),

Hagios Mokios (Altımermer Çukurbostanı) ve Aspar (Çarşamba Çukurbostanı) olarak üç açık hava sarnıcı ve eski şehrin merkezinde bulunan kapalı sarnıçların en büyükleri olan Yerebatan ve Binbirdirek sarnıcı olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 1: Tarihi yarımada üzerindeki sarnıçların dönemsel olarak dağılımı) [4]. (Siyah yuvarlak- erken dönem(4.-7. yüzyıllar), gri yuvarlak-orta (8.-12. yüzyıllar), beyaz yuvarlak-geç (13.-15. yüzyıllar) ve üçgen (bilinmeyen sarnıçlar)

Tarihi Yarımada'da önemli kültürel miras değeri olan Bizans sarnıçlarından Pantokrator Sarnıcı, konumu ve mimarisi gereği benzersiz bir yapıya sahiptir. Yapı 18. yüzyıla kadar kullanılmış, sonrasında uzun bir süre işlevsiz kalması, bakımsızlık, zarar verici çevresel etkenler yanında, işlevi dışında kullanımı, yapı genelinde hasarların oluşmasına neden olmuştur. Özgünlüğü büyük ölçüde korunan sarnıcın, strüktürel yapısında, bahsedilen etkenlerden dolayı bozulmalar meydana gelmiştir.

Koruma kapsamında yapılan araştırma ve arkeolojik kazı çalışmalarında, öncesinde tespit edilemeyen detaylar ortaya çıkarılmıştır. Restorasyon sürecinde yapıda yıpranma ve bozulma gözlenen kısımlarda, özgün durumuna sadık kalınarak onarım çalışmaları yapılmıştır. Müdahalelerin kapsamı, ge-

nel olarak; temizleme, sağlamlaştırma, güçlendirme, kısmi olarak bütünleme ve yeni işleve uyarlama olarak sıralanabilir.

2. Pantokrator Sarnıcı Konumu ve Tarihsel Süreci

Pantokrator sarnıcı, Bizans döneminin İstanbul, Fatih ilçesinde, Zeyrek bölgesinde bulunan önemli ve büyük Pantokrator Manastırı'nın kenarında konumlanır (Şekil 2). Atatürk Bulvarı'nın kenarında, kısmen toprak üstünde sıralı niş halinde bir cephesi bulunan, nadir bir büyük sarnıç örneğidir.

Zeyrek, şehrin dördüncü tepesi üzerinde ve eteklerindeki yerleşim alanıdır. Atatürk Bulvarı ve Haliç'ten başlayarak istinat duvarları ile Bizans'tan bugüne kadar yapılan teraslamalar ve setler üzerine yerleşilen, Bizans'ın ilk dönemlerinde Pantokrator manastırının yer aldığı bölge olarak bilinir [5].

Pantokrator Manastırının II. İoannes Komnenos (1118-1143) dönemine tarihlenmesi, sarnıcın da aynı dönemde inşa edildiğine işaret eder [3]. Atatürk Bulvarı'na doğru eğimin oldukça dik olduğu bu bölgede, sarnıcın batı tarafının zemin kazılarak oluşturulmuş, doğu tarafı ise tamamen zemin seviyesinin üzerinde yükselmektedir. Bu yapısal özellik, manastır kompleksine düz bir teras alanı sağlamıştır.



Şekil 2: Pantokrator Sarnıcı ortofoto haritadaki konumu (2a). Atatürk Bulvarı üzerindeki konumu(2b). Sarnıç doğu cepheden görünüşü(2c).

Osmanlı'nın İstanbul'u fethinden sonraki yüzyıllarda, sarnıcın içerisinde uzun bir süre su saklandığı, sarnıcın tam üstünde yer alan terasın ortasında, 16. yüzyılda Piri Paşa tarafından vakfedilen ve Soğukkuyu Mescidi ya da cami adı ile adlandırılmıştır. 17. yüzyılda Evliya Çelebi'nin eserlerinde

adı geçen Piri Paşa Camii, "...altı, üç yüz (!) sütun üzerine bir sarnıçtır ki suyu ab-ı hayat gibidir" ifadesi, sarnıcın hâlâ suyla dolu olduğunu gösterir. 18. yüzyılın sonlarında Hüseyin Ayvansarayi, "…bu caminin altı kafiri kagir yüce mermer somaki direkler üzerine inşa olunmuş büyük bir sarnıçtır ki bir ağzı cami kapısı dışındadır, oradan su çekerler, bu yüzden buraya Soğukkuyu Camii denmiştir" sözleri sarnıçta bu dönemde de su tutulduğunu gösterir. Pantokrator Sarnıcı, 18. yüzyılın sonlarına dek suyla dolu olarak kullanılmış, ancak daha sonra nedeni bilinmeyen bir sebeple kuruduğu, 19. yüzyılın sonlarında P. Forchimer ve J. Strzgowski'nin İstanbul'daki sarnıçlarla ilgili çalışmalarında, üstündeki ev ve konakların atık sularının aktığı ve zeminin çamurla kaplı olduğu belirtilmiştir. 20. yüzyılda sarnıç, limon deposu olarak da kullanılmış ve 1960'lı yıllarda üstündeki bir parsel sahibinin mülkiyet hakkı iddiasıyla açtığı dava ile gündeme gelmiştir [6]. 1922-1945 yıllarında hazırlanan Pervititch haritasında sarnıcın hem üstünde hem de kuzeydoğu yönünde beden duvarına bitişik yapıların varlığı da görülmektedir (Şekil 3) [7].



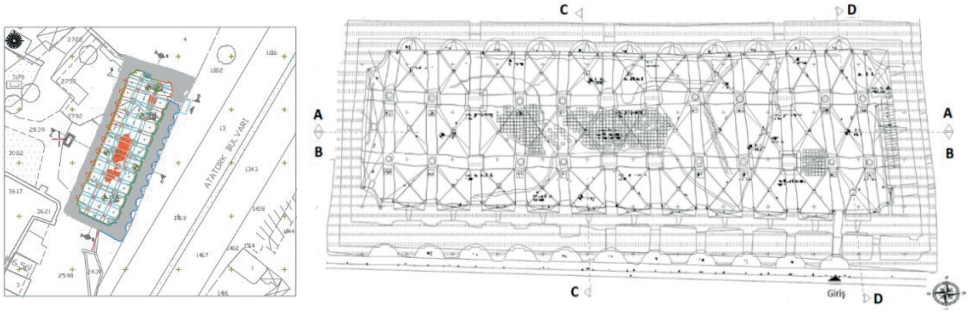
Şekil 3: Pantokrator Manastırı Atatürk Bulvarı'na uzanan sarnıç teras alanı ve sarnıç üstündeki yapılar(3a). (1922-1945) Pervititch harita vaziyet planında sarnıç bitişiğindeki yapılar(3b).

3. Mimari ve Yapısal Özellikleri

Pantokrator Sarnıcı, mimari bakımdan benzerlerinden farklı bir tasarıma sahiptir. Sarnıcın batı kısmı, Zeyrek Mahallesi yönünde, eğimli arazinin

önüne toprağa yaslı istinat duvarı şeklinde, niş formunda yapılmıştır. Doğu kısmı Unkapanı Caddesi'ne bakan taraf olup, toprak üstünde kalmakta ve yine aynı şekilde nişli olarak inşa edilmiştir. Yaklaşık olarak 900 m² iç alana sahip olan sarnıcın, iç hacmi yaklaşık 8348 m³'tür. Kuzeydoğu tarafındaki ilk niş içinde duvar oyularak açılan kapı boşluğu ile sarnıç içine girişi bulunmaktadır (Şekil 4).

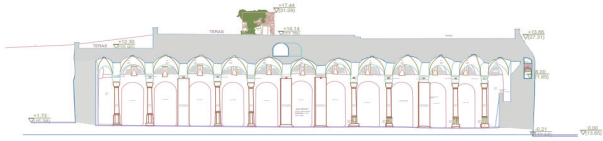
Sarnıç dikdörtgen formda olup 25,90 m ve 60,70 m dış ölçülerine sahiptir. Yapının dış duvar kalınlıkları, doğu-batı yönünde 3,95~4,50 m arasında, kuzey-güney yönünde 2,80~3,25m arasındadır. Yüksekliği, 9,85~10,15 m arasında değişmektedir. Doğu cephe duvarın dış kısmında, aralıkları yaklaşık 4,50m, derinlikleri 1,20~1,35 m arasında değişen payandalara sahiptir.



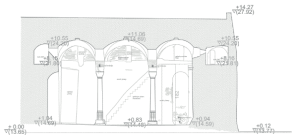
Şekil 4: Sarnıç vaziyet planı(4a) ve zemin kotu planı(4b).

Sarnıç içi plan ölçüleri, kısa kenar doğu-batı yönünde 16,45 m, uzun kenar kuzey-güney yönünde 52,30 m'dir. Yapı, uzun kenar doğrultusunda 2 adet, kısa kenar doğrultusunda 12 adet sütun sırasına sahiptir. Her uzun sırada sekiz olmak üzere, toplam 16 adet mermer sütun bulunmaktadır. Her kısa sırada 4 adet, toplam 8 adet paye bulunmaktadır. Kuzeydoğu tarafındaki ilk niş içinde duvar oyularak açılan kapı boşluğu ile sarnıç içine girişi bulunmaktadır (Şekil 4). Sütunlar 50 cm çapında olup, payeler 1,45 m*1,45 m ölçülerindedir. Payelerden 4 tanesi sarnıç orta kısmında, diğerleri ikişer adet olarak, kuzey-güney yön de iki sıra aks öteleyip, simetrik olarak konumlandırılmıştır. Doğu duvarı ile sütun arası mesafe ortalama 4,30~4,40

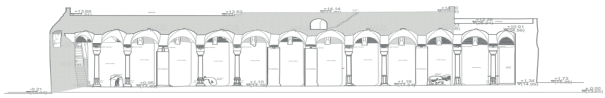
m, orta kısmın sütunlar arası mesafe ortalama 5,40 m, batı duvarı ile sütun arası mesafe ortalama 4,33 m civarındadır. Sütunlar yüksek bir temel üzerine sekizgen kaidelere yerleşmiş ve yükseklikleri 6,80~6,90 m arasında değişmektedir (Şekil 5). Sütunlarda üç farklı tip sütun kaidesi, tüm sütunların üzerinde mermer başlıklar bulunmaktadır. Payelerin, bulundukları yer itibariyle sonradan taşıyıcı sistem gözetilerek, sütunların başlıklarını da içine alarak duvar örülerek genişletildiği anlaşılmaktadır.



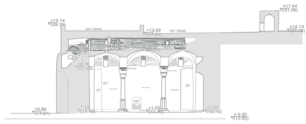
A-A kesiti



D-D kesiti



B-B kesiti



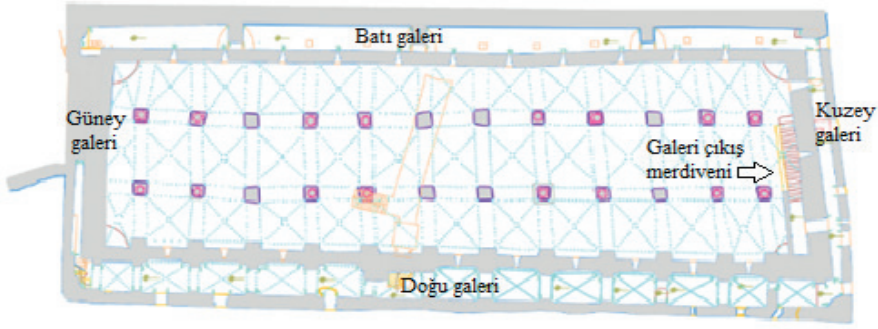
C-C kesiti

Şekil 5: Sarnıç plan kesitleri.

Tüm sütunlar kemerlerle birbirine bağlanmış ve sütun kemer birleşim seviyesinde gergi sistemi oluşturulmuştur. Sarnıç üstü çapraz tonozlarla örtülüdür. Tonoz ölçüleri 4.50 m~6.25 m ile 2.00 m~4.50 m arasında değişken ölçülerle oluşturulmuştur. Tonoz alt yüksekliği ortalama olarak 9,70m, gergi seviyesi yükseklik 6,80~6,90 m arasında değişmektedir. Tonozların orta kısımlarında 25*25 cm boyutlarında özgün boşluklar mevcuttur. Yapı malzemesi olarak kullanılan tuğla genel olarak, 34~35 cm kenar uzunluğunda ve 3,5~4 cm kalınlığında olup, aralardaki derzle3,5~6 cm ölçülerinde kalınlıklara sahiptir.

Doğu duvarı iç kısmında, 12 kemerli niş bulunmaktadır. Kuzeydoğu kısmındaki bir niş sonraki dönemlerde örülerek kapatılmıştır. Batı duvarı iç kısmında, 11 yarım daire şeklinde niş bulunmaktadır. Güney iç duvarda her-

hangi bir niş yoktur. Yapının iç duvarlarında tüm cepheler, zeminden 7.50 m. yüksekliğe kadar kireç harçlı sıva ile kaplıdır. Bu yükseklik sonrasında başlayan kemerlerin içi tuğla duvar ile örülüdür. Kuzey duvarına bitişik dar bir merdiven ile tonoz seviyesinde bulunan, iç mekanı çepeçevre saran galerilere çıkış sağlanıyor *(Şekil 6)*. Merdivenin çıktığı kısım kuzey cephe ve en dar galerinin bulunduğu kısımdır. Kuzey galeriden batı galeriye geçiş dar bir koridordan sağlanmaktadır. Kuzey ve batı galeri üst örtüsü yarım tonoz şeklindedir. Batı galerisi kuzey cepheye göre daha geniştir. Doğu cephesindeki galeri diğerlerine göre farklı, daha geniş olmakla birlikte kemerlerle bölünen dört kısımdan oluşuyor. Kemer arası geçişler 60 cm genişliğinde olup, bölümler arası geçiş buralardan sağlanıyor. Kemerler üzerine oturtulmuş üst örtü sistemi çapraz tonozdur. Doğu galerinin güney cepheye ulaşan kısmında galerinin sonlandığı ve devamında herhangi bir galeri uzantısı var olduğu belgelenememiştir. Galerilerde niş içlerinde iç mekan yönünde çepeçevre devam eden 25x60 cm ölçülerinde özgün açıklıklar olup, buralardan sarnıç iç mekanı görülebilmektedir.



Şekil 6: Sarnıç galeri kotu planı.

Sarnıcın galeri kotunda, doğu cephe galeri dış cepheye bakan duvarlarında irili ufaklı, yapının özgününde bulunmayan, pek çok boşluk bulunmaktadır. Yine doğu galerinin orta kısmında galeri kotundan sarnıç üst teras kotuna ulaşımı sağlayan basamaklar mevcuttur. Teras kotuna çıkış merdiven ve koridorunun üst örtüsü tuğla tonozlu olarak yapılmıştır.

Sarnıç zemin kaplamasının büyük bölümü bozulmuş, çoğu kısmı da yerinde bulunmamaktadır. Kaplamaların küçük bir bölümü, üstünün toprak ile kaplı olması nedeniyle korunabilmiştir. Bu kısımlardan 32x32 cm ölçülerinde pişmiş tuğla ölçülerine ulaşılmıştır. Sarnıç iç kısmında, dış duvarlarının zeminle birleştiği noktalarda, su hacminin baskısını hafifletmek için yapıldığı düşünülen yuvarlatılmış sıvalı duvar yüzeyleri mevcuttur.

4. Sarnıçta Yapılan Onarım ve Güçlendirme Çalışmaları

Pantokrator Sarnıcı restorasyon aşamaları, 2863 sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu'na göre alınan resmi kararlar, raporlar, belgeler ışığında ve yine ilgili kurumların onayladığı rölöve, restitüsyon, restorasyon, yapısal onarım projeleri ve raporları içeriğindeki koruma yöntemleri ve kararları ile yürütülmüştür. Tüm çalışmaların öncelikli amacı, minimum ölçüde müdahale ile yapının özgün niteliklerinin korunması ve yaşatılmasıdır.

Yapının onarım sürecinde, yapılan kapsamlı alan çalışmasında; bozulmalara dair mekanizmaları doğru tespit etmek, doğru çözümleri bulmak için, mimari ve yapısal durumu detaylı olarak analiz edildi. Mevcut durum belgeleme çalışması sonrasında sarnıç dışı, içi, ana mekan ve galerilerde hasar tanımlamaları yapıldı. Korumaya yönelik müdahaleler; muhdes eklentilerin uzaklaştırılması, projelendirme aşamasında girilemeyen iç galeri alanlarındaki dolgunun boşaltılması, sağlamlaştırma, güçlendirme, bütünleme ve temizlik olarak gerçekleştirildi.

1.1. Sarnıç Dış Cephe Uygulamaları

Kent ölçeğinde endüstriyel dönüşüm ve nüfus büyümesi, hava kirliliğindeki artışı hızlandırarak, tarihi yapılardaki cephelerde bozulma sürecinde etken oldu. Yapı önündeki Atatürk Bulvarı'ndaki yoğun trafik akışı, cephe duvarların dış kısmında yüzey kirliliği oluşturdu. (Şekil 10b). Yapının kullanım dışı ve bakımsız kalması, cephelerin tümünde geniş alanları kaplayan bitkiler ve ağaç köklerinin büyüyüp, yayılmasına neden oldu. Derz boşluklarından

duvar içinde doğru ilerleyen köklenmeler ve yüzeyde yayılmalar sonucunda, biyolojik bozulmalar ile birlikte, duvarda çatlakların oluşmuştur.(Şekil 10a).

Koruma çalışmaları kapsamında, bitkiler ve oluşturduğu problemler, cephelerde öncelikli ilgilenilmesi gerek konu olmuştur. Uzun yıllar büyüyerek birbiriyle iç içe geçmiş bitkilerin, duvar yüzeylerinde analiz ve inceleme çalışmaları yapıldı. Mevcut hasarların konumu, alandaki yerleşimi belirlenerek, elde edilen veriler doğrultusunda, gerekli müdahale yöntemleri belirlenerek uygulandı. Çoğunlukla sarmaşık türü olan bitkiler, cepheden dikkatli bir şekilde uzaklaştırıldı. Özellikle kuzey cephede, sağ üst kısımda yer alan ağaç ve kök oluşumlarının olumsuz etkilerini engellemek için, yapının konsolidasyonu sağlanarak, ağaç türüne uygun çözelti ile uygun mevsim şartlarında kök kurutma işlemi gerçekleştirildi.

Bitki temizliği sonrası cephelerde, düşük basınçta mikro kumlama tekniği ile duvar yüzeylerinde aşınma oluşmayacak şekilde cephelerde tabakalaşan kirlerin azaltılması sağlandı. Malzeme yüzey patinasına yapışan kısımlarda, yüzey hasarı oluşmaması için herhangi bir müdahale yapılmadı (Şekil 7c, 7d). Dış cephelerin genelinde, tuğlaların zaman içinde aşınma, bozulma veya kopma sonucu oluşan kısmı malzeme kayıpları görülmektedir. Oluşan bu malzeme kayıpları ile ilgili, yapısal bir problem içermemesi nedeniyle özgün tuğla yüzeylerde herhangi bir çürütme veya tamamlama işlemi uygulanmadı.



Şekil 7: Sarnıç cephelerdeki bitki ve yüzey kirliliği (a)(b), Yüzeyde oluşan bitki ve kir tabakaları temizilik sonrası (c),(d).

Cephelerde süreç içerisinde açılıp, çeşitli malzemelerle örülüp kapatılan boşluklardaki niteliksiz duvar ekleri, yapıya zarar verilmeden uzaklaştırıldı (Şekil 8a, 8b). Dış cephede, moloz ve toprak karışımı dolgu ile kapalı olan kısımlar, niteliksiz dolgulardan temizlenerek cephe detayları ortaya çıkarıldı (Şekil 8c). Sarnıcın Atatürk Bulvarı'na paralel olan doğu cephesinde, zemin kotuna girişi sağlayan açıklık, restorasyon projesinde iç alana giriş olarak tanımlanmış, demontaj olan cam konstrüksiyon sistemle de sarnıç girişinin güvenliği sağlandı (Şekil 8d, 8e).



Şekil 8: Sarnıç cephesindeki niteliksiz dolgular ve Atatürk Bulvarı kotundan sarnıç girişi (8a,8b,8c,8d,8e).

1.2. Sarnıç İçindeki Uygulamalar

1.1.1 Üst tonoz Örtüleri

Yapının süreç içerisinde üst tonoz örtülerinde, kireç harçlı derzlerinde zamanla aşınmalar ve derz kayıpları oluştu. Meydana gelen bu bozulmalarda, sarnıç içerisinde limon ve muz sarartma işlemi için kullanılan gazların neden olduğu fiziksel ve kimyasal bozulmalar en önemli neden olarak söylenebilir. Duvar örgüsünde zayıflayan tuğla-harç ilişkisi, bağlayıcılık özelliğini kaybetmiş harcın yenilenmesi ile sağlandı. Uygulama aşamasındaki belgeleme çalışmalarında özgün numunelerin laboratuvar analizleri doğrultusunda raporlanan, malzeme karakterizasyonuna uyumlu onarım harç karışımı ile hasarlı derz ve sıvaların onarımı yapıldı. Gereksiz derz boşaltma ve onarımından kaçınıldı (Şekil 9).



Şekil 9: Üst tonoz örtülerinde zayıflayan tuğla harç ilişkisinde bağlayıcılık özelliğini kaybetmiş derz harcın yenilenmesi.

1.1.2 Sarnıç İçi Duvar

Sarnıç iç kısmında genel olarak sıvalı yüzeyler iyi durumda olup, kısmi çatlaklar ve sıva dökülmeleri ile yüzey kirliliği oldukça büyük alana yayılmış durumdaydı. Sarnıcın Atatürk Bulvarı tarafındaki doğu cephesi, kuzey kısımdaki niş boşluğunda, dönem eki olan ve nişi dolduran duvar (Şekil 10a), önceki dönemlerde mevcut kısımdaki hasarın varlığını belgelemektedir. Mevcut bölgede sarnıç kısımda kılcal çatlaklar yapılan detaylı analiz çalışmasında tespit edilmiştir.

Kılcal çatlakların onarımında, özgün harç niteliğine uygun raporlanan enjeksiyon harç karışımı ile duvar çatlağının güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Tespit edilen kılcal çatlaklara uygulanacak enjeksiyon için çatlak yüzeyinde müdahale noktaları tespit edildikten sonra (Şekil 13b, 13c) yüzey hazırlanarak, enjeksiyon işlemi uygulandı.



Şekil 10: Sarnıç doğu cephesi kılcal çatlaklar enjeksiyon uygulamaları (a), (b),(c).

Sarnıcın iç hacimde, duvarlarda tuğla kayıpları ve aşınmaların meydana gelen kısımlarda, tespit edilebilen çatlak hattı doğrultularında, dikiş tekniği uygulayarak, özgününe uyumlu raporlanan harç ve malzemeler ile duvar tamamlama ve iç boşluklara enjeksiyon uygulaması ile güçlendirme yapıldı (Şekil 11).



Şekil 11: Sarnıç doğu galeri iç duvarlarında onarım.

1.3. Mermer Sütunlarda Yüzey Temizliği

Sarnıç içi ana haznede bulunan mermer sütunlarda süreç içerisinde sarnıcın farklı fonksiyonlarda kullanımından kaynaklanan islenme, kirlenmelerin yanında, su sızıntıları sonucu renk değişimleri meydana gelmiştir.

Mermer sütunlardaki yüzey kirliliğinde, öncelikle plastik fırça ve düşük basınçlı saf su ile itinalı yüzey temizliği uygulaması yapıldı. Ağır kir tabakasının uzaklaştırılamadığı yüzeylerde, kimyasal temizlik yöntemleri uygulandı. Aynı yöntem mermer sütun kaideleri ve başlıklarında yüzey kirliliğinin giderilmesinde uygulandı. Mermer sütun ve sütun başlıklarında malzeme kayıpları ciddi boyutta olmaması nedeniyle herhangi bir tamamlama yapılmadı (Şekil 12a).

1.4. Sütunlar Arası Ahşap Gergi Sistemi Uygulaması

Kemerlerin sütun başlıkları ile birleştiği noktalarda, tüm sütunları birbirine bağlayarak oluşturulan ahşap gergi boşluları bulunuyordu. Bu boşluklarda

gergi sistemine dair ahşap kalıntılar tespit edildi. Kubbelerin ve kemerlerin stabilitesini arttıran, yapı sistemini birbirine bağlanmasını sağlayan gergi sistemi, ahşap elemanlar ile oluşturuldu (Şekil 12b). Gergi sisteminin oluşturulmasında paslanmaz çelik bağlantı elemanları kullanıldı (Şekil 12c).



Şekil 12: Sütunlarda yüzey temizliği (12a), sütunlar arası ahşap gergi sisteminin oluşturulması (12b)(12c).

1.5. Zemin Kaplama Uygulamaları

Galeri iç zemini, su dip kotu olması nedeniyle, zaman içerisinde biriken toprak dolgu ile zemin kaplamaları üstü örtülü durumdaydı(Şekil 13a). Biriken toprak ve balçık tabakalarında yapılan araştırmalar sonucunda, özgün zemin kotları tespiti ve sonrasında kontrollü olarak malzemenin yüzeyden temizlenmesi sağlandı.

Yüzey temizliği sonrasında zeminde sınırlı sayıda özgün pişmiş toprak kaplamalar tespit edildi. Toprak karolarının temizliği yapılarak yerinde korundu. Zeminden ayrılmış durumda olanlar numaralandırılıp, zemin toprağı sıkıştırılıp uygun hale getirilerek tekrar bulunduğu yere yerleştirildi (Şekil 13c).

Yeni kullanım gereği yapılacak olan işlevlendirmede, orijinal zemin ile ilişkisi kesilmeden, demonte ayaklar üzerine ahşap konstrüksiyon üstünde şeffaf, temperli cam döşeme kaplaması oluşturuldu. Özgün zemin dokusunun, cam döşeme ile daha iyi algılanabilmesi sağlandı (Şekil 13c). Galeri kotunda doğu, kuzey ve batı cephelerde özgün zemin üzerine demonte mesnetler ile yerleştirilen ahşap döşeme uygulaması yapıldı (Şekil 13d). Yüzeye sızan suların drenajı mevcutta var olan su akış güzergâhları ile sağlandı.



Şekil 13: Sarnıç içi zemin kotu balçık temizliği ve cam, ahşap döşeme uygulaması(a) ,(b), (c), (d).

1.6. Araştırma ve Arkeolojik Kazı Çalışmaları

Sarnıç üst galeri kotunda, projelendirme çalışmalarında girilemeyen toprakla dolu bölümler mevcuttu (Şekil 14a). Yapının güneybatısında, galeri kotundan önceki dönemlerde bilinçsizce geçirilen atık su borusu, galeri duvarında hasara neden oldu. Aktif boru hattında oluşan çatlaklardan akış halindeki su ile birlikte balçık ve toprak, galerilerin içine doldu (Şekil 14a,14c). Araştırma kazılarında, galeri kısımlarında ulaşılamayan bölümlerdeki toprakla dolu alanlar boşaltıldı. Atık su boru hatları deplase edildi.



Şekil 14: Doğu (14a, 14b) ve batı(14c, 14d) galerilerinde moloz temizliği öncesi ve temizlik sonrası durum.

Galerilerde ve sarnıç üst alanında yapılan araştırma ve arkeolojik kazılar sonucunda, alanda sarnıca ait önemli mimari detaylar tespit edildi. Galeri kotundan teras kotuna ulaşılan özgün tonozlu bir geçit ve merdivenlerine ulaşıldı.

Sarnıç üst teras kotunda raporlanan araştırma ve arkeolojik kazı çalışmaları kapsamında, mevcut olan niteliksiz çöp dolgu ve moloz temizliği sonrasın-

da, sarnıcın özgün girişine ait çökmüş üst tonoz örtüsü, açığa çıkarıldı. Özgün giriş tekrar mevcut formunda ve özgün malzemesi ile oluşturuldu (Şekil 15a, 15b). Kuzey, doğu ve batı galerilerde eksik tuğla tümlemeleri yapıldı . Yapının ortaya çıkarılan özgün girişi, merdivenli tonozlu geçiş ile üst kota bağlantısı korunarak, üst kota çıkan kısımda demontaj bir örtücü hazne ile izolasyonu sağlandı. Giriş noktasında, özgün plan şemasını yaşatılarak, galeriden algılanması sağlanmıştır.



Şekil 15 Sarnıç güney galeri kısmından üst teras kotuna çıkılan özgün sarnıç girişi (15a, 15b, 15c, 15d).

4. Sonuç

Yüzyıllarca sarnıç olarak kullanılan ve bu amaç için tasarlanmış olan, 12. yüzyıldan günümüze özgünlüğünü büyük ölçüde koruyarak ulaşan yapının restorasyon çalışmaları kapsamında, ülkemizde korunması gerekli kültür varlıklarına dair koruma koşullarını belirleyen temel mevzuat ve bununla bütünleşen yönetmelikler ve ilke kararları doğrultusunda yapılan müdahalelerdeki hassas yaklaşımlar, yapısal bütünlüklerin korunması, temel ilke olarak benimsenmiştir. Korunmaya yönelik kararların alınması, hasarların teşhis ve müdahale tekniklerinin belirlenmesi ve yapı güvenlik değerlendirmesinde disiplinler arası çalışma ile gerçekleştirilmiştir.

Koruma çalışmalarında temel amaç; yapının özgün niteliklerini bozmadan, belge değerini koruyarak geleceğe güvenle aktarılmasının sağlanmasıdır. Bu bağlamda, Pantokrator Sarnıcı'nın çalışmalar kapsamında, bütünsel olarak korunması ve özgün dokusunu tehdit eden etkenlerin uzaklaştırılması sağlanmıştır. Yapılan analiz ve teşhis sonuçlarıyla, bilimsel ilkeler doğrul-

tusunda gerçekleştirilen koruma ve onarım çalışmalarıyla, yapının gelecek kuşaklara aktarılabilmesi amaçlanmıştır.

Değerlendirme

Son yıllarda, 2863 sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanununda Değişiklik Yapılması Hakkında Kanununun 12. Maddesinde; "…emlak vergisinin %10'u nispetinde Taşınmaz Varlıklarının Korunmasına Katkı Payı tahakkuk ettirilir ve ilgili belediye tarafından emlak vergisi ile birlikte tahsil edilir." İfadesi ile tarihi yapıların bakım, onarım ve sağlamlaştırma işlerinde ekonomik anlamda önemli derecede katkı sağlanmaktadır. Pantokrator Sarnıcı restorasyonu, söz konusu kanun maddesine istinaden, İstanbul Valiliği, Fatih Belediyesi, Kültür Bakanlığı ve Vakıflar Genel Müdürlüğü iş birliğiyle gerçekleştirilmiştir.

Tarihi yapılarda, zaman içerisinde yapısal bozulmalar, çürümeler ve malzemelerin eskimesi durumu kaçınılmazdır. Bu bağlamda, yapının sürdürülebilirliğinin çevresel faktörler, yanlış kullanım vb. etkilere karşı sağlanması, yeniden bozulma sürecine girmesinin önlenmesi, süreç içinde bakım-onarım çalışmalarının yapılası gerekmektedir.

Venedik Tüzüğü'nün 5. maddesi uyarınca, anıtların korunmasının, onları herhangi bir faydalı toplumsal amaç için kullanarak kolaylaştırılabildiği ve bu tür bir kullanımın teşvik edildiği belirtilmiştir. Sarnıcın günümüzde aynı işlevde kullanılması mümkün değildir. Mevcut özgün fonksiyonunda işlevlendirilemez ise de yapının iklimi ve mimarı yapısı, yapının mekânsal bütünlüğünü ve özgün detaylarını bozmadan işlevsel hale getirilmesi, korunması için önemli bir unsurdur. Döneminin önemli yapıları arasında olması nedeniyle, yapının özgün işlevinin gereği tüm özelliklerini yansıtarak yaşatılması, bununla birlikte Dünya Kültür Miras'ının bir parçası olarak belirlenen işlevinin aktif edilerek eserin korunması gerekir.

Kaynaklar

[1] Uğuryol, D, Uğuryol, M., Negatıve Effects Of The Growth And Transformatıon Problems Of Istanbul On Hıstorıcal Water Structures, Volume:21, Issue:81, ‚January 2022.

[2] Güngör, S.S., Tarihi Yarımada'daki Roma Ve Bizans Dönemi Sarnıçları, Stratejik Ve Sosyal Araştırmalar Derigisi, Volume 1 Issue 2, November 2017.

[3] Ward, K. A., Crapper, M., Altuğand K.,Crow, J The Byzantine cisterns of Constantinople, Water Science and Technology: Water Supply, Vol.17 (6), 1499-1506, 2017.

[4] Ward, K. A., Crapper, M., Altuğand K., Crow, J., The Byzantine cisterns of Constantinople, Water-supply infrastructure of Byzantine Constantinople, Journal of Roman Archaeology, Volume 30, 175-195, 2017.

[5] Karaman, A.; Önal, Ş. "Zeyrek", Dünden Bugüne İstanbul Ansiklopedisi, cilt 7, İstanbul, 553-554, 1994.

[6] Eyice, S., "Pantokrator Sarnıçları", Dünden Bugüne İstanbul Ansiklopedisi, cilt 6, İstanbul, 218, 1994,

[7] Pervititch Haritası(1922-1945), https://kentrehberi.fatih.bel.tr/webgis, Erişim tarihi: 14.06.2024.

RETROFITTING IN TRADITIONAL GERMAN MASONRY HOUSES

Fevzi Saritas[1], Idris Bedirhanoglu[2]

[1]Dr., Darmstadt Technical university, saritasfe@itu.edu.tr
[2]Prof.Dr., Idris Bedirhanoglu, University of Oxford-Dicle University, idris.bedirhanoglu@eng.ox.ac.uk

Abstract

This paper presents, basic characteristics of historical German masonry houses and supporting practises againest vertical static loads were studied. For this purpose, two masonry houses located in Frankfurt region were evaluated in detail and three typical examples with monumental protection were presented in terms of damage types. The main load-bearing elements were investigated and load transfer mechanism between the elements was investigated. Traditional stone, brick and timber materials are used in the buildings. Straw fibers and lime-reinforced with clay-mold are used as a binding material. To preserve the originallity of the structure, demountable steel profile and wood systems should be preferred. From the studies conducted, it was determined that old buildings suffered great losses in material strength and sizes of cross-sections due to time-dependent environmental effects. In addition, large displacements, dislocations and rotations occurred in the load-bearing system elements, which disrupted the stability of the building. In order to overcome the problems that arise over time in historical buildings, alternative retrofitting suggestions are presented to improve the load-bearing system.

KeyWords: German buildings, Masonry houses, Monumental, Steel beam retrofitting, Timber-frame

Özet

Bu çalışmada, düşey statik yükler etkisindeki Alman yığma evlerinin temel özellikleri ve güçlendirme uygulamaları incelenmiştir. Bu amaçla Frankfurt bölgesinde bulunan iki yığma ev ayrıntılı olarak değerlendirilmiş ve anıtsal eser korumasına sahip üç tipik yapı, örnek hasar türleri açısından sunulmuştur. Ana yük taşıyıcı elemanlar ile bu elemanlar arasındaki yük aktarım mekanizması incelenmiştir. Yapılarda geleneksel taş, tuğla ve ahşap malzemeler kullanılmıştır. Bağlayıcı malzeme olarak saman lifleri ve kil kalıpla güçlendirilmiş kireç kullanılmıştır. Yapının özgünlüğünü korumak için sökülebilir çelik profil ve ahşap sistemler tercih edilmelidir. Yapılan incelemelerden, eski yapıların zamana bağlı çevresel etkiler nedeniyle malzeme dayanımlarında büyük kayıplara uğradığı belirlenmiştir. Ayrıca taşıyıcı sistem elemanlarında büyük yer değiştirmeler, yerinden çıkmalar ve dönmeler meydana gelmiş, bu da yapının stabilitesini bozmuştur. Tarihi yapılarda zamanla ortaya çıkan sorunların üstesinden gelmek için yük taşıyıcı sistemi iyileştirmek amacıyla alternatif güçlendirme önerileri sunulmuştur.

1. Introduction And Old Masonry Houses In Germany

Fachwerk timber-framed buildings with their deep inclined roofs and dark wooden beams is a style quite typical German houses at the late medieval period and also date back to the 12th century. When the Roman Empire expanded over much of the todays Germany left remnants of the Roman Empire from around 100–150 AD. In addition to border fortifications such as forts and military camps, the Romans also built thermae, bridges, and amphitheatres.

German cities do not have only a specific type of architecture. One can list a variety of architecture such as low German houses where an example found in northern Germany and high German houses common in central Germany. Historic german cities such as Berlin, Munich and Cologne presents the enti-

re timeline of German architectural trends from the pre-medieval Carolingian to Medieval Romanesque, Gothic, Renaissance, Baroque and later neo-classical and neo-renaissance eras. There are quite a few regional differences if you examine the architecture across the country and the Brick Gothic style can also be find which is also common architectural style in all over the Europe [1]. In the 20th century, single-family houses in Germany became affordable for middle- and working-class households [2]. In the early 20th century the concept of *Mein Eigenheim* gained popularity and this theme presents a sample illustration of the concept of *Mein Eigenheim,* which can be translated as 'My own home', developed by the founder of the journal's association [3]. Furthermore, retrofitting the facades of half-timbered buildings using modern insulation materials was also evaluated in terms of advantages and disadvantages. In Kasper's study, it was discussed whether the use of these materials was practical or dangerous in terms of material [4]

The following items summarize the main characteristics of old German buildings:

1.Building materials prior to the second world war, brick walls and wood were generally used as building materials. Concrete and steel bars were more commonly used after the war.

2. In old buildings, héng frame structure were often used during construction, and the most typical example of half-timber structures was the "wooden house".
3. The old houses, whose interiors date from the reign of Emperor Wilhelm II, have double-flat windows and much higher ceilings than the average modern house, usually between 3 and 4.5 meter high.

4. Interior decoration in most well-preserved old houses, there were also inlaid solid wood floors and carved wooden doors, and some old houses had the fireplaces that still be used today [5].

The stability verification is carried out on the basis of the selected structure and dimensions. The aim is to predict the load and stress of the structure throughout its entire anticipated service life and to maintain a certain level of safety [6].

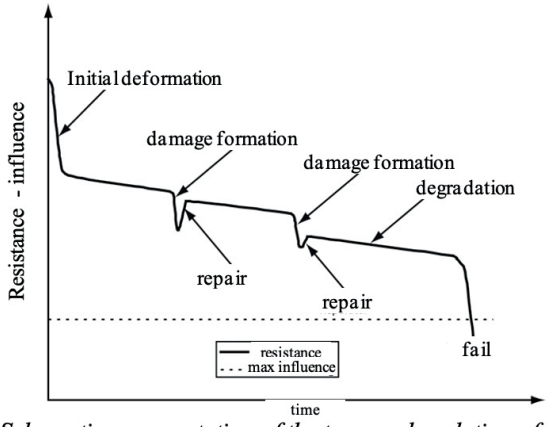


Figure 1. Schematic representation of the temporal evolution of the resistance of a historical building

Every historical structure has a long history of load transfer. The deviations from the expected standard situation that we observe today may have various of causes and origins. The temporal evolution of the deformations of a historical structure, begins with a generally significant initial deformation as given in Figure 1 [6].

Historical structures are less rigid than modern historical materials. Lime mortar hardens slowly, cement mortar hardens comparatively almost immediately. As the service life of a historical structure progresses, individual damage events often occur that have cause a sudden increase in the deformations. Water has may penetrated at times, extensions, additions or removal of supporting components caused sudden increases or changes in load levels and increased localized stresses.

3. Investigated Projects Of Traditonal German Buildings

In this section two typical old houses are examined in detail and a summary of each project is provided here. In addition, summary information about typical historical buildings with monument protection is presented. Basic information of the buildings, structural defeciencies, architectural and structural design projects and renovation methods are discussed from a structural engineering perspective.

3.1 BUILDING-1:

This project belongs to an old building constructed in 1860s, consisting of two stories plus loft and basement (with wall-1m wide on the outer edges). The current appearance of the buildings and damaged parts are presented in Figure 1. Existing architectural plans are showed in Figure 2. The structural materials used in the structural members were observed during the site visit. As can be seen in Figure 1, the basement floor was built with one-meter-thick masonry stone walls. The first floor was also constructed with 50 cm thick masonry stone walls. A vault shaped floor was constructed to support basement floor. The vault was also built with irregularly shaped stones. The first floor was constructed in a different period after the construction of basement and ground floor. Clay bricks were used in the walls of this floor.

The quality of stone layering seems to be poor in the basement and first floor. The joints between the stones are quite wide and most of the joints are empty due to the deterioration of the mortar. The quality of brick layering of the first floor is much higher than other floors constructed with stones. It was also observed that large spaces were filled by mortar where the mortar deteriorate and left large gaps behind.

The damage to the building was also surveyed and noted. As seen in Figure 1, there is deterioration both in facades and internal structural elements.

Disaggregation, settlement in foundation, weak connections at the joints of wall to wall or wall to slab were observed.

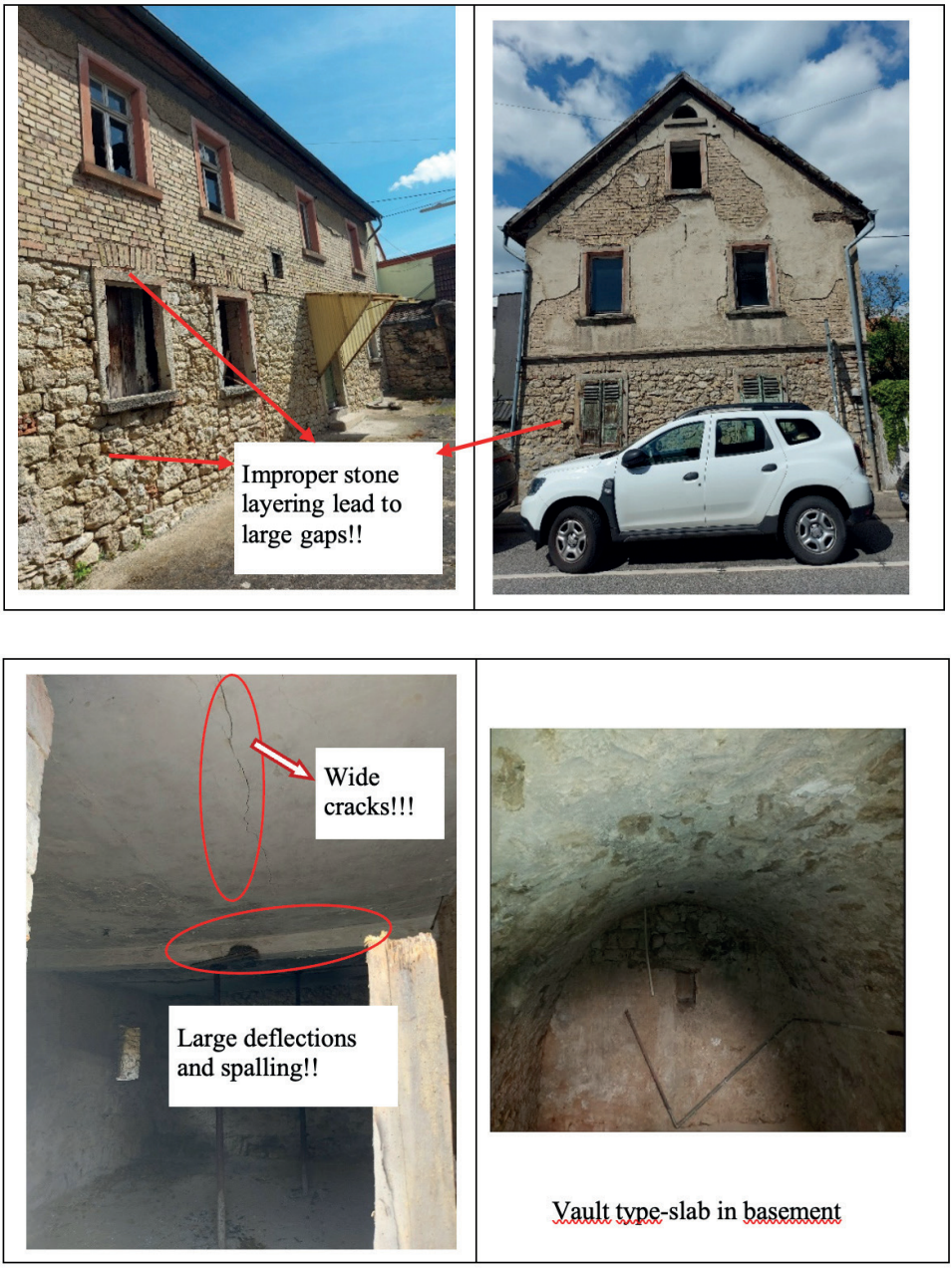


Figure 2. Photos of the Building-1

As build architectural plans are seen in Figure 3 and it shows the floor plans and vertical section cut. As seen, the building consists of three floors and plan dimensions of the building are 6.80x10.50 m. The total height of the building is 9.88m over the ground but the basement floor has about 3.0m height.

Figure 3 and 4 show the retrofitting application. Basically, the vault in the basement was retrofitted to remove the vertical forces acting on the vault slab system. Hereby, the forces from upper floors would be directly transferred to the load bearing-walls at exterior edges. For this purpose, a steel beam having HEM 340 profile (Figure 5) was designed to meet the specified demand forces. Furthermore, ring anchor beams extending along the entire perimeter were designed to safely provide horizontal rigidity. The anchor beam has 30x30cm sizes and the top and bottom rebars are; $A_{s,top}=A_{s,bot}=3Ø12$. As for the shear forces, Q257 steel mesh constructed by reinforcing steel welded bars in planar form was used. Lastly, new RC columns and bearing walls and single foundations were also designed to reduce the pressure on the existing vertical bearing elements.

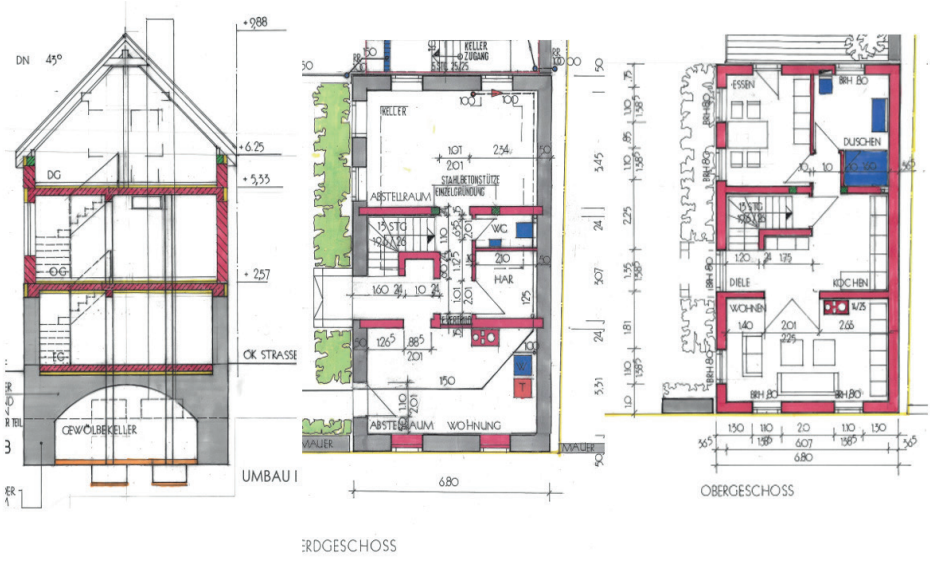


Fig. 3. Existing architectural plans

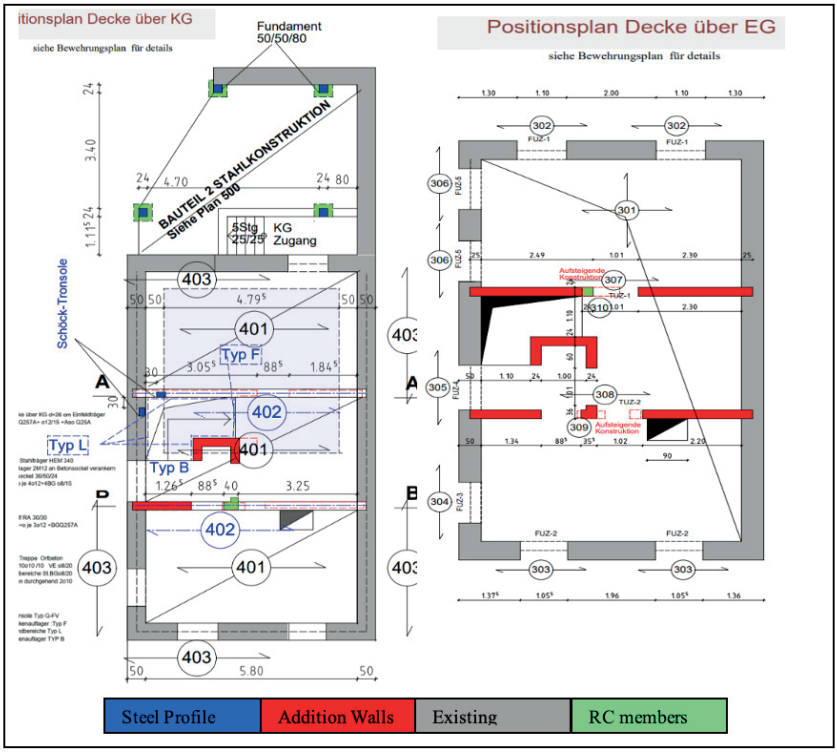


Fig. 4. Retrofitting Plans

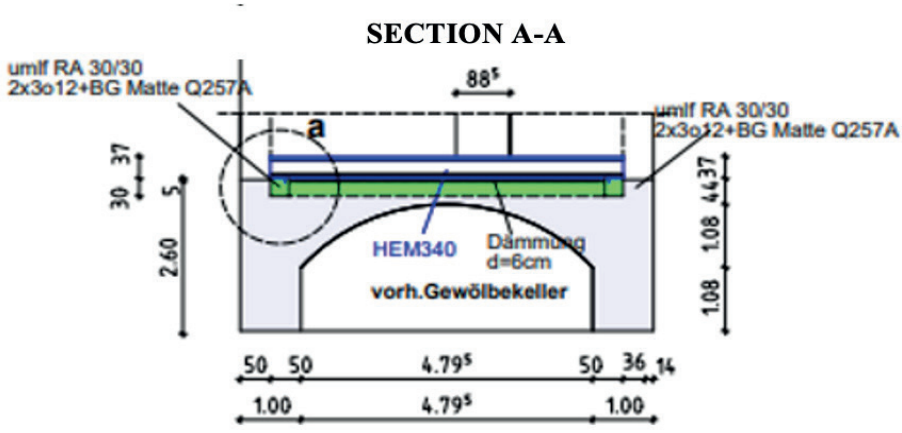


Figure 5. Cross-section view of the vault slab system in the basement of the building

3.2 Building 2

This building system has two normal floors, as well as a basement and loft floor (Figure 6). The load-bearing system elements consist of brick walls, wood and partially reinforced concrete members (added much later). While the plan dimensions of the existing building are 8.7x9.4m, the dimensions of the other newly added reinforced concrete region are 4.45x10.1m.

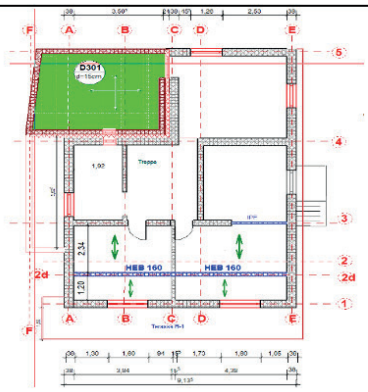
The strengthening process (Figure 7). and extension of the building include the following elements; new RC/Steel beams, timber slabs replaced by RC slabs and adding strip RC foundation and addition of new roof floor. Initially, only 2 floors of the building were available for use. After the necessary strengthening and changes on the structural system, four floors of the building were modified to be ready to use thanks to the newly opened areas. HEB200 steel profiles were designed to carry the loads across a span of 4.2m in the x direction and across a span of 4.1m in the y direction. The soil bearing capacity was considered to be 200 kN/m^2 for design. However, from the analyses, it was determined that the soil stress is 230 kN/m^2 in the foundation of the structure where this stress exceeded the design value. Therefore, instead of using soil improvement methods, reinforced concrete strip foundations were built along the load-bearing walls.

The strength of the masonry structures is related to the strength of the block members and mortars in the wall. The bond/adhesion effects are not very strong between stone and mortars. They are quite weak against the horizontal loadings. Because in a possible earthquake, the structure can only resist horizontal forces with its weight and wall strength. The seismic behavior is complex and mathematical modelling of masonry structural systems is still not easy and there is no practical method available. On the other hand, since these structures are constructed by brittle material, they do not present ductile behavior. Damping ratios are quite low i.e. far away from RC structures. Generally, these structures have a lower number of floors and low period values. However, spectral values corresponding to low period zones are dominant for masonry building.

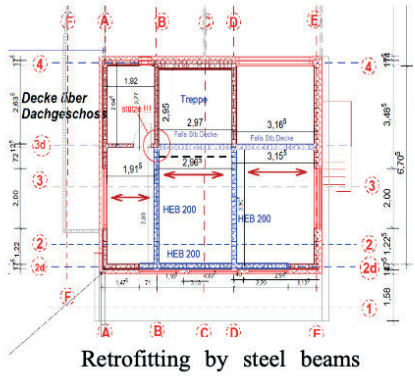
The region where the examined building is located has the least seismic activity. Therefore, seismic analyses were not carried out considering earthquake loads. There are many masonry building stocks, especially in the European continent. Examining of them for earthquake safety is a vital issue. In fact, there are many aspects of old structures that are vulnerable to earthquake effects. Material strengths could decrease to much lower levels with respect to the anticipated design value. Because these structures would be sensitive to earthquake effects due to both the material wear off/fatigue over time and the inadequate construction techniques. In addition, damage accumulated in the structure over time indicates a greater danger in a possible earthquake.

As it is known, masonry structures are in a critical situation due to their weak shear capacity. Thus, high lateral displacement values leading to the collapse of the wall can occur even in case of moderate acceleration amplitudes. In order to increase the horizontal rigidity of the structure, frame systems should be installed by reinforcing with reinforced concrete or steel elements. Thus, horizontal forces would be properly transferred from one member to the other members.

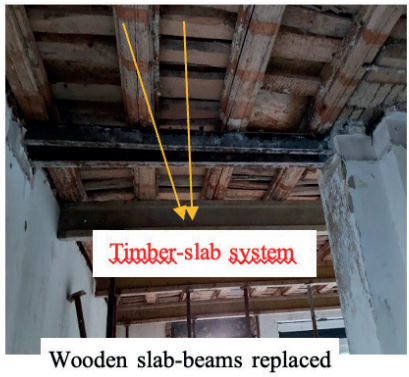




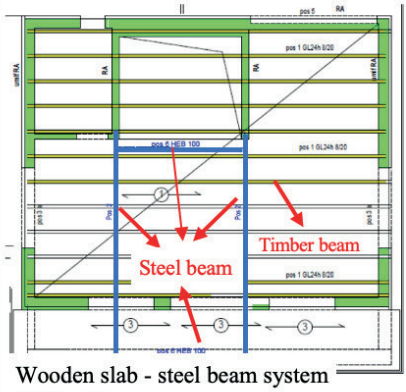
Retroffing plan for second floor



Retrofitting by steel beams and RC slabs for roof floor



Wooden slab-beams replaced bv RC slabs



Wooden slab - steel beam system +RC walls



Fig. 6. Photos of the Building-2



Fig. 7. Strengthening of Building-2

Typical Examples:

In this section sample structures of different structural systems which structurally have been surveyed are given with short information to provide a basic understanding to the readers.

a. *Timber frame/slab structure having Monument protection*

Building given in Figure 8 has severe damage due to aging and environmental effects. Environmental damage was caused by harmful Organisms and Pests. Moisture and Fungus problems had important influences on the deterioration of timber structure. Apart from this, cross-section losses triggered by fire effects as well.



Figure 8. Photos of an old building with timber frame and slab system

b. Multistorey buildings with timber-stone building with Monument protection

Building has severe damage due to aging and environmental effects. The structure is presented in Figure 9. Environmental damage was caused by harmful Organisms and Pests. Moisture and Fungus Problems have important influences on the durability of timber structure. Apart from large cracks in timber columns and beams, regional separations were observed in the walls.



Fig. 9. Photos of an old multistorey building (timber frame and slab system)

c. Multistorey building with timber-stone elements (Monumental protection)

Roof system and floors require to be supported by a proper retrofitting application. The structural system is given in Figure10. Since there is monumental protection in thebuilding, new construction of the roof system and floor was not allowed. However, it could be strengthened by adding new timber members in accordance with its original texture.



Fig. 10. Photos of an old multistorey building (bricks- timber frame and slab system)

4. Conclusions

In this study, both the load-bearing system and the retrofitting concepts of typical buildings in Germany are investigated to provide an impression about historical buildings in Europe. For this purpose, two old buildings are presented in detail and three buildings with monumental protection are also presented as typical examples. From this study, it was determined that the old buildings suffered great losses in material strength and cross-sectional dimensions due to time-dependent environmental effects. In addition, large displacements, dislocations and rotations occurred in the load-bearing elements of the structural system, which disrupted the stability of the building.

The damage occurred in these old structures built with wood, baked clay brick or cut stone are presented with photos. Necessary reinforcement elements were determined through analysis and some suggestions were made, both to eliminate the damage accumulated over time and to make some arrangements in the buildings. The point to be noted here is: Since wood material is very quickly affected by water and moisture, better insulation should be constituted against these effects and necessary precautions should be taken against fire hazard as well. In the examined buildings, depending on the characteristics and physical properties of the structure, wood elements, steel profiles and sometimes reinforced concrete elements particularly in foundation (usually in cases where additional parts need to be made or statically required) are designed. In these designs, if it is not possible to replace any structural element, reinforcement is made by enlarging the existing cross-section.

Another important point is that the combination of the existing structure and the new structural members to be added should be done precisely ensuring the load transfer to the new memebers. The design and construction process of these junction points should be followed with caution. If there is structural monumental protection, there will be a serious limitation in the strengthening strategy. While trying to preserve the originality of the structure in strengthening works, the aim of ensuring horizontal and vertical stability of the building needs to havea high priority .

5. References

[1] Gorr, H. (2012). Volkshäuser (houses of the people) in Germany: a historical overview from 1900 until today. International Journal of Heritage Studies, 19(5), 457–473. https://doi.org/10.1080/13527258.2012.720998

[2] Lorbek, M., (2018). Idealizations of the Kleinhaus: On the Typology of the Small Single-Family House in Germany, 1920s–1960s. Architectural Histories, 6(1), p.13. DOI: http://doi.org/10.5334/ah.243

[3] Kropp, G. 1924. Das erste G.d.F. Haus. *Mein-Eigen-Heim*, 2(7): 101.

[4] Kasper, F J. ,1994. Retrofitting of the facades of half-timbered buildings by use of modern insulating materials. Advantages and disadvantages; Sanierung von Fachwerkfassaden mit modernen Daemmstoffen. Praxisgerecht oder substanzgefaehrdend?. ETDEWEB,

U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information.

Web: https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/92743

[5] Dominart Investment Group (2024). https://dominartinvest.com/en/page/oldhouses-in-germany

[6] Holzer, S.M., 2013. Statische Beurteilung historischer Tragwerke. Band 1: Mauerwerkskonstruktionen.1.Auflage. Ernst &Sohn GmbH.

TARİHİ BOĞAZ, YILDIZ VE KÖSEPAŞA KÖPRÜLERİNİN RESTORASYON UYGULAMA ÇALIŞMALARI

[1]Özge ÖZTÜRK TOKEL, Ayşe AVŞİN[2], Sine YEŞİLKAYA [3]

[1]Proje Şefi, Karayolları Genel Müdürlüğü, otokel@kgm.gov.tr
[2]Tarihi Köprüler Şubesi Müdürü, Karayolları Genel Müdürlüğü, aavsin@kgm.gov.tr
[3]Proje Mimarı, Karayolları Genel Müdürlüğü, sine.yesilkaya@kgm.gov.tr

Özet

Anadolu toprakları yüzyıllar boyunca medeniyetlerin gelişimine tanıklık etmiş, toplumların askeri, ticaret, haberleşme gibi ulaşıma yönelik ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla güzergahlarla örülmüştür. Ulaşım sisteminin ana elemanlarından olan köprüler de askeri, ticari, sosyal, iktisadi ve kültürel bağlamda hizmet eden tarihin önemli bir kültürel öğesidir.

Bu çalışma kapsamında; Sivas İli, Kızılırmak Nehri üzerinde bulunan ve temelleri Roma dönemine dayanan Tarihi Boğaz, Yıldız ve Kösepaşa Köprüleri'nin korunmasına yönelik yapılacak çalışmalarda izlenecek yöntemler anlatılacaktır.

Anahtar Sözcükler: Tarihi köprüler, Koruma, Restorasyon

Abstract

Anatolian lands have witnessed the development of civilizations for centuries and have been built with routes to meet the transportation needs of societies such as military, trade and communication. Bridges, which are the main elements of the transportation system, are also an important cultural element of history serving in military, commercial, social, economic and cultural contexts.

This scope of work; the methods to be followed in the works to be carried out for the protection of the historical Boğaz, Yıldız and Kösepaşa Bridges, which are located on the Kızılırmak River in Sivas Province and whose foundations date back to the Roman period, will be explained.

Keywords: Historical Bridges, Conversation, Restoration

1. GİRİŞ

Karayolları Genel Müdürlüğü, Tarihi Köprüler Şubesi Müdürlüğü envanterinde 2024 itibariyle, 2509 adet tarihi köprü bulunmaktadır. 2863 sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu kapsamında yer alan söz konusu tescilli tarihi köprülerin "bakım ve onarımını yapmak veya yaptırmak" görevi 6001 sayılı Karayolları Genel Müdürlüğü Hizmetleri Hakkındaki Kanun gereğince, Karayolları Genel Müdürlüğü sorumluluğunda yer almaktadır.

Çalışmada, Tarihi Boğaz, Tarihi Yıldız ve Tarihi Kösepaşa Köprüleri'nde yapılan restorasyon proje ve uygulama çalışmaları anlatılmıştır. Çalışma kapsamında yer alan köprülerden Tarihi Boğaz ve Tarihi Yıldız Köprülerinin ilk inşaları Roma dönemine, Tarihi Kösepaşa Köprüsü'nün ilk inşası ise Selçuklu Dönemi'ne tarihlendirilmiştir. Genel özelllikleri itibarıyla, Roma dönemi köprülerine ait kemerler daire formda olup, döşemesi de genellikle çok köşeli ve büyük ebatlı taşlardan oluşmaktadır. Çoğunlukla kemer alın taşlarıyla aynı yüzeyde tempan duvarı yükselmektedir. Selçuklu dönemi köprülerine bakıldığında ise, kemerlerin genellikle sivri veya basık sivri formda olduğu görülmektedir. Roma dönemi köprülerinde yer almayan boşaltma gözlerine, Selçuklu köprülerinde rastlanılmakta olup korkulukları ise tempanla birlikte devam etmektedir [6].

2. Sivas İlinde Bulunan ve Çalışma Kapsamında Ele Alınan Tarihi Köprüler

Köprü yapılarını yol ağları ile birlikte değerlendirmek, tarihleme konusunda da karşılaştırma yapma imkanı tanımaktadır. Köprülerle ile ilgili kaynak araştırması kapsamında Türkiye coğrafyasında yer alan yayınlara başvurulmuş, Anadolu'da özellikle de Sivas ve çevresinin yol ağlarını ele alan yayın ve makaleler araştırılmıştır. Araştırmalar kapsamında Osmanlı Devlet Arşivleri ile Sivas Vilayeti Salnameleri de incelenmiştir.

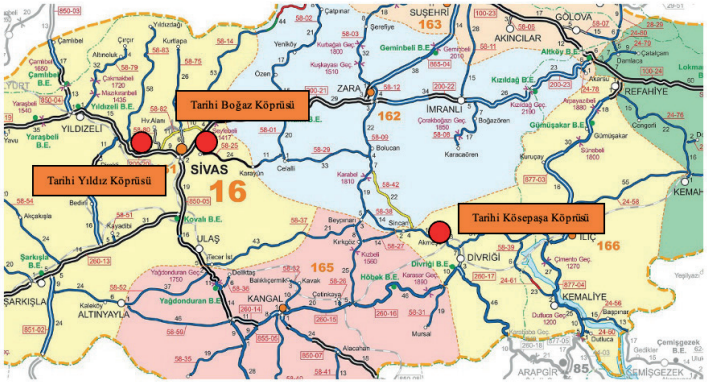
Tarihçi Freidrich Hild, Roma ve Doğu Roma dönemi yolları ile ilgili çalışmasında; yol hatlarını dönem yapılarının varlığı ile anlatmış ve Ankara'dan Sivas'a, oradan da Malatya'ya uzanan yol hattı ile bu yolun Ankara'dan sonraki en önemli durağının Yozgat'ın 28 km batısında yer alan Büyük Nefez köy (Yerköy yakınlarında) isimli antik yerleşim olduğunu belirtmiştir. Hat daha sonra günümüz Sorgun ve Karamağara yerleşimleri üzerinden Charsianon'a (Akdağmadeni) ulaşarak güneydoğu ve kuzeydoğu

olmak üzere iki yöne ayrılmaktadır. Kuzeydoğuya yönelen hat, Simos (Yıldızeli) yakınlarında Yıldız Irmağı geçerek Sivas'a (Sebastia), güneydoğuya ayrılan bağlantı yolu ise Kızılırmak Nehrini Bozkurt yerleşiminde aşarak, Şarkışla'ya ulaşmaktadır [1].

Selçuklu Dönemi yol ağları; milletlerarası ticaret yolları olmak üzere iki eksende odaklanmaktadır [2]. Birincisi, Antalya veya Alâîyye'den başlayan ve Konya'da odaklanarak Orta Anadolu üzerinden Aksaray-Kayseri-Sivas-Erzincan-Erzen-i Rûm-Erciş-Iğdır yoluyla Tebriz'e uzanan doğu-batı, ikincisi ise Konya-Aksaray-Kayseri üzerinden Sivas'ta birleşen Erzincan-Erzeni Rûm yoluyla Sinop ya da Samsun limanlarına ulaşan kuzey-güney ticaret yoludur.

Osmanlı dönemine ait yol ağları çalışmalarında ise, Franz Taeschner, Sivas- Erzincan-Erzurum arasındaki eski bir ordu yoluna değinmiş, bu yolun Osmanlı dönemi öncesinden varlığına ilişkin kanıtlar sunarak yolun uğradığı noktaların altını çizmiştir. İran Moğol İmparatorluğu'nun batıdaki en uç noktası olan Sivas'ı Azerbaycan'a bağlayan güzergâha "Sivas-Dodurga-Zara-Suşehri-Erzincan-Ilıca- Erzurum" olarak tanımlanmıştır [3].

Güzergahlarla ilgili edinilen bilgiler doğrultusunda, Sivas ve yakın çevresinin Roma döneminden itibaren önemli yol güzergahları üzerinde bulunduğu, çevresi ile birlikte kervansaray, han, hamam tarihi köprü gibi birçok kültür varlığına ev sahipliği yaptığı görülmektedir.



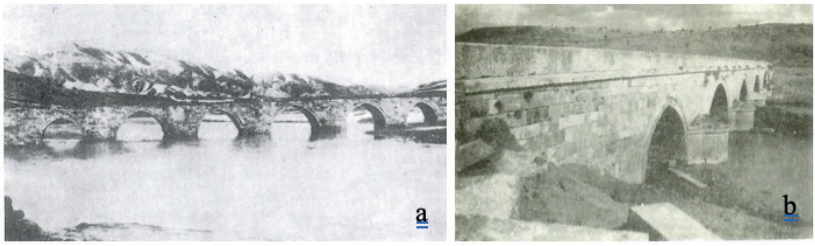
Şekil 1- Tarihi Boğaz, Yıldız ve Kösepaşa Köprüleri'nin haritadaki yeri

2.1. Tarihi Boğaz Köprüsü

Sivas ili, Kızılırmak nehri üzerinde inşa edilmiş olan Tarihi Boğaz Köprüsü, 130 metre uzunluğunda ve 4.70 metre genişliğinde olup, 6 adet kemere sahiptir. Roma, Doğu Roma, Selçuklu ve Osmanlı Dönemine ait tarihi yol güzergahı üzerinde yer alan köprü, Gayrimenkul Eski Eserler ve Anıtlar Yüksek Kurulu'nun 14.03.1980 tarih ve 11789 sayılı kararıyla tescil edilmiş olup, Sivas Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu'nun 19.11.2014 tarih ve 1775 sayılı kararı ile de 1. Grup anıtsal yapı olarak belirlenmiştir.

2.1.1. Tarihi Boğaz Köprüsü Konumu ve Tarihçesi

Bölgede yapılan yüzey araştırmalarından elde edilen veriler doğrultusunda, köprünün üzerinde bulunduğu güzergahın M.Ö 3000 yıllarında da ticari ve askeri amaçlı olarak kullanıldığını göstermektedir. Tarihi Boğaz Köprüsü, Roma döneminde inşa edilmiş ve sonraki dönemlerde yıkılmış olan bir köprünün temelleri üzerinde, Selçuklu Döneminde yeniden inşa edilmiştir. Tarihi köprünün, üzerinde bulunan ve yonu taşı üzerine yazılmış üç satırdan oluşan kitabesinden köprünün Osmanlı Döneminde 1525 yıllarında kapsamlı onarım geçirdiği bilinmektedir. Köprü; Osmanlı Döneminde Sivas Valiliği yapmış olan Halil Rıfat Paşa döneminde 19. yüzyılda ve Cumhuriyet döneminde de çeşitli onarımlar geçirmiştir [4,5].



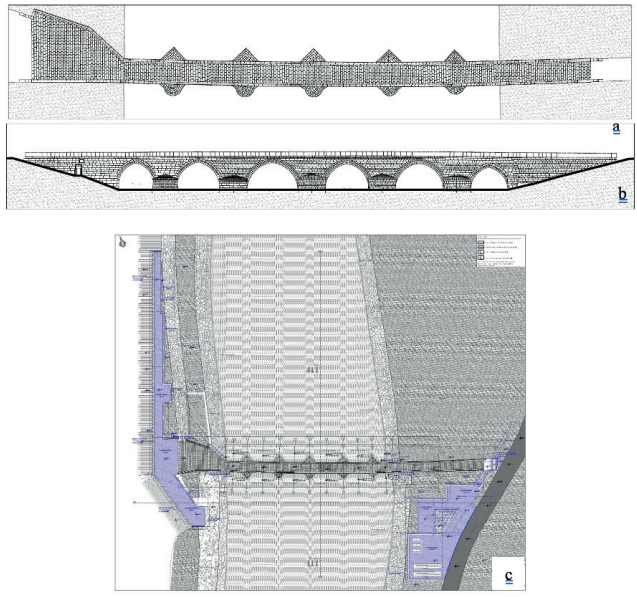
Şekil 2- a. Boğaz Köprüsü genel görünüş [4] b. Boğaz Köprüsü genel görünüş [6]

1.1.2. Tarihi Boğaz Köprüsü'nün Mimari Özellikleri

Kemerlerin açıklıklarının üzengi hattından itibaren yükseklikleri memba cephesinde; sırasıyla 3.85, 4.57, 4.50, 4.72, 4.87, 4.65 m olup, kemer açıklıkları ise sırasıyla 6.78, 8.66, 7.82, 9.13, 7.69 ve 6.06 metredir. Köprünün ayaklarına gelen suyu yönlendirmek amacı ile memba yönünde 5 adet üçgen

formlu burun, mansap yönünde ise 5 adet düz ve oval formlu topuk bölümünün yer aldığı selyaran inşa edilmiştir. Selyaranlarda; 17 cm yüksekliğindeki profilli korniş elemanları ve üzerinde üçgen prizma şeklinde külah yapısı da bulunmaktadır. Köprü memba cephesi kenar ayak üzerinde günümüzde kapatılmış bir kapı açıklığı yer almaktadır. Tunç, köprünün güney tarafında memba yönünde tempan duvarda yer alan kapı açıklığının açıldığı odacıktan da bahsederek buranın bekçi-dinlenme odası olabileceğini ileri sürmektedir [6]. Düzgün kesme taştan sövesi bulunan kapı açıklığı içindeki mekan, restorasyondan önce moloz yığınlarıyla doludur. Önceki onarımlarda, selyaran ve topuk elemanlara destek duvarı yapılmış, bekçi odasının içine ise betonarme dikme eklenmiştir. Kapı açıklığının sağ üstünde ise okunamaz duruma gelmiş kitabe taşı yer almaktadır. Selyaran ve topuk elemanlarının, dolayısıyla köprü ayak sisteminin etrafına geç dönemde beton malzemeden destek dolgusu yapılmıştır. Köprünün özgün döşemesi günümüze ulaşamamış olup, yapılan geç dönem onarımlarda asfalt ile kaplanmıştır.

Köprüye ait restorasyon uygulama projeleri, Sivas Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu'nun 22.10.2014 tarih ve 106 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Şekil 3- Tarihi Boğaz Köprüsü, a. Restorasyon projesi döşeme planı b. Restorasyon projesi memba cephesi c. Çevre düzenlemesi projesi

2.1.3. Tarihi Boğaz Köprüsü'ne Ait Restorasyon Uygulama Çalışmaları

Restorasyon uygulama çalışmalarına 2019 yılında başlanılmış olup, çalışmalar söküm ve kazı, sağlamlaştırma ve tamamlama olarak gerçekleştirilmiştir.

Köprünün temellerindeki ahşap kazık sistemi (Şekil 4-a) aynen korunmuş, nehir yatağından kontrolsüz malzeme alımı sonucu düşen nehir taban seviyesini özgün durumuna getirmek amacıyla temelleri de kapsayacak şekilde dere yatağında radye temel niteliğinde taş tahkimatı (Şekil 4-c,d) yapılmıştır. Ayrıca ampatmanda yer alan eksik bölümlerde taş ile tamamlama yapılarak (Şekil 4-d) kenetli olarak birbirine bağlanmıştır. Memba tarafta onarım öncesi taşkınlarla gelen ağaç, kütük, taş vb. malzemelerin darbeleri sonucu hasar gören burunlarındaki taşlar çürütülerek tamamlanmıştır.



Şekil 4- Tarihi Boğaz Köprüsü, a. Ahşap kazık temel ve ayak sistemi (onarım öncesi), b. Ahşap kazık temel ve ayak sistemi (onarım sonrası) c. Ayak ve selyaran tamamlama d. Dere yatağında tahkimat yapılması

Zaman içerisinde, çeşitli sebeplerden ötürü toprak altında kalmış olan Şekil 5'teki tempan duvarlar, araştırma kazıları ile açığa çıkarılmış, onaylı restorasyon projesinde gerekli değişiklikler yapıldıktan sonra yapılan revize projeler çerçevesinde özgününe uygun olarak tamamlanmıştır.



Şekil 5- Araştırma kazısından sonra açığa çıkarılan tempan duvarlar

Uygulama aşamasında, tempanda projesine uygun gerekli tamamlamamalar yapılırken, köprünün memba cephesi sol tarafında yer alan ve Şekil 6-a'da dışarıdan kapısı görünen odacığına da girilmiştir. Odacığın 4,65 m × 2,80 m × 2,85 m boyutlarında olduğu tespit edilmiştir. Söz konusu odacığın iç kısmı, dış cepheye bakan bölümünde bir adet pencere, duvarın birinde bir adet kemerli niş, tam karşı duvarında ise kare boyutlarda iki adet niş barındırmaktadır. Penceresi mansap cephesine bakan duvarda yer almaktadır. Odacığın kapısı ve iç mekanı özgününe uygun şekilde restore edilmiştir (Şekil 6-b,c,d).



Şekil 6- Tarihi Boğaz Köprüsü, a. Onarım öncesi odacığın kapısı b. Onarım sonrası odacığın kapısı c. Odacık içi kuzey cephe d. Odacık içi güney cephe

Odacığın hemen üstünde ve solunda olmak üzere Şekil 7'de Kitabe 1 (K-1) ve Kitabe 2 (K-2) olarak adlandırılan iki adet kitabesi olan köprünün, memba cephesi sol tarafındaki K-1 2018 yılından sonraki bir tarihte yerinden alınmıştır. Sadece "Saadet, Lillah, İnnehu, O, Allah İçin ve Sevinç" kelimelerinin okunabildiği silinmeye yüz tutmuş K-2 ise, 1525 yılına atfedilmiştir. Söz konusu K-2 kitabesi temizlenmiş ve özgününe yerine tekrar konulmuştur.



Şekil 7- Tarihi Boğaz Köprüsü, a. Memba cephesi görünüşü, b. Kitabe-1 c. Kitabe-2

Restorasyon çalışmaları kapsamında döşeme üzerindeki beton tabaka itina ile sökülmüştür. Döşeme kaplamasına düzgün bir yüzey oluşturmak ve suyun yapının gövdesine girmesini önlemek amacıyla moloz taş dolgu ile döşeme arasına tesviye tabakası yapılmış ve projesine uygun şekilde döşemesi tamamlanmıştır (Şekil 8).



Şekil 8- Döşeme üzerindeki beton tabakanın alınması ve döşeme yapılması

Köprünün özgün korkulukları büyük ölçüde mevcut olup, gerekli tamamlamaların yapılabilmesi için numaralandırılarak sökülmüş ve özgün yerlerine yeniden konulmuştur.



Şekil 9- Tarihi Boğaz Köprüsü Memba Cephesi,
a. Restorasyon öncesi b. Restorasyon sonrası



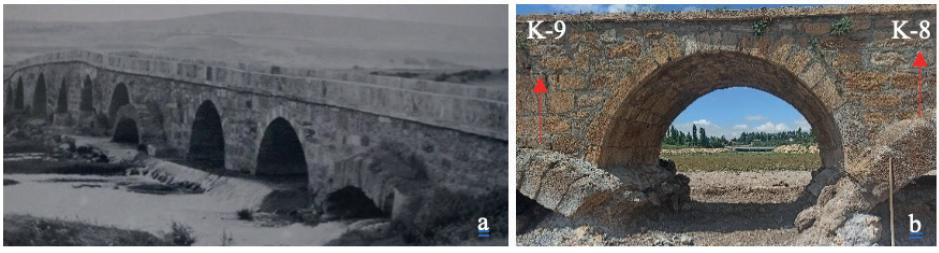
Şekil 10- Tarihi Boğaz Köprüsü Mansap Cephesi,
a.Restorasyon öncesi b. Restorasyon Sonrası

1.1. Tarihi Yıldız Köprüsü

Sivas ili, Kızılırmak Nehrinin bir kolu olan Yıldız çayı üzerinde inşa edilmiş olan Tarihi Yıldız Köprüsü, 130 metre uzunluğunda ve 3,55 metre genişliğinde olup 13 adet kemere sahiptir. Roma, Doğu Roma, Selçuklu ve Osmanlı Dönemine ait tarihi yol güzergahı üzerinde yer alan köprü, Gayrimenkul Eski Eserler ve Anıtlar Yüksek Kurulu'nun 14.03.1980 tarih ve 11789 sayılı kararıyla tescil edilmiş olup, Sivas Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu'nun 29.05.2017 tarih ve 3635 sayılı kararı ile de 1. Grup anıtsal yapı olarak belirlenmiştir.

2.2.1. Tarihi Yıldız Köprüsü Konumu ve Tarihçesi

Roma döneminde inşa edilmiş ve kısmen yıkılmış olan köprüden günümüze ulaşan 3 adet kemer ve temelleri üzerine Selçuklu Döneminde yeniden yapılmıştır. Köprünün adına en eski kayıtlarda "Alis (Kızılırmak) Irmağı Üzerindeki Köprü" olarak rastlanılmaktadır. Köprü hakkında A. Dupre, V. Fontanier, H. Von Moltke, W.F. Ainsworth, F. Burnaby, V. Cuinet, A. Gabriel adlı seyyah ve bilim insanları çeşitli bilgiler vermiştir [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. Seyahatnamelerden edinilen bilgiler dışında, Osmanlı arşiv kayıtları ve vakfiyeler ile salnamelerden faydalanılmış, ayrıca G. Tunç, C. Çulpan, H. Denizli, O. Turan da çalışmalarında söz konusu köprüden bahsetmişlerdir [4, 5, 14].



Şekil 11- a. G.Schneider'in çektiği eski fotoğraf (Memba cephesi) (Çulpan, 2002)
b. Roma dönemine ait 8 ve 9 nolu kemerlerin arasında yer alan
Selçuklu dönemi kemeri

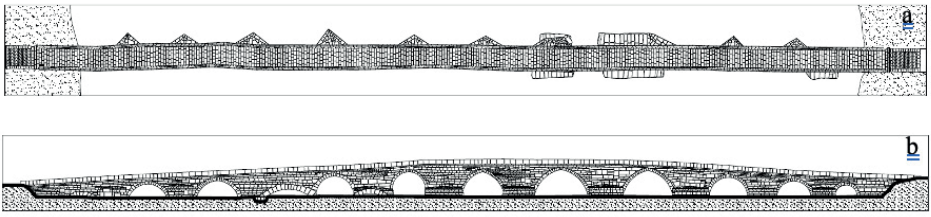
Sivas'ın Selçuklu döneminde doğu-batı ve kuzey-güney eksenindeki kervan yollarına ev sahipliği yapmış olması ve köprüde diğer kemer formlarından farklı olarak sivri kemerli bölümlerin bulunması köprünün Selçuklu döneminde de kapsamlı onarımlar geçirdiğini göstermektedir. Selçuklu döneminde yapılan onarımlarda, mansap cephesi sol taraftan itibaren Roma döneminden kalma 8 ve 9 numaralı kemerler arasında ayak bulunmamakta olup, yerine Selçuklu dönemine ait dairesel formda kemer inşa edilmiştir (Şekil 11-a,b). Genel olarak Selçuklu dönemine ait köprülerde korniş bulunmaması sebebiyle korniş, döşeme ve çörtenlerin de bu dönemde köprüye ilave edildiği düşünülmektedir [5].

2.2.2. Tarihi Yıldız Köprüsü'nün Mimari Özellikleri

Tarihi Yıldız Köprüsü'nün kemerleri dairesel ve iki merkezli sivri kemerlerden oluşmaktadır. Farklı dönemlerde onarım geçirmiş olan kemerler birbirinden farklı ölçülerde açıklıklara sahiptir. Köprü zaman içinde onarım geçirerek değişikliklere maruz kaldığından ayakları da farklı seviyelerde ve hizada yer almaktadır. Genel olarak dikdörtgen ya da kare kesitlidir. Köprünün memba tarafında üstü külahla kapatılmış selyaranlar (burun) bulunmakta olup, genel olarak üçgen planlıdır. Mansap cephesinde ise selyaran (topuk) yer almamaktadır. Onarımlar sırasında, ilk dönem Roma köprüsünün gözlerinden birisi doldurularak selyaran işlevi verilmiştir.

Köprü doğu-batı doğrultusunda düzgün olmayan bir hat şeklinde devam etmekte olup, tempan duvarlarında zaman içinde geçirdiği onarımlara bağlı olarak duvar örgüsünde renk ve doku farklılıkları görülmektedir. Köprünün özellikle orta bölümündeki tempan duvarlarda zaman içerisinde büyük çaplı eğrilikler ve şişmeler oluşmuştur. Korkuluk yüksekliği ortalama 60 - 65 cm, genişliği ise 20 - 25 cm olup düz hatlıdır. Köprünün döşemesi önceki yıllarda yapılan onarımlarda asfalt ile kaplanmıştır.

Köprüye ait restorasyon uygulama projeleri, Sivas Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu'nun 03.09.2015 tarih ve 2358 sayılı kararı ile onaylanmıştır (Şekil 12-a,b).



Şekil 12- Tarihi Yıldız Köprüsü,
a. Restorasyon döşeme planı b. Restorasyon memba cephesi

2.2.3. Tarihi Yıldız Köprüsü'ne Ait Restorasyon Uygulama Çalışmaları

Restorasyon uygulama çalışmalarına 2019 yılında başlanılmış olup, çalışmalar söküm ve kazı, sağlamlaştırma ve tamamlama olarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışmalara öncelikle dere yatağından başlanılmıştır. Geçmiş dönem onarımlarında, dere yatağında beton malzeme ile kaplanmış olup (Şekil 13-a) malzemenin kalınlığını tespit edebilmek amacıyla birkaç alandan sondaj alınmıştır (Şekil 13-b,c). Elde edilen veriler doğrultusunda betonun kalınlığının 30-50 cm arasında değiştiği tespit edilmiştir. Su akış kesitini daraltan ve köprü ile uyumsuzluk sergileyen muhdes beton ek, köprünün ayak ve temellerine zarar vermeden, itinalı bir şekilde sökülmüş, yerine Şekil 13-d'de görüldüğü üzere; dere yatağı kotlarındaki düzensizlikleri gidermek için projesine uygun şekilde taş tahkimat yapılmıştır.



Şekil 13- Tarihi Yıldız Köprüsü, a. Nehir yatağında bulunan beton malzeme b.c. Beton malzemeden sondaj alınması d. Tahkimat sonrası görünüm

Memba ve mansap cephelerinde, renk ve doku farklılıklarına sahip, aynı zamanda da şişmeler ve şakulünden kaymalar sonucunda büyük oranda taşıyıcılığını yitirmiş (Şekil 14) tempan duvarlar, projesine uygun seviyeye kadar numaralandırılarak sökülmüş, kullanılabilir durumdaki taşlar tekrar kullanılarak cephe tamamlanmıştır. Geçmiş dönemlerde, çimento esaslı malzeme ile yapılmış olan muhdes derzler sökülmüş ve yok olan derzler ile beraber özgüne uygun olarak yenilenmiştir.



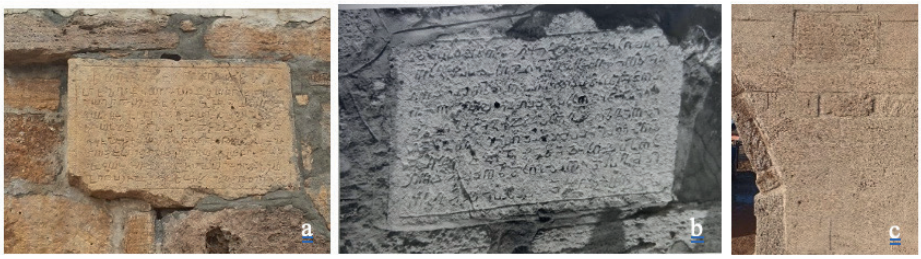
Şekil 14- Şakülünden kaymış tempan duvarların sökülmesi ve yeniden yapılması

Çalışma kapsamında, mansap cephesi A4 ayağı hizasında yer alan kitabe Kitabe-1 (K-1), kazı çalışmaları sonra açığa çıkan kitabe ise Kitabe-2 (K-2) olarak tanımlanmış olup köprü üzerinde bulunduğu yerler Şekil 15-a' da gösterilmiştir.



Şekil 15- Tarihi Yıldız Köprüsü, a. Kitabe 1 ve Kitabe 2 konumu, b. Mansap cephesi A-4 ayağı kısmi restorasyon projesi

Mansap cephesi A-4 ayağı hizasında dönem onarımları esnasında köprüye eklenmiş olduğu düşünülen kazıma ve oyma tekniğindeki kitabesi (K-1) tahrip olduğu için tam olarak okunamamıştır. Çalışmalar sırasında, uygun temizlik çalışmaları yapıldıktan sonra özgün yerine konulmuştur (Şekil 16-c).



Şekil 16- Tarihi Yıldız Köprüsü Kitabe 1, a.Restorasyon öncesi durum b. Karayolları arşivi fotoğrafı c. Köprü üzerindeki konumu

1829 yılına tarihlenen K-2 kitabesi, mermer taştan oyularak yapılmış olup, çalışmalar sırasında bulunarak toprak altından gün yüzüne çıkarıldığı bilinmektedir. Mermer kitabenin ölçüleri 71 cm × 47 cm ve kalınlığı 31 cm'dir. Mermer kitabenin yüzeyindeki kirlilik katmanlaşarak yüzeyin erozyona uğramasına neden olmuştur. Şekil 17-a,b ve c'de görüldüğü üzere taşın konservasyon çalışmaları kapsamında tuzdan arındırma, yüzey temizliği ile dolgu ve güçlendirme uygulamaları gerçekleştirmiştir.

Mermerin bünyesine işlemiş çözünebilir tuzlardan mermeri arındırmak ve kirlilik katmanlarını temizlemek için bazik çözelti kullanılmıştır. Kimyasalın konsantrasyonu ve uygulama süresi değiştirilerek yapılan çalışmalarda kir katmanının giderilemediği görülmüştür. Güçlendirme ve dolgu için, mermerde bulunan çatlağa mikro enjeksiyon uygulanmıştır. Konservasyon çalışmaları tamamlandıktan sonra Kitabe 2, A4 ayağında kitabe taşına uygun boyuttaki yerine yerleştirilmiştir (Şekil 18-a,b,c).



Şekil 17- Tarihi Yıldız Köprüsü Kitabe 2, a. AB 57 uygulaması
b. Kâğıt hamuru ile tuz çektirme c. Kâğıt hamuru ile tuz çektirme



Şekil 18- Tarihi Yıldız Köprüsü Kitabe 2, a. Kitabenin mevcut durumu
b. Kitabenin konservasyon sonrası durumu c. Kitabenin yerine konulması

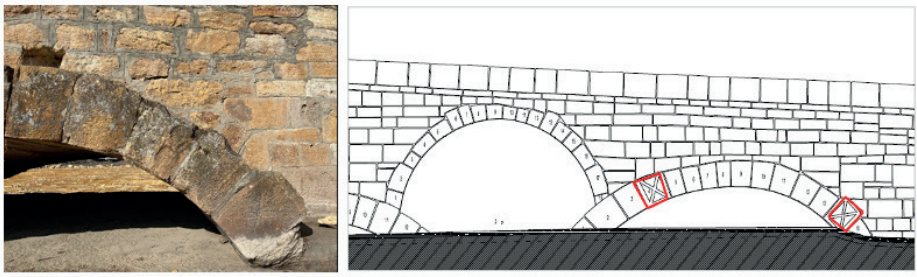
Köprünün kemer karnında insan figürü içeren kabartma (Şekil 19), bitki motifli kabartma (Şekil 20) bulunmaktadır. Ayrıca Roma Dönemi kemeri üzerinde bulunan ve Justinianus döneminde Anadolu yapılan imar çalışmaları sırasında yapılmış olduğu düşünülen St. Andrew haçı (Şekil 21) yer almaktadır.



Şekil 19- Tarihi Yıldız Köprüsü, 5 nolu kemer karnı



Şekil 20- Tarihi Yıldız Köprüsü, mansap cephesi 2 nolu ayak



Şekil 21- Tarihi Yıldız Köprüsü, mansap 9 nolu kemer

Şekil 22'de görüldüğü üzere, mevcut korkuluklar numaralandırılarak sökülmüş, eksik olanları da yenilenerek projesine uygun şekilde tamamlanmıştır. Muhdes asfalt kaplama olan döşeme yüzeyi ise sökülerek yerine projesine uygun olarak taş döşeme kaplanmıştır. Döşeme kaplamasına düzgün bir yüzey oluşturmak ve suyun yapının gövdesine girmesini önlemek amacıyla moloz taş dolgu ile döşeme arasına tesviye tabakası yapılmıştır.



Şekil 22- Tarihi Yıldız Köprüsü, döşemenin sökülerek tamamlanması



Şekil 23- Tarihi Yıldız Köprüsü Memba Cephesi,
a. Restorasyon öncesi b. Restorasyon Sonrası



Şekil 24- Tarihi Yıldız Köprüsü Mansap Cephesi,
a. Restorasyon öncesi b. Restorasyon Sonrası

2.3. Tarihi Kösepaşa Köprüsü

Sivas ili, Kızılırmak nehri üzerinde inşa edilmiş olan Tarihi Kösepaşa Köprüsü, 60 metre uzunluğunda ve 4 metre genişliğinde olup, 3 adet kemere sahiptir. Köprü, Gayrimenkul Eski Eserler ve Anıtlar Yüksek Kurulu'nun 14.03.1980 tarih ve 11789 sayılı kararıyla tescil edilmiş olup, Sivas Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu'nun 29.04.2015 tarih ve 2085 sayılı kararı ile de 1. Grup anıtsal yapı olarak belirlenmiştir.

2.3.1. Tarihi Kösepaşa Köprüsü Konumu ve Tarihçesi

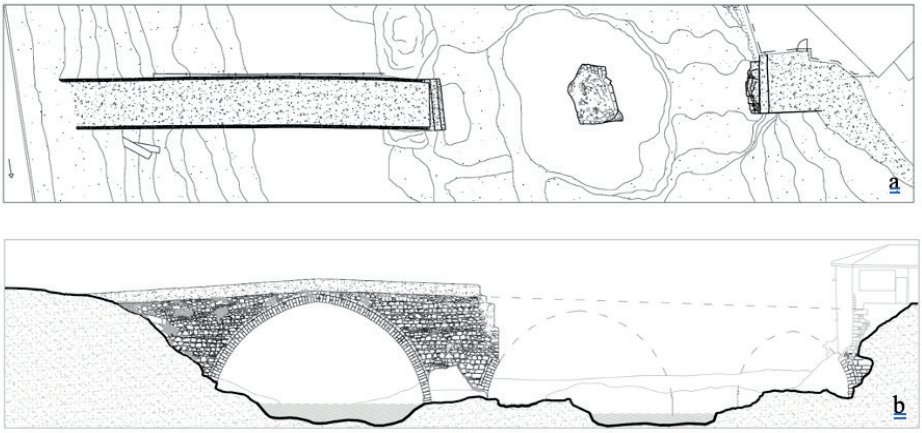
Tarihi Kösepaşa Köprüsü, Sivas ili, Divriği ilçesi sınırları içinde, Sivas'ın güneyinde, eski Sivas-Zara-Divriği yolu üzerindedir. Osmanlı Arşivlerinde 1700'lü yıllarda bölgede yapılan ve onarılan köprüler, Kösepaşa Köprüleri adıyla anılmaktadır [16]. Çulpan ise, Divriği'nde 1756 tarihli 11 adet Mustafa Paşa (Köse Mustafa Paşa) Köprüsü olduğundan bahsetmektedir [4]. Vakfiyesinin tarihi 1799 yılı olan köprünün bulunduğu güzergahın kentin doğu-batı ve kuzey-güney eksenindeki kervan yollarına ev sahipliği yapmış olmasına bağlı olarak, Tarihi Kösepaşa Köprüsü'nün bulunduğu güzergah ana yol güzergahı olarak kullanılması göz önüne alındığında, köprünün bir Selçuklu dönemi köprüsü olduğu düşünülmektedir. Selçuklu Döneminde inşa edilen köprü, Osmanlı Döneminde de birçok kez kapsamlı onarım görmüştür.

2.3.2. Tarihi Kösepaşa Köprüsü'nün Mimari Özellikleri

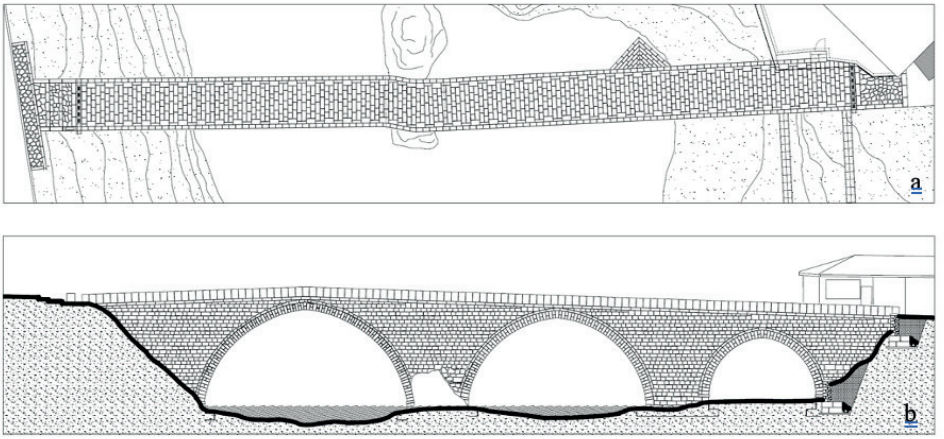
Sivas ili, Divriği-Zara yolu, Kösepaşa Suyu üzerinde bulunan köprünün restorasyon onarımları öncesindeki geçmiş yıllarda 3 açıklı olduğu bilinmekte olup, yıkık haldeki 2 kemerin de başlangıç taşları görülebilmektedir. Köprü yaklaşık olarak 60 m. uzunluğunda ve 4 m. genişliğindedir. Köprünün kemer formu sivri kemerlidir. Kemerler birbirinden farklı ölçülerde açıklıklara sahiptir. Bunun sebebi ayakların arasındaki açıklıkların farklı ölçülerde olmasının gerekliliğinden kaynaklanmaktadır. Mevcuttaki köprü ayağının ve her iki yakanın oturduğu ana kaya zemininin doğrultusunun, aynı hizada olmamasından kaynaklı köprü kuzeydoğu-güneybatı doğrultusunda kırık hat üzerinde ilerlemektedir.

Köprünün kemer taşları yonu, tempan yüzeyleri moloz taştan inşa edilmiştir. Taş boyutları 20 cm ila 35 cm yüksekliğinde 40 cm ila 85 cm genişliğindedir. Kemer taşları kalınlığı genelde 40-45 cm arasında değişiklik göstermektedir. Köprünün kemer ve ayaklarında ince yonu taş, tempanda ise kaba yonu ve moloz taş birlikte kullanılmıştır.

Köprüye ait restorasyon uygulama projeleri, Sivas Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu'nun 24.03.2021 tarih ve 6727 sayılı kararı ile onaylanmıştır (Şekil 25-26, a,b).



Şekil 25- Tarihi Kösepaşa Köprüsü Rölöve Projesi, a. Döşeme planı b. Mansap cephesi



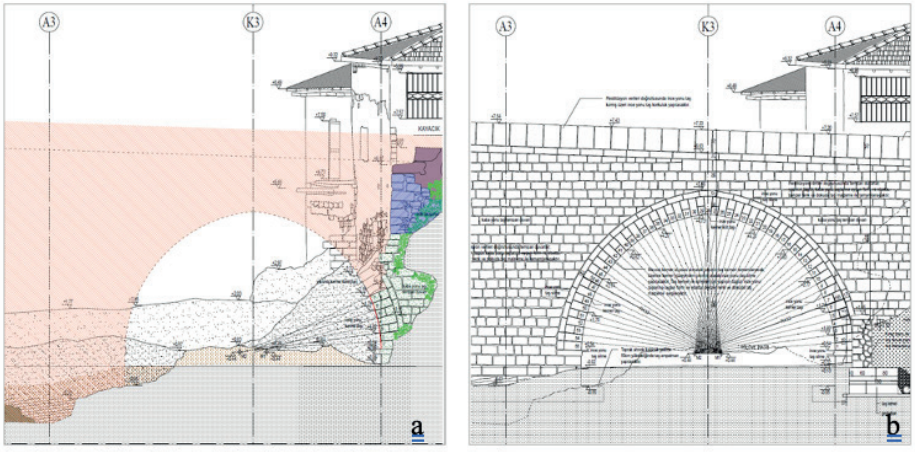
Şekil 26- Tarihi Kösepaşa Köprüsü Restorasyon Projesi, a. Döşeme planı b. Mansap cephesi

2.3.3. Tarihi Kösepaşa Köprüsü'ne Ait Restorasyon Uygulama Çalışmaları

Restorasyon uygulama çalışmalarına 2019 yılında başlanılmış olup, çalışmalar söküm ve kazı, sağlamlaştırma ve kısmi rekonstrüksiyon olarak gerçekleştirilmiştir.

Başlangıç kemer yayları bulunan ancak iki kemeri yıkık durumda olan köprünün, öncelikle özgün kemer formlarına uygun iskele projesi hazırlanmış olup, onaylı projeye uygun olarak askı iskelesi yerinde oluşturulmuştur. Tarihi Kösepaşa Köprüsü'nün rölöve çizimlerinden elde edilen bilgiler doğrultusunda, ortadaki ana kayaya oturan ayaktan sonra yıkılmış olan K2 kemerinin rekonstrüksiyon projesi; memba cephesinde 8 adet taş, mansap cephesinde 12 adet taş sırası ve K3 kemerin ise memba cephesinde 6 adet taş, mansap cephesinde ise 7 adet taş sırası olarak çizilmiştir. Mevcut sıra kemer taşlarının derzlerinin ait olduğu yayın merkezine gitmediği anlaşılan kemer alın taşları kısmen düzeltilerek K2 kemerinde 42+1+42 adet taş sırasından oluşan 85 sıra kemer alın taşı ile K3 kemerinde 27+1+27 adet taş sırasından oluşan 55 adet sıra kemer alın taşı olası merkez yayı doğrultusunda hazırlanmıştır (Şekil 27).

Şekil 28 de görüldüğü üzere, kemer imalatına üzengi noktalarından başlanarak kemer düşey ekseninin sağında ve solunda eşit sayıda konulan taş örgüleri ile devam edilmiş ve en son kilit taşı konularak projesine uygun kemer formu oluşturulmuştur. Böylece kemer sistemi tamamlanıncaya kadar taşın iskeleye uyguladığı statik yük dağılımının eşit olması sağlanmıştır.



Şekil 27- Tarihi Kösepaşa Köprüsü mansap cephesi K-3 kemeri
a. Müdahale Paftası b. Restorasyon Projesi

Kemer örülmesi sırasında kemer taşlarına ait derzlerin ait olduğu yayının

merkezine gidip gitmediği ve her 5 sırada bir sağlı sollu kot okumaları yapılarak kemer yayının projesine uygunluğu kontrol edilmiştir. Köprü gözlerindeki su akışının engellenmemesi amacıyla kemer yapımı tamamlandıktan sonra askıya alma iskeleleri sökülmüştür.



Şekil 28- Tarihi Kösepaşa Köprüsü, yıkık kemerlerin rekonstrüksiyonu

Kemerler oluşturulurken aynı zamanda selyaran külahları ve tempan duvarlar da örülmüştür. Tempan duvarında 50 - 80 cm derinlikteki taşlar, tempan duvarı arkasında ise tempan duvarı ile birlikte kalınlığı 100 - 120 cm olan sıralı moloz taşlar kullanılmış, duvarlar arasında da harçlı moloz taş dolgu yapılmıştır.

Son dönem onarımlarında beton malzeme ile oluşturulmuş olan korkuluk, korniş ve döşeme elemanları itinalı şekilde sökülmüş ve projesine uygun olarak taş malzeme ile tamamlanmıştır (Şekil 29).



Şekil 29- Tarihi Kösepaşa Köprüsü, Restorasyon öncesi ve sonrası döşeme, korniş ve korkuluk



Şekil 30- Tarihi Kösepaşa Köprüsü Memba Cephesi,
a.Restorasyon öncesi b. Restorasyon sonrası



Şekil 31- Tarihi Kösepaşa Köprüsü Mansap Cephesi
a. Restorasyon öncesi b. Restorasyon sonrası

2. Sonuç

Yol güzergahlarının vazgeçilmez bir öğesi olan tarihi köprüler, su yapısı olması nedeniyle diğer tarihi yapılara kıyasla yapısal olarak zorluklara ve farklılıklara sahiptir. Günümüze kadar, çeşitli nedenlerden ötürü hasar alan köprülerin çevreleri ile birlikte korunarak gelecek kuşaklara özün ve sağlam olarak aktarılabilmesi için, restorasyon çalışmalarının ilk aşaması olan restorasyon projelerinin detaylı olarak hazırlanmasının ardından en az müdahale prensibi ile ve köprülerin özgün yapım sistemlerine uygun olarak restorasyonlarının yapılması önem arz etmektedir.

Kaynaklar

[1] Hild, F., Das Byzantinische Strassensystem in Kappadokien, Wien, 1977.

[2] Özcan, K., Anadolu'da Selçuklu Kentler Sistemi ve Mekânsal Kademelenme, METU JFA, 2.sayı, 26-31, 2006.

[3] Taeschner, F., Osmanlı Kaynaklarına Göre Anadolu Yol Ağı, İstanbul, 2010.

[4] Çulpan, C., Türk Taş Köprüleri (Orta Çağdan Osmanlı Devri sonuna kadar), Ankara, 2002.

[5] Denizli, H., Sivas Tarihi ve Anıtları, Sivas, 1998.

[6] Tunç, G., Taş Köprülerimiz, Karayolları Genel Müdürlüğü Basımevi, Ankara, 1978.

[7] Dupré, A., Voyage en Perse: Fait Dans Les Années 1807, 1808 et 1809, En Traversant la Natolie et la Mésopotamie, Depuis Constantinople Jusqu'a Vextremité du Golf Persique, et de la à Irèwan, Paris, 1819.

[8] Fontanier, V., Voyages en Orient, Paris, 1869.

[9] Moltke, H.M., Türkiye Mektupları, İstanbul, 1969.

[10] Ainsworth, W.F., Travels and Researches in Asia Minor, Mesopotamia, Chaldea and Armenia, c.1, Londra, 1842.

[11] Burnaby, F., At Sırtında Anadolu, İstanbul, 2011.

[12] Cuinet, V., La Turquie d'Asie, Paris, 1892.

[13] Gabriel, A., Monuments Turcs d'Anatolia, Paris, 1930.

[14] Turan, O., Selçuklular ve İslamiyet, İstanbul, 2005.

[15] İlter, F., Osmanlılara Kadar Anadolu Türk Köprüler, Ankara, 1978.

[16] Sakaoğlu, N., Anadolu Derebeyi Ocaklarından Köse Paşa Hanedanı, İstanbul, 1998.

TARİHİ YUKARI (KOCA) KÖPRÜSÜ'NÜN RESTORASYON UYGULAMASI

Mergül AKGÜN[1], Emrah ALTINOK[2], Dr. Ayşe AVŞİN[3]

[1]Tarihi Köprüler Kontrol Şefi, Karayolları 14. Bölge Müdürlüğü,
makgun@kgm.gov.tr
[2]Sanat Yapıları Başmühendisi, Karayolları 14. Bölge Müdürlüğü,
ealtinok@kgm.gov.tr
[3]Tarihi Köprüler Şube Müdürü, Karayolları Genel Müdürlüğü,
aavsin@kgm.gov.tr

Özet

Dünya'nın ilk borsa yapısının bulunduğu Aizonai antik kenti içerisinde yer alan ve Kütahya Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu'nun 27.06.2011 tarihi ve 1077 sayılı kararı ile tescillenen Roma Dönemi eseri Tarihi Yukarı (Koca) Köprüsü; 43,10 m uzunluğunda ve 4,66 m genişliğindedir. Roma Dönemine tanıklık eden, benzer dönem örneklerinden farklı mimari ve teknik özellikler içeren, bir ulaştırma yapısı olarak; korunması, onarılması, içinde bulunduğu coğrafyada yaşamını sürdürmesi ve sonraki nesillere aktarılması gereken önemli bir kültürel mirastır. Farklı dönem onarımları ile günümüze ulaşan köprüde, zamana bağlı olarak gelişen hasarların yanı sıra niteliksiz onarımlarda bulunmaktadır.

Çalışma kapsamında köprünün restorasyonu öncesindeki durumu ve köprüde yürütülen restorasyon uygulama çalışmaları ve süreç ele alınacaktır.

Anahtar Sözcükler: Tarihi Köprüler, Onarım, Kültürel Miras

Abstract

Located in the ancient city of Aizonai, the site of the world's first stock exchange, and registered with the decision of the Kutahya Regional Board for the Protection of Cultural Assets dated 27.06.2011 and numbered 1077, the Roman Period's historical Yukari (Koca) (Penkalas) Bridge is 43.10 m long and 4.66 m wide. As a transportation structure that witnessed the Roman Period and has distinctive architectural and technical features differing from similar period models, it is an essential cultural heritage that deserves to be preserved, repaired, and maintained in the geography it is located in and passed on to the next generations. The bridge, which has survived to the present day with different periods of repairs, has unqualified restorations as well as time-dependent damages. The study discusses the condition of the bridge before its restoration and the restoration works and processes carried out on the bridge.

Keywords: Historical Bridges, Restoration, Cultural Heritage

1. Giriş

Tarihi köprülerin bakım ve onarımını yapmak veya yaptırmak; 6001 Sayılı Karayolları Genel Müdürlüğü Hizmetleri Hakkında Kanunu gereğince Karayolları Genel Müdürlüğünün görev yetki ve sorumluluğunda bulunmaktadır. Geçmiş dönemin teknolojisini, yapım sistemini ve anlayışını günümüze taşıyan tarihi köprülerin, bilimsel veriler ışığında restorasyon uygulama çalışmalarının yapılarak işlevini devam ettirebilmesi önem taşımaktadır. Bu bağlamda, 2000 yıldır ayakta kalarak günümüze ulaşmış olan Roma dönemine ait Tarihi Yukarı Köprü' de de doğa ve insan kaynaklı etkiler ile hatalı onarımlar sonucu meydana gelen hasarların giderilmesine yönelik restorasyon uygulama çalışmaları yürütülmüştür.

1. Kütahya İli, Çavdarhisar İlçesindeki Aizanoi Kentsel Arkeolojik Sit Alanı İçindeki Roma Dönemi Köprüleri

Kütahya ili, Çavdarhisar İlçesindeki Aizanoi Kentsel Arkeolojik sit alanı içindeki Penkalas Çayı üzerinde Roma Döneminde toplam 4 adet köprü inşa edilmiştir. Çavdarhisar yerleşiminin güney bölümünde yer alan ve günümüze ulaşamamış I. Köprünün ahşap yapı elemanları ile inşa edilmiş olduğu, [1] diğer 3 köprünün ise yığma taş tekniği ile inşa edilmiş olduğu bilinmektedir. (Şekil 1)



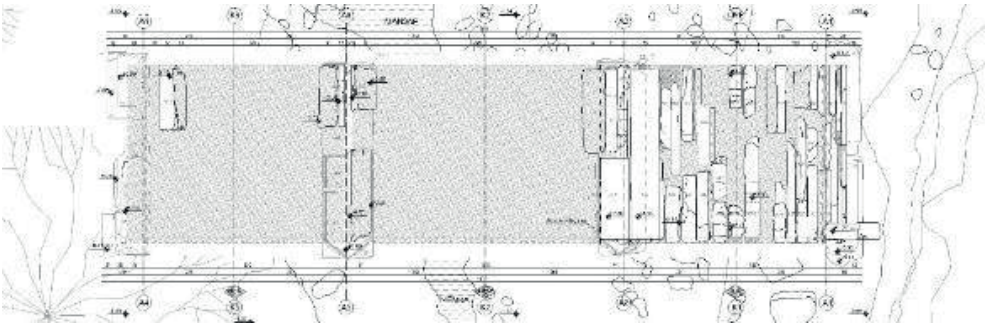
Şekil 1- Çavdarhisar İlçesi içerisinde Yukarı Köprü konumu ve Aizonai Antik Kenti yapıları 1- Yukarı Köprü (II. Köprü) 2- III. Köprü 3- Aizanoi Köprüsü (IV. Köprü) 4- Tapınak 5- Hamam 6- Tiyatro

Bildiri kapsamında detaylı olarak anlatılacak olan Tarihi Yukarı (Koca) Köprü ise Aizanoi Antik Kenti içerisinde yer alan Macellum (Borsa alanı) ile Zeus Tapınağı arasında ulaşımı sağlamak amacı ile inşa edilmiştir.



Şekil 2- Aizanoi Antik Kenti Haritası [1]

III. Köprü günümüze ulaşamamış olup, Aizanoi Kazı Başkanlığı tarafından yapılan araştırma kazıları sonucunda dere yatağı içerisinde köprüye ait kalıntılar ve özgün taşlar bulunmuştur. Elde edilen yeni veriler ve kalıntılara göre köprünün 3 açıklıklı ve 20,00 m uzunluğunda, 4,60 m genişliğinde olduğu tespit edilmiştir. (Şekil 3)



Şekil 3- III. Köprü Rölöve Çizimi

Günümüze ulaşabilmiş olan IV. Köprü (Aizanoi Köprüsü) ise Osmanlı Döneminde de kapsamlı onarımlar geçirmiş ve 20 yy. sonlarında da döşemesi beton ve asfalt yapılarak, 2015 yılında restorasyon çalışmalarına başlanılana kadar Çavdarhisar – Emet il yolu trafiğinin geçişine hizmet etmiştir. Aizanoi Köprüsü 5 açıklıklı, 45,60 muzunluğunda, 4,40 meninde olup, orijinal kitabesinde M.S. 157 yılında inşa edildiği yazmaktadır. Diğer 3 köprünün ise inşa kitabesi bulunmamaktadır. (Şekil 4)



Şekil 4- Aizanoi Köprüsü mansap cephesi

Aizanoi Kentsel Arkeolojik sit alanı içindeki Penkalas çayı üzerinde Roma Döneminde inşa edilmiş olan 3 adet köprünün tempan duvarlarında büyük taş bloklar kullanılmış, ayaklarının memba tarafında taşlar üçgen formlu (selyaran niteliğinde), kemer alın taşları, korkuluklar ile korniş taşları pro-

filli olarak yapılmıştır. Ayrıca korniş taşları üzerinde döşeme yüzeyinde su oluğu bulunmaktadır. Kemerlerin sırt kısımlarında at arabalarına ait teker izleri mevcuttur. Bu teker izlerinden kemer taşlarının üzerinde döşeme olmadığı anlaşılmaktadır. [2]

1.1. Mimari Özellikler ve Yapım Tekniği

Farklı açıklıklarda tek merkezli (dairesel) formda beş kemerli ve iki yöne eğimli olarak inşa edilen Tarihi Yukarı Köprü, 43,10 m uzunluğunda 4,66 m enindedir. Köprü döşemesi üzerinde bulunan muhdes ekler kaldırıldığında; kemer sırtlarında ve döşeme taşlarında tekerlek izleri görülmüş ve kemer aralarındaki özgün korniş taşları tespit edilmiştir. Kazı çalışmaları sonucunda da dere yatağı içinden özgün korkuluk taşlarına ulaşılmıştır.



Şekil 5- Yukarı Köprü'nün Restorasyon Sırasındaki Görünümü

Kemerlerin üzengi seviyesinde düz silme taşları ve köprünün memba cephesinde selyaran bulunmaktadır. Kemer alın taşları 3 pahlı, kilit taşlarının ise bazıları pahlı bazıları da bosajlı yapılmıştır. Özgün tempan duvar büyük ebatlı yonu taşlardan oluşmaktadır.

1.2. Tarihi Yukarı (Koca) Köprünün Geçirdiği Onarımlar



Şekil 6- 2. Seyyah Laborde'nin çizimlerinden Yukarı Köprünün görüntüsü, 1838

Tarihi Yukarı Köprü; inşa edildiği dönemden günümüze kadar ulaşabilmiş olmakla birlikte günümüz araç trafiği altında korniş, tempan, korkuluk ve döşeme taşlarında parça kaybı ve yok olmalar meydana gelmiştir. Doksanlı yıllarda yapılan onarımlarla köprüden motorlu araç geçişinin sağlaması amacıyla tempan duvar örgüsünde farklı boyutta yeni ve devşirme taşlarla çimento harçlı tamamlamalar yapılmıştır. Köprü girişleri yol kotunu karşılayacak şekilde yükseltilmiş, köprünün üstüne dolgu yapılarak döşemesi asfalt kaplanmıştır. Bu müdahaleler köprünün kemer, tempan, korniş ve korkuluk sistemine zarar vermiş, kayıplara neden olmuştur. Söz konusu onarımların tümü, restorasyon uygulama projeleri hazırlanırken özgün yapı ile uyumsuz, muhdes ve yapıya zararlı uygulamalar olarak değerlendirilmiş ve sökümü öngörülmüştür [3].



Şekil 7-a) Memba Cephesi, 2013 *b) Mansap Cephesi, 2013*

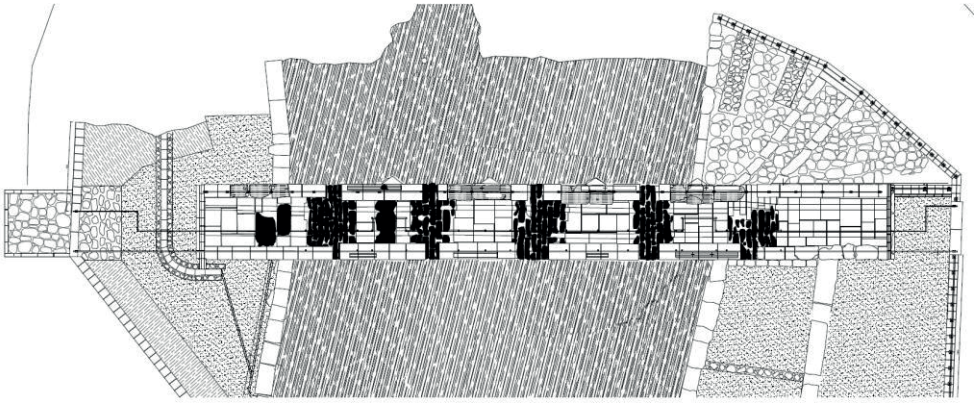
1.3. Tarihi Yukarı Köprüde Yapılan Restorasyon Çalışmaları

23/09/2020 tarih, 5877 sayılı Kütahya Kültür Varlıklarını Koruma Kurulu Kararı ile onaylanan projeler doğrultusunda çalışmalar tamamlanmıştır. Çalışmalara başlanılmadan önce proje aşamasında, köprünün orijinal taş ve harcından numune alınarak yapılan analiz sonuçları doğrultusunda köprünün orijinal taşı ile restorasyonda kullanılması düşünülen ve alternatif ocaklardan temin edilen yeni taşa ait numunelerin analiz sonuçları karşılaştırılarak, Tarihi Köprülerin Restorasyon Uygulama Çalışmalarının Yürütülmesine İlişkin Özel Teknik Şartname de belirtilen kriterler doğrultusunda en uygun taş ve taş ocağı ile diğer malzemelerin seçimi yapılmıştır.

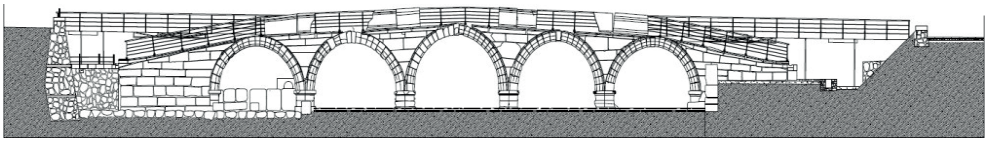
Restorasyon uygulama çalışmaları kapsamında köprü çevresinde ve üzerinde Kütahya Müze Müdürlüğü denetiminde araştırma kazıları yapılmıştır. 1.Derece arkeolojik sit alanındaki köprünün çevresinde antik dönem yapı kalıntıları bulunmaktadır. Doğal afet, insan kaynaklı müdahaleler sonucu köprünün yakın çevresinde ve dere yatağı içerisinde in situ konumunda olmayan yapı taşları, heykeller vb. parçalar bulunmuştur. Kazı çalışmaları ile köprünün beşinci kemeri ile köprüye ait olduğu değerlendirilen 36 adet tempan, korniş, korkuluk ve döşeme taşları açığa çıkarılmıştır. Kullanılmak üzere sahada istiflenen özgün taşların envanteri çıkarılarak, proje çizimlerine aktarılmıştır. (Şekil 8) Diğer eserler Aizanoi Kazı Başkanlığına teslim edilmiştir.

Kat. No: 13	Adı: Korkuluk Bloğu	Kat. No: 14	Adı: Taç Bloğu
No: 27	Ölçüleri: Yük.: 1,07 cm., Gen.: 1,10 m., Kal.: 27 cm.	No: 24	Ölçüleri: Yük.: 30 cm., Gen.: 1,97; Der.: 79 cm.
			

Şekil 8- Envanter Kartı



Şekil9-a) Restorasyon Projesi Plan Çizimi



b) Restorasyon Projesi Memba Cephesi Çizimi



Şekil10- Kazı çalışmalarında çıkarılan heykel ve duvar fotoğrafları

Dere yatağı içerisindeki kazı çalışmaları tamamlandıktan sonra köprü üzerindeki ve tempan duvarlardaki çalışmalara başlanılmadan önce kemer içlerine demir askıya alma iskelesi kurulumu (Şekil 11) yapılarak onaylı restorasyon müdahale projesi doğrultusunda köprüde söküm çalışmalarına başlanılmıştır.



Şekil11-Taşıyıcı İskele Kurulumu *Şekil12-Köprü Üzerinde Söküm çalışmaları*

Tempan duvarın döşeme kotuna yakın bölümlerinde, mevcut örgüden farklı taş sıraları ile devşirme ve köprüye ait ancak in situ konumunda olmayan taşlar sökülerek, mevcut örgü sırası ve boyutla uyumlu blok taşlarla korniş alt kotuna kadar tamamlama yapılmıştır.

Dört kemeri günümüze sağlam olarak ulaşabilmiş olan köprünün kazı çalışmaları sonucu açığa çıkarılan 5. kemerinin memba yönünde kilit taşı da dahil olmak üzere eksik olan 7 adet taşın restorasyon çalışmaları kapsamında tamamlaması yapılmıştır.



Şekil13-a)K5 Kemerinin Öncesi b)K5 Kemerinin Onarım Sonrası

Köprünün döşeme imalatına başlanılmadan önce; ayak akslarının döşeme kotu hizasındaki özgün korniş ve döşeme taşları korunarak, muhdes dolgular kaldırılmıştır. Dolguların kaldırılması sonucu taşların aralarında kalan toprak, bitki kökü gibi kalıntılar mekanik yöntemler ile temizlenmiştir. Özgün döşeme kotları dikkate alınarak; sönmüş kaymak kireç bağlayıcılı moloz taş dolgu üzerine puzolanik hazır harç katkılı tesviye tabakası yapılmıştır.

Köprünün kemer sırtları arasında kalan yeni döşeme imalatının yapımında; kemerlerin kilit taşı ve yanındaki birkaç sıra kemer taşları üzerindeki tekerlek izleri ile uyumlu yeni döşeme yapılmıştır. Böylece, döşemenin üst yüzeyini oluşturan kemer sırtları özgün işlevini koruyacak şekilde açıkta bırakılmış, kemer sırtlarındaki tekerlek izlerinin bitiminden itibaren oturtulan yeni döşeme taşları bir sonraki kemer sırtına kadar devam ettirilmiştir. Yeni yapılan döşemede de tekerlek izleri oluşturularak yağmur sularının tahliyesi de sağlanmıştır. [3]



Şekil 14– Yukarı (II. Köprü) Köprüsünün kemer sırtında izlenen özelleşmiş bölümler; 1- Teker izi bitim, kemer arası döşeme kaplamasının başlangıç hattı, 2- kemer arası döşeme taşının oturması için bırakılan bini

Yukarı Köprünün korniş hattı oluşturulurken öncelikle köprü üzerinde in-situ konumda olan veya köprü dışında tespiti yapılan özgün korniş taşları kullanılmıştır. Özgün korniş taşlarının kullanılmadığı kısımlarda özgün ile uyumlu yeni taşlar ile kısmi korniş imalatı yapılmıştır.



Şekil 15-a) Özgün Konumunda Döşeme Taşı b) Yeni Döşeme Taşı İmalatı



Şekil16- Özgün Korniş Örnekleri

Köprünün yaklaşım duvarları üzerindeki in-situ kornişler ile ayak aksları üzerine denk gelen kornişler farklı ebat, form ve detayda olduğu için yeni korniş elemanları, uygulama yapılacak kesimdeki özgün korniş taşlarına uygun ölçüde imal edilerek kullanılmıştır. Özgün korniş taşlarının tempan duvar içine doğru derinlikleri 80-110 cm arasında değişken ölçülerde olmakla birlikte uygulama sırasında yeni imalatı yapılacak korniş taşları ayak akslarındaki kornişlerin derinlikleri 100 cm olarak, köprü yaklaşımlarındaki kornişlerin derinlikleri ise 80 cm olarak imal edilmiştir. Ayak aksları arasına yapılan kornişlerin cephedeki yüksekliği kemer sırtlarına oturduğu kesimlerde eğime göre yükseltilmiş, özgün korniş örneklerindeki detaylar dikkate alınarak, korniş üstlerine korkulukların oturacağı kesimler harçla aderansın sağlanması için pürüzlendirilmiş, korkuluk önüne denk gelen kısma su kanalı oluşturulmuştur. [3]



Şekil17- Özgün ve Yeni İmal Edilen Kornişler

Aizanoi Kazı başkanlığına ait sahada yer alan ve daha önceki kazı çalışmaları esnasında yakın çevreden bulunan özgün korkuluk taşları ile köprü çevresindeki kazı çalışmalarından çıkarılan korkuluk taşlarından kullanılacak durumda olanlarının form ve ebatları proje üzerinde değerlendirilmiştir.

Tespiti yapılan korkuluk taşlarının yükseklikleri 85-107 cm , uzunlukları ise 106-274 cm arasında değişmektedir. Kornişlerin üzerine montajı yapılan özgün korkuluk taşlarında kenet izi olanlarda kenet yapılmış, kenet izi olmayanlarda kenet uygulaması yapılmamıştır.[2] Köprünün memba yönünde özgün korkuluk taşlarının arkasından işlevsel gereklilik nedeniyle 40*40*5 mm krom çelik "T Profili" dikmeler arasından ∅ 10 mm 3 sıra çelik halat geçirilerek, üst kısma ireko ağacından ahşap trabzan eklenerek korkuluk yapılmıştır.



Şekil 18- a)Özgün Korkuluk Taşı b)Özgün Korniş Taşı



Şekil 19- Özgün Korkuluk Taşlarının Köprü Üzerine Yerleştirilmesi

Köprünün mansap tarafına yaya geçişi ile bisiklet vb. geçişinde kullanılmak üzere çelik konstrüksiyonlu ahşap zeminli köprü geçiş parkuru yapılmış olup, köprü özgün döşeme taşlarının korunması sağlanmıştır. Köprü geçiş parkurunun taşıyıcı konstrüksiyonu NPI, NPU, T vb.profiller ile istenildiğinde kolayca sökülüp kaldırılabilir olarak inşa edilmiştir. Köprü üzerinde bulunan taşıyıcı ayaklar kauçuk üzerine oturtulmuş, köprü dışındaki ayaklar ise beton hatıllara ankrajı yapılarak sabitlenmiştir. Yürüyüş parkurunun zemininde thermowood ireko ahşap deck kullanılmış ve her iki yanına çelik halatlı, ireko ahşap küpeşteli korkuluk imalatı yapılmıştır.



Şekil 20- Köprü Geçiş Parkuru Taşıyıcı Konstrüksiyonu



Şekil 21- Köprü Geçiş Parkuru

Özgününde kemerleri, tempan duvarları ve ayakları büyük taş bloklar ile sıfır derz olarak inşa edilmiş olan Tarihi Yukarı Köprü'nün; örgü yüzeylerindeki toprak, çamur birikintileri taşlara zarar verilmeden fırça ile mekanik yöntemle temizlenmiştir. Tamamen temizlenemeyen yüzeylerde ise partiküller temiz su ile yıkanarak köprü bünyesinden uzaklaştırılmıştır.

Kemer sırtındaki taşlarda zaman içinde meydana gelen aşınma ve açılmalar taşın bağlı olduğu örgü ile bağlantısını zayıflatmış olup, aynı zamanda bu boşluklardan akan sularda taş yüzeylerine zarar vermiş ve bitkisel, mikrobiyolojik oluşumlara sebep olmuştur. Derz onarımları yapılırken öncelikle kemer sırtlarındaki boşluklar arsında bulunan sızıntı alanları belirlenerek kil hamurları ile tıkanmış ve hazırlanan enjeksiyon harcı boşluklara manuel enjektörler ile doldurulmuştur. En az 21 gün boyunca günde 2-3 kez yağmurlama sistemi ile sulanarak uygulama alanının nemli kalması sağlanmış, son olarak mucarta ile kazınarak tarihi dokuya uygun hale getirilmiştir.[4]



Şekil 22- Köprünün Restorasyon Sonrasına Ait Hava Fotoğrafı



Şekil 23-a)Restorasyon Çalışmaları b)Memba Cephesi Sonrası Mansap Cephesi

Sonuç

Köprünün restorasyonu yapılırken, özgün yapısını bozmadan, öncelikli olarak muhdes onarım ve eklentilerinden arındırılması, sorunların giderilerek sağlamlaştırılması, insitu olmayan özgün yapı elemanlarının kullanılarak, işlevselliğini koruması amaçlanmıştır.

Kemer sırtlarındaki antik çağlardan kalan teker izleri, döşemesi, tempan duvarları, kemerleri, kornişi, korkulukları ve yapım sistemi gibi özgün özelliklerinin korunarak gelecek nesillere aktarılması hedeflenmiş olan köprünün restorasyonunda; geleneksel ve modern müdahale teknikleri kullanılmış ve köprünün gelecek kuşaklara aktarılması sağlanmıştır.

Kütahya İli Çavdarhisar İlçesi, Aizanoi Kentsel Arkeolojik sit sınırları içerisinde yer alan Aizanoi Antik Kenti M.S. 2-3. Yy larda yaklaşık 100 000 – 120 000 bin arasında insanın yaşadığı, o günün şartlarında metropol olarak tanımlanacak bir yerleşim yeri olduğu bölge ile ilgili yapılmış olan çalışmalardan anlaşılmaktadır. Aizanoi antik kenti, günümüze kadar ayakta kal-

mış Anadolu'nun en iyi korunmuş Zeus Tapınağı, 2 ana kapı ile birbirine bağlanan kompleks yapı olma özelliğine sahip 13 500 kişi kapasiteli stadyumu ve 15 000 kişi kapasiteli tiyatrosu, dünyanın bilinen ilk borsa yapısı (Macellum), 2 tane roma hamamı, Aizanoi Antik kentinin ana caddesi (Sütunlu Cadde), Antik Barajı, Meter Steunene kutsal alanlarıyla ve Pankelas Çayı üzerinde yer alan köprüleri ile Roma'yı günümüze taşıyan dünyanın en önemli kentlerindendir. Aizanoi Kazı Başkanlığı tarafından, "Pankelas Çayı Projesi" kapsamında II ve IV nolu köprüler arasında ki rıhtım duvarlarının restorasyonu ve dere yatağı çevresinin düzenlenmesi çalışmaları yürütülmektedir. 2018 yılında restorasyon çalışmaları tamamlanan

IV. Köprü (Aizanoi Köprüsü) ile 2022 yılında II. Köprü'nünde (Yukarı Köprü) restorasyon çalışmalarının tamamlanması; Kazı Başkanlığınca yürütülmekte olan projeye katkı sağladığı gibi alanın, yerli ve yabancı turistlerinde gezi güzergahları üzerinde önemli bir destinasyon noktası olmasını da sağlamıştır.

Kaynaklar

1. Klaus Rhidt, Çavdarhisar Vorberıcht Über Dıe Forschungen Zur Hıstorıschen Toporaphıe, Berlin – New York 1993

2. Korkmaz H., Aizonai 2. Roma Köprüsü (Yukarı Köprü) Arkeolojik Raporu, Ankara, 2019

3. KGM, Çavdarhisar (Aizanoi) Yukarı (Koca, II. Köprü) Köprü Proje Raporu, Ankara, 2019.

4. Tarhan Ç. M., Çavdarhisar Aizanoi Antik Kenti Yukarı (Koca, II. Köprü) Köprü Malzeme Koruma Raporu, Ankara, 2019

27 EYLÜL 2024

7. ULUSLARARASI TARİHİ YAPILARIN GÜÇLENDİRİLMESİ VE GELECEĞE GÜVENLE DEVRİ SEMPOZYUMU

7. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRENGTHENING HISTORICAL BUILDINGS AND TRANSFERRING THEM SAFELY TO THE FUTURE

7. SEMPOZYÛMA NAVNETEWEYÎ LI DERBARÊ QEWÎKIRIN Û PARASTINA AVAHÎYÊN DÎROKÎ

DİYARBAKIR, SEZAİ KARAKOÇ KÜLTÜR MERKEZİ

B SALONU - 1B OTURUMU

Oturum Başkanları
Neslihan Dalkılıç, Sinem Kolgu

Varda (Alman Köprüsü) Köprüsü'nün Restorasyonunun İncelenmesi
Raziye Peker, İnci Şentuna Şensarı

Kendirli Kilisesi Restorasyonu: Bir Tarih Mi Ortaya Çıkarıldı, Bir Tarih Mi Yok Edildi?
Necat Özgür

Hekimoğlu Ali Paşa Türbesi'nin Mevcut Durum Tahkiki Ve Taşıyıcı Kemere Takviye Önerisi
Erdinç Önen

Merzifon Tarihi Kızlar Mektebi Restorasyon Ve Deprem Güçlendirme Çalışmaları
Ali Sarıalioğlu, Mahitap Sel

VARDA (ALMAN KÖPRÜSÜ) KÖPRÜSÜ

Raziye PEKER[1]
İnci ŞENTUNA ŞENSARI[2]

[1]İnşaat Yüksek Mühendisi, raziyyepeker@gmail.com
[2]İnşaat Yüksek Mühendisi, Giza Gay. Yat. İnşaat Prefabrik A.Ş. Yönetim Kurulu Başkanı, i_sentuna@hotmail.com

Özet

Bu çalışmada, Adana'nın Karaisalı ilçesinde yer alan ve tarihi öneme sahip Varda (Alman) Köprüsü'nün restorasyonu için detaylı öneriler sunulmuştur. 1912 yılında inşa edilen bu köprü, Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları'nın (TCDD) 6. bölgesinde aktif olarak kullanılmaktadır. Köprü, yapımından bu yana herhangi bir restorasyon çalışması görmemiştir. Köprünün 6 Şubat Depremlerinden de etkilenmesinden dolayı çalışmada, köprünün mevcut durumu değerlendirilerek, restorasyonun gerekli olup olmadığı analiz edilmiş ve restorasyonun gerekliliği durumunda izlenecek yöntemler üzerinde durulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Varda köprüsü, Büyük Viyadük, Koca Viyadük, Alman Köprüsü, Adana

Abstract

In this study, detailed proposals are presented for the restoration of the Varda (German) Bridge, which is located in Karaisalı district of Adana. Built in 1912, this bridge is now actively used in the 6th zone of the Turkish Republic State Railways (TCDD). The bridge has not seen any restoration work since its construction. Since the bridge was also affected by the 6 February Earthquakes, this study evaluates the current condition of the bridge, analyses whether restoration is necessary or not and focuses on the methods to be followed in case restoration is necessary.

Keywords: Varda Bridge, Big Viaduct, German Bridge, Adana

1. Giriş

Köprüler, vadi ,dere kanyon gibi alanlarda iki ayrı yakayı birbirine bağlamak için mühendislik-mimarlık disipliniyle tasarlanan yapılardır. Bu tasarımlar karayolu, demiryolu gibi ulaşım yapılarının sürekliliğinin sağlanması için tarih boyunca mühendislik harikası olarak inşa edilmiştir. Bu sanat yapılarının korunması ve işlevine en uygun şekilde orjinalliği bozulmadan gelecek nesillere aktarılması gerekir. Demiryollarının Anadolu'ya gelişi 1856 yılına dayanmakla birlikte Türkiye Cumhuriyeti'nin kurulmasına kadar olan süreçte 4136 km'lik demiryolu hattı işletilmiştir [6]. İşletilen bu hatların inşaatında zorlu arazi koşullarından dolayı sanat yapılarının tasarımına ihtiyaç duyulmuştur. Varda Köprüsü de Karaisalı'da Çakıt deresinin derin kanyonunu aşmak ve demiryolunu hattını tamamlayabilmek için inşa edilmiş bir sanat yapısıdır. Varda Köprüsü hala Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) 6. bölgede işletilen ve Osmanlı döneminde Bağdat-Hicaz Demiryolu hattını tamamlamak için tasarlanan eşsiz bir sanat yapısıdır [7] (Şekil 1).



Şekil 1:Varda Köprüsü [1]

6 Şubat 2023 tarihinde yaşanan depremde Adana'nın da içinde bulunduğu 11 il ciddi zarar görmüştür. Deprem sonrası bu bölgenin yeniden inşaa süreci devam ederken, tarihi yapıların da gelecek nesillere aktarılabilmesi için ihtiyaç duyulan yapılara restorasyon yapılması çok önemlidir. 1912 yılından ulaşan Varda Köprüsü de önemli tarihi yapılardan birisi olmakla birlikte gerek mimari gerek de ulaşım açısından bölge için önemli tarihi sanat yapılarındandır. Bu tarihi yapı uzun vadeli kullanımı ve güvenliği açısından koruma altına alınmalıdır.

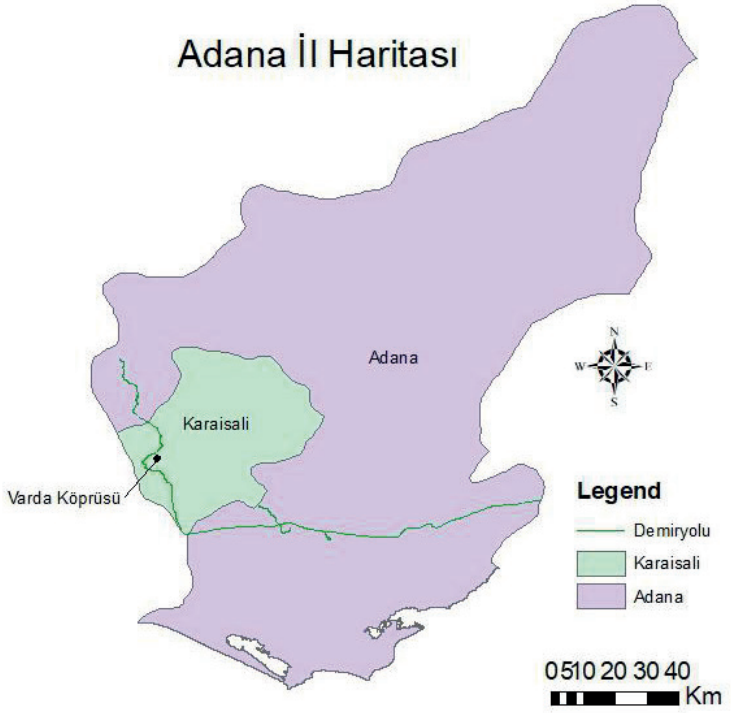
2.Varda Köprüsü ve Çevresi

2.1. Varda Köprüsü Teknik Özellikleri

Varda Köprüsü bölge halkınca Almanlar tarafından inşa edildiği için 'Alman' köprüsü olarak anılsa da yabancı kaynaklarda 'Varda Viaduct, Big Viaduct, German Viaduct' şeklinde anılmıştır [3,4,7,10]. Demiryolu hattının Hacıkırı mevkindeki 'Çakıt Deresinde' bulunan derin kanyonu geçebilmek için 1905 yılında inşaatına başlanmış ve teknik detayları 1912 yılında tamamlanan köprü 1916 yılında işletmeye açılmıştır [7]. Viyadük, kagir köprü türünde 3 ana açıklık, 4 ana ayak üzerine kurulmuş olmakla birlikte, 172 m uzunluğunda ve yerden yüksekliği 99 m'dir. Üzerinde bulunan demiryolu hattı 1220 mlik bir kurbla tasarlanmış olup, dever miktarı 85 kmlik hız için 47mm'dir. Viyadüğün inşası sırasında 21 işçi hayatını kaybetmiştir [7,10]. İnşaatında kullanılacak çimento ve çelik gibi ana malzemeler Mersin'e deniz yoluyla gönderilmiş olup Tarsus'tan develer sırtında şantiye alanına taşınmıştır. Köprünün karşı tarafına taşınacak malzemeler de, öngörülen alanın yakınına geçici olarak tasarlanan yardımcı viyadük ile taşınmıştır ve asıl köprü inşa edilince bu viyadük kapatılmakla birlikte taşıyıcı ayakları bugüne ulaşmıştır [10]. Köprünün yapım tekniği açısından 2009 yılında ilk kez onarılan ve UNESCO Dünya miras listesinde bulunan 'Landwasser Viaduct' ile benzer olması dikkat çekmiştir [8]. Köprüyü ilk 17 Şubat 1917 tarihinde geçen üst düzey Osmanlı yöneticisi Enver Paşa'dır. Bugün görsel güzelliğiyle de yabancı ve Türk dizi filmlere ev sahipliği yapan köprü, 2012 yılında James Bond'un Skyfall filmindeki kaçış sahnesiyle tüm dünyanın ilgisini çekmiştir [3,7].

2.2 Adana İlinin Coğrafi Yapısı

Adana'nın tarihi 3000 yıl öncesine dayanmakla birlikte, tarih boyunca sayısız medeniyete ev sahipliği yapmıştır. Adana ili, Türkiye'nin güneyinde Akdeniz bölgesinin Çukurova Bölgesinde bulunan, yine Akdeniz ikliminin görüldüğü 35-38 Kuzey enlemi,34-36 Doğu boylamı sınırlarında konumlanmıştır (Şekil 3).



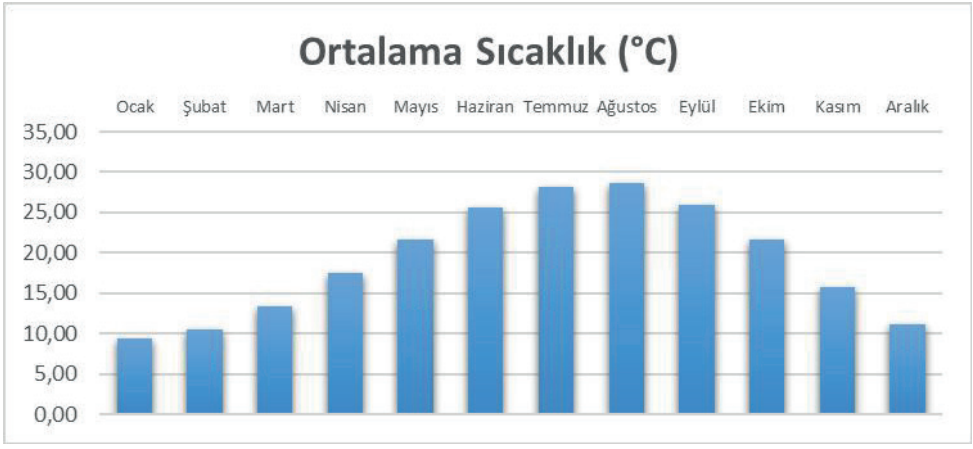
Şekil 3: Adana İl Haritası

2.3 Adana İlinin İklimi ve Deprem Sınıfı

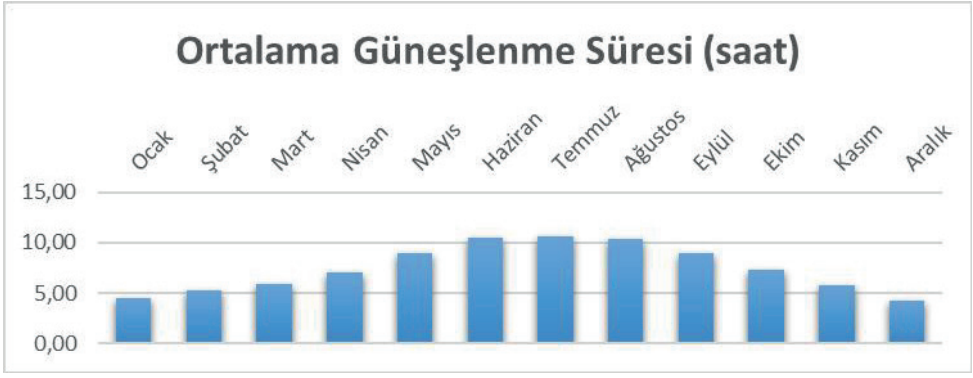
Varda Köprüsü gibi tarihi ve önemli bir yapının, hem deprem hem de iklimsel koşullarla başa çıkabilmesi için özel bir mühendislik ve restorasyon çalışmaları gerekmektedir. Bu bağlamda tarihi yapının bulunduğu kentin ikliminin iyi bilinmesi ve restorasyon için uygun mühendislik hizmetininin verilebilmesi için gereklidir [11,12,13]. Çünkü iklimsel koşullara bağlı

olarak örneğin sıcaklıktaki ani değişimler, yapı malzemelerinde yıpranmaya ve çatlak oluşumuna neden olabilir. Yüksek nem, özellikle taş ve ahşap gibi doğal malzemelerin çürümesine ve yıpranmasına yol açabilir. Sel gibi su baskınları, köprünün temelini zayıflatabilir ve taşıyıcı sisteminde hasarlara neden olabilir [11]. İklimselliğe bağlı etkilere önlem alabilmek için bölgenin iklim özellikleri bilinmelidir [12].

Adana kentinde Akdeniz iklimi görülür. Yazları sıcak ve kurak, kışları ılık ve yağışlı geçmektedir. En yüksek sıcaklık 12 Haziran 2012 yılında nemli 53 °C, nemsiz 46 °C ölçülmüştür. En düşük sıcaklık ise 28 Ocak 2012 yılında −6 °C olarak kayıtlara geçmiştir. Bölgeye ait 1929-2019 yıllarına ait iklim özellikleri aşağıda verilmiştir [9] (Şekil 4-9).



Şekil 4:Ortalama Sıcaklık (1929-2019)[9]



Şekil 5:Ortalama Güneşlenme Süresi (1929-2019) [9]



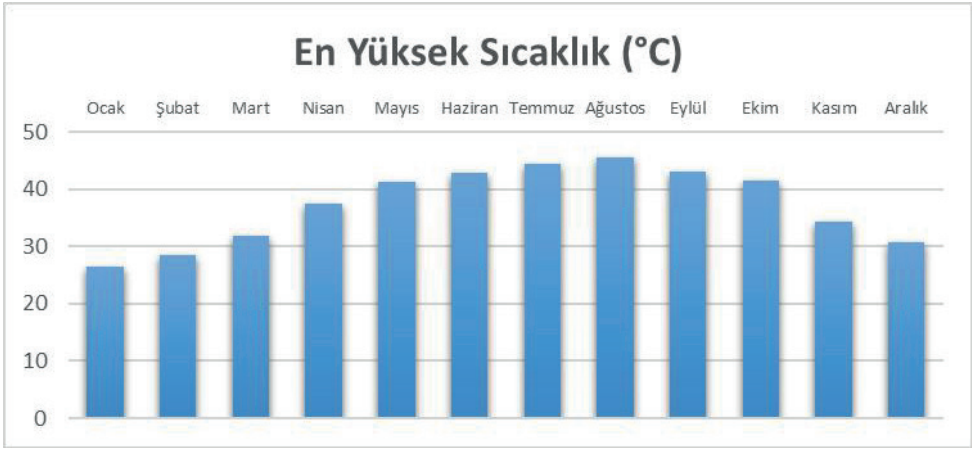
Şekil 6:Ortalama En Yüksek Sıcaklık (1929-2019)[9]



Şekil 7:Ortalama Yağışlı Gün Sayısı (1929-2019) [9]

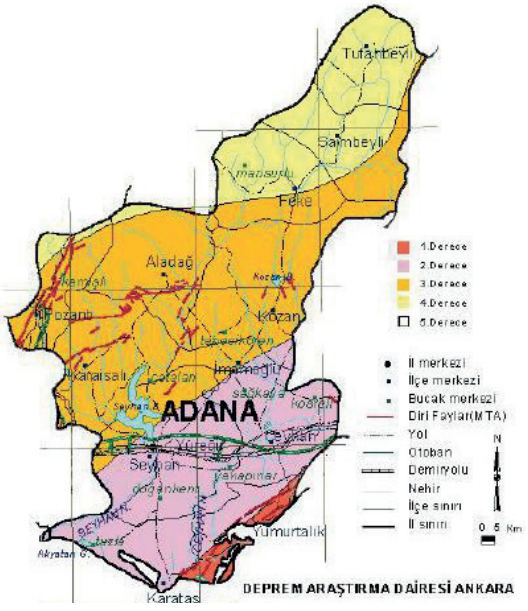


Şekil 8:Aylık Ortalama Yağış Miktarı Ortalaması (1929-2019)[9]



Şekil 9:En Yüksek Sıcaklık Ortalaması (1929-2019) [9]

Adana, Türkiye'nin aktif fay hatları üzerinde yer alması sebebiyle orta derecede deprem riski taşıyan bir ildir (Şekil 10). Bu durum, kentin yapılaşmasında depreme dayanıklılık ilkesinin önemini bir kat daha artırmaktadır. Bunun yanunda tarihi yapıların korunmasında ve gelecek nesillere aktarılmasında depremsellik risk dikkate alınarak, tarihi yapıların düzenli olarak incelenmesi ve olası hasarların tespit edilerek onarılması, depremde daha güvenli olmasını sağlar [14].

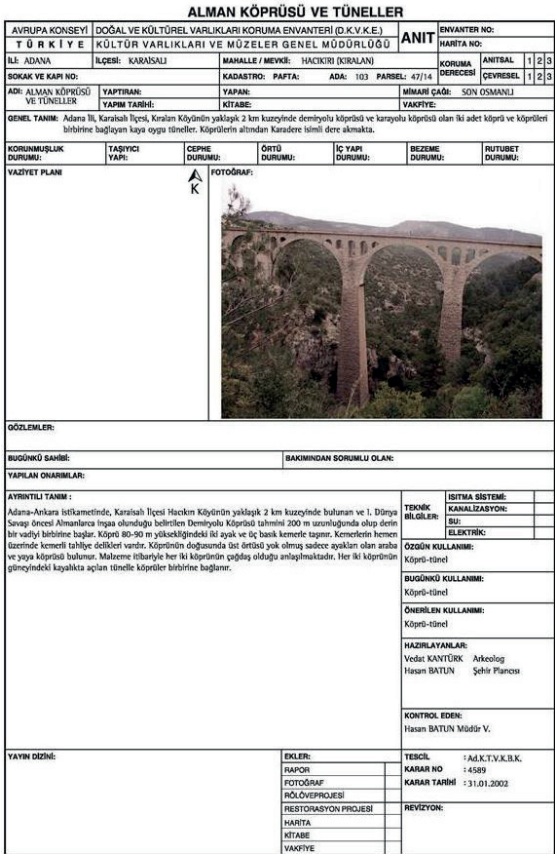


Şekil 10:Adana Deprem Haritası [14]

Sonuç olarak, kentin deprem ve iklim koşulları göz önünde bulundurularak Varda Köprüsü gibi tarihi yapılar, hem doğal afetlere hem de iklimsel koşullara karşı korunaklı hale getirilmelidir. Bu amaçla, düzenli bakım, onarım ve güncel mühendislik tekniklerinin kullanılması büyük önem taşımaktadır. Adana gibi deprem ve iklimsel risklerin yüksek olduğu bölgelerde, bu tür yapılar için özel koruma önlemleri alınması gerekmektedir.

2.4 Varda Köprüsü ve Korunmasıyla İlgili Yapılan Çalışmalar

Kültür Varlıkları ve Müzeleri Genel Müdürlüğü ve Avrupa Konseyi Doğal ve Kültürel Varlıkları Koruma Envaterleri (D.K.V.K.E) tarafından Varda Köprüsü ve yapımındaki bağlantılı tüneller 'ANIT' olarak tescillenmiş ve yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir.[2] (Şekil 11-16).



ALMAN KÖPRÜSÜ VE TÜNELLER

AVRUPA KONSEYİ | DOĞAL VE KÜLTÜREL VARLIKLARI KORUMA ENVANTERİ (D.K.V.K.E.)
T Ü R K İ Y E | KÜLTÜR VARLIKLARI VE MÜZELER GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
ANIT
ENVANTER NO:
HARİTA NO:

İL: ADANA | İLÇESİ: KARAİSALI | MAHALLE / MEVKİ: HACIKIRI (KIRALAN)
KORUMA DERECESİ: ANITSAL 1 2 3 | ÇEVRESEL 1 2 3
SOKAK VE KAPI NO: | KADASTRO: PAFTA: ADA: 103 PARSEL: 47/14
ADI: ALMAN KÖPRÜSÜ VE TÜNELLER | YAPTIRAN: | YAPAN: | MİMARİ ÇAĞI: SON OSMANLI
YAPIM TARİHİ: | KİTABE: | VAKFİYE:

GENEL TANIM: Adana İli, Karaisalı İlçesi, Kıralın Köyünün yaklaşık 2 km kuzeyinde demiryolu köprüsü ve karayolu köprüsü olan iki adet köprü ve köprüleri birbirine bağlayan kaya oygu tüneller. Köprülerin altından Karadere isimli dere akmakta.

KORUNMUŞLUK DURUMU:	TAŞIYICI YAPI:	CEPHE DURUMU:	ÖRTÜ DURUMU:	İÇ YAPI DURUMU:	BEZEME DURUMU:	RUTUBET DURUMU:

VAZİYET PLANI | K | FOTOĞRAF:

GÖZLEMLER:

BUGÜNKÜ SAHİBİ: | BAKIMINDAN SORUMLU OLAN:

YAPILAN ONARIMLAR:

AYRINTILI TANIM :
Adana-Ankara istikametinde, Karaisalı İlçesi Hacıkırı Köyünün yaklaşık 2 km kuzeyinde bulunan ve 1. Dünya Savaşı öncesi Almanlarca inşaa olunduğu belirtilen Demiryolu Köprüsü tahminî 200 m uzunluğunda olup derin bir vadiyi birbirine bağlar. Köprü 80-90 m yüksekliğindeki iki ayak ve üç basık kemerle taşınır. Kemerlerin hemen üzerinde kemerli tahliye delikleri vardır. Köprünün doğusunda üst örtüsü yok olmuş sadece ayakları olan araba ve yaya köprüsü bulunur. Malzeme itibariyle her iki köprünün çağdaş olduğu anlaşılmaktadır. Her iki köprünün güneyindeki kayahkta açılan tünelle köprüler birbirine bağlanır.

TEKNİK BİLGİLER: ISITMA SİSTEMİ: | KANALİZASYON: | SU: | ELEKTRİK:

ÖZGÜN KULLANIM:
Köprü-tünel

BUGÜNKÜ KULLANIM:
Köprü-tünel

ÖNERİLEN KULLANIM:
Köprü-tünel

HAZIRLAYANLAR:
Vedat KANTÜRK Arkeolog
Hasan BATUN Şehir Plancısı

KONTROL EDEN:
Hasan BATUN Müdür V.

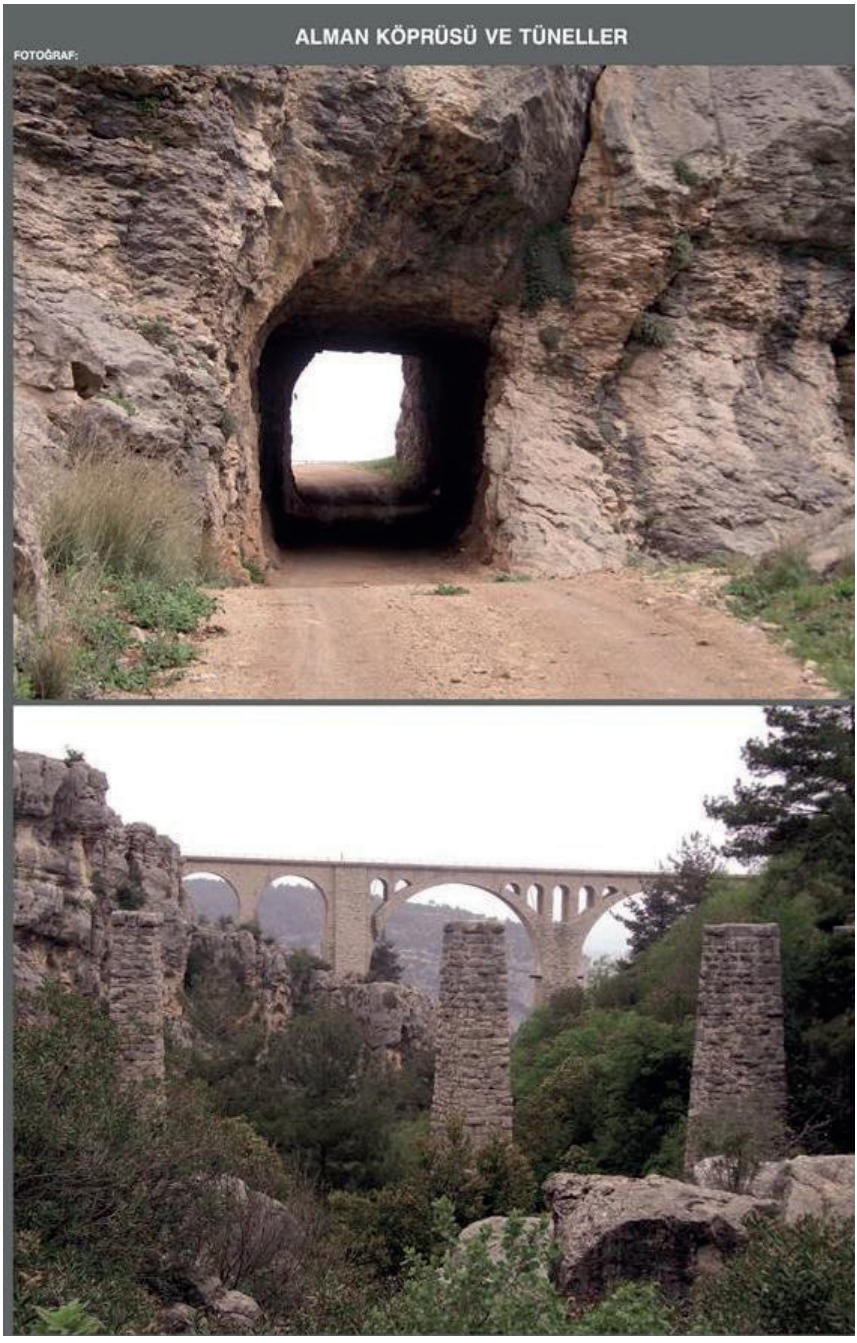
YAYIN DİZİNİ:

EKLER:
RAPOR
FOTOĞRAF
RÖLÖVEPROJESİ
RESTORASYON PROJESİ
HARİTA
KİTABE
VAKFİYE

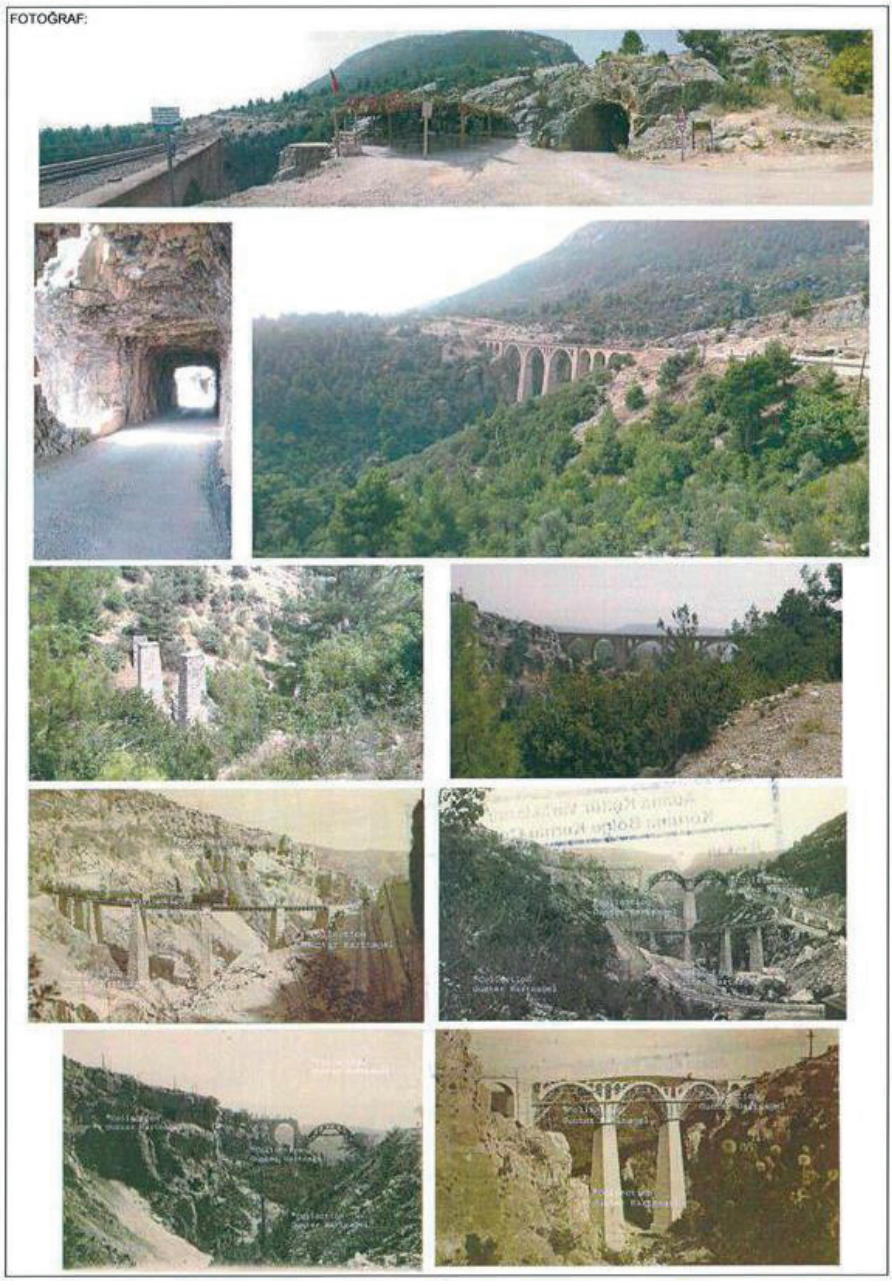
TESCİL : Ad.K.T.V.K.B.K.
KARAR NO : 4589
KARAR TARİHİ : 31.01.2002

REVİZYON:

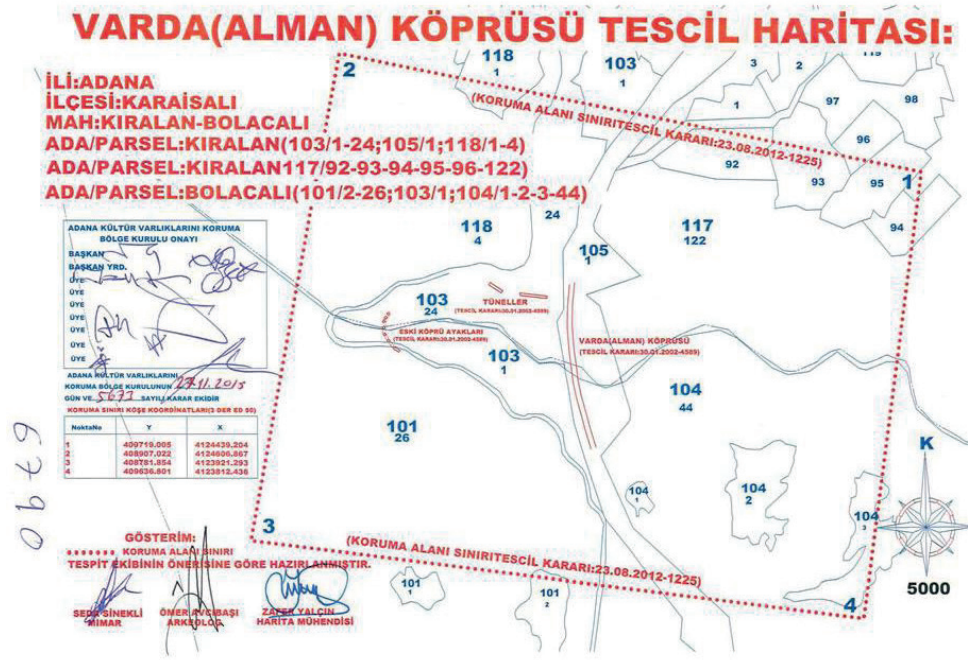
Şekil 11 : Alman Köprüsü ve Tüneller [2]



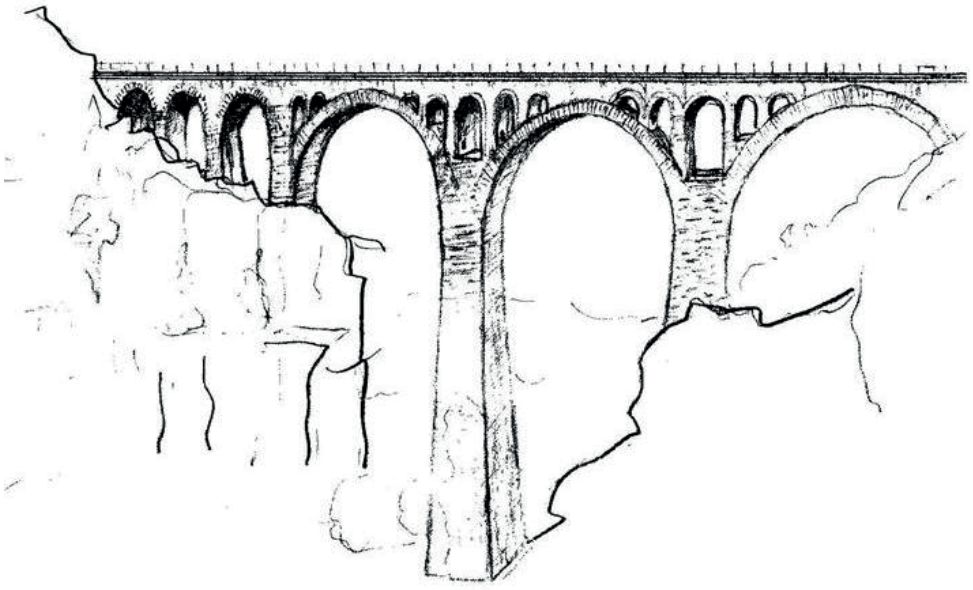
Şekil 12: Alman Köprüsü ve Tüneller[2]



Şekil 13:Alman Köprüsü Tescilli Fotoğraflar[2]



Şekil 14: Varda Köprüsü Tescilli Haritası [2]



Şekil 15 : Varda Köprüsü [2]

AVRUPA KONSEYİ — DOĞAL VE KÜLTÜREL VARLIKLARI KORUMA ENVANTERİ (D.K.V.K.E.) — ANIT — Envanter No: — Harita No:

TÜRKİYE — KÜLTÜR VARLIKLARI VE MÜZELER GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

İLİ: ADANA | İLÇESİ: KARAİSALI | MAHALLE / MEVKİİ: KIRALAN-BOLACALI | Koruma Derecesi | ANITSAL 1 2 3

SOKAK / NO: | PAFTA: | ADA: 105/103 | PARSEL: 1 / 1,24 | ÇEVRESEL 1 2 3

ADI: VARDA (ALMAN) KÖPRÜSÜ, ESKİ KÖPRÜ AYAKLARI VE TÜNELLER | YAPTIRAN: | YAPAN: | MİMARİ ÇAĞI: | YAPIM TARİHİ: | KİTABE: | VAKFİYE:

GENEL TANIM: VARDA (ALMAN) KÖPRÜSÜ (105 ada 1 parsel), ESKİ KÖPRÜ AYAKLARI (103 ada 1 ve 24 parseller) VE 2 ADET TÜNEL (103 ada 24 parsel)

KORUNMUŞLUK DURUMU:	TAŞIYICI YAPI:	CEPHE DURUMU:	ÖRTÜ DURUMU:	İÇ YAPI DURUMU:	BEZEME DURUMU:
A İYİ B ORTA C KÖTÜ	A B C	A B C	A B C	A B C	A B C

VAZİYET PLANI:



FOTOĞRAF:



GÖZLEMLER:

BUGÜNKÜ SAHİBİ: TCDD | BAKIMDAN SORUMLU OLAN: TCDD

YAPILAN ONARIMLAR:

AYRINTILI TANIM:

Adana-Ankara istikametinde Karaisalı ilçesi, Hacıkırı Köyünün yaklaşık 2 km güneyinde bulunan ve I. Dünya Savaşı öncesi Almanlar tarafından inşa edilen 105 ada 1 parselde yeralan Demiryolu Köprüsü (Varda Köprüsü) derin bir vadiyi birbirine bağlar. Köprü iki ayak ve 3 basık kemerle taşınır. Varda Köprüsünün batısında 103 ada 1 ve 24 parselde yeralan bir köprü daha yer almaktadır. Bu köprünün üst örtüsü yok olmuş, yalnızca ayakları mevcuttur. Her iki köprünün de kuzeyinde 103 ada 24 parselde yeralan kayalıkta açılan iki tünel bulunur, bu tünellerle köprüler birbirne bağlanır.

Adana Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu Onayı
Başkan
Başkan Yrd.
Üye
Üye
Üye
Üye
Üye
Üye
Adana Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulunun 27.11.2015 gün 5673 sayılı Karar Ekidir

TEKNİK BİLGİLER: ISITMA SİSTEMİ: | KANALİZASYON: | SU: | ELEKTRİK:

ÖZGÜN KULLANIMI: KÖPRÜ, TÜNEL

BUGÜNKÜ KULLANIMI: KÖPRÜ, TÜNEL

ÖNERİLEN KULLANIMI: KÖPRÜ, TÜNEL

HAZIRLAYANLAR:
Seda SİNEKLİ — Mimar
Ömer AVCIBAŞI — Arkeolog

KONTROL EDEN:
Hasan BATUN
Bölge Kurulu Müdürü

YAYIN DİZİNİ:

EKLER

RAPOR		TESCİL:	
FOTOĞRAF		KARAR NO:	
RÖLÖVE PROJESİ		KARAR TARİHİ:	
RESTORASYON PROJESİ		REVİZYON:	
HARİTA			
KİTABE			
VAKFİYE			

Şekil 16: Varda Köprüsü [2]

3. Sonuç ve Öneriler

Varda köprüsü hem mimarisi hem de ulaşım ağındaki önemli rolü nedeniyle çok önemli bir yere sahiptir. 100 yılı aşkın süredir TCDD A.Ş bünyesindeki görevini başarılı bir biçimde yerine getirmektedir aynı zamanda da tasarımı ile yolcularına görsel şölen sunmaktadır. Varda köprüsü demir yolu mirasın***ın*** da nadide örnekleri arasında yer almaktadır. Bu yüzden, Varda Köprünün orijinal yapısal özelliklerinin korunarak restorasyonunun yapılması, tarihi mühendislik tekniklerinin ve mimari detayların korunması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu, köprünün estetik değerinin yanı sıra, döneminin mühendislik başarılarını ve inşaat tekniklerini de gözler önüne sermektedir. Restorasyon sürecinde kullanılacak modern teknikler, yapının orijinal tasarımına sadık kalınarak, hem güvenlik hem de estetik açıdan başarılı bir sonuç elde edilmesini sağlayacaktır.

4. Kaynakça:

1)http://www.securityistanbul.com/Security-in-Turkey-1087-Varda_Via duct siteye erişim, 19.05.2020 13:06

2)https://adana.ktb.gov.tr/TR-246767/karaisali.html siteye erişim, 19.05.2020 14:03

3)https://www.tripadvisor.com/ShowUserReviews-g297955-d6561108-r410325131-Varda_Alman_Koprusu-Adana_Turkish_Mediterranean_Coast.html siteye erişim, 05.05.2020 03.11

4) https://rayhaber.com/2019/12/muhendislik-harikasi-tarihi-varda-koprusu/ siteye erişim, 11.05.2020 18:18

5) Ilber, O. (1981). Ikinci Abdülhamid Döneminde Osmanli Imparatorlugunda Alman Nüfusu/100. *Dogum Yilinda Atatürke Armagan Dizisi*, *24*.

6) Pektaş, D. İ., & Kümelenmesi, A. R. U. S. Rayli Ulaşim Sistemleri Sektör Analizi 2017.

7) https://en.wikipedia.org/wiki/Varda_Viaduct siteye erişim, 24.04.2020 15:04

8) https://en.wikipedia.org/wiki/Landwasser_Viaduct siteye erişim, 24.04.2020 16:28

9)https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=H&m=ADANA siteye erişim, 14.05.2020 12:25

10) https://web.archive.org/web/20120426072026/http://www.anafot.net/FOTOMAKALE-84-vardaha-koprusu-mustafa-tor siteye erişim,20.05.2020 17.30

11) Cucuzza, R., Aloisio, A., Di Bari, R., & Domaneschi, M. (2024). Vulnerability assessment and lifecycle analysis of an existing masonry arch bridge. *Engineering Structures*, *302*, 117422.

12) Dubina, D., & Dinu, F. (2024, May). Reliability and Durability of Built Environment Under Impact of Climate Natural Hazards. In *International Conference" Coordinating Engineering for Sustainability and Resilience"* ***(pp. 20-36). Cham: Springer Nature Switzerland.***

13) Michalis, P., Mazzoli, C., Karathanassi, V., Kaya, D. I., Martins, F., Cocco, M., ... & Amditis, A. (2024, April). THETIDA: Safeguarding and protecting Europe's coastal and underwater cultural heritage from the effects of climate change and natural hazards. In *EGU General Assembly 2024*.

14) https://www.e-sehir.com/turkiye-haritasi

TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI ANKARA ŞUBESİ
TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI DİYARBAKIR ŞUBESİ
ODEYA ENDAZYARÊN AVAHÎYÊ

KENDİRLİ KİLİSESİ RESTORASYONU: BİR TARİH Mİ ORTAYA ÇIKARILDI, BİR TARİH Mİ YOK EDİLDİ?

Necat ÖZGÜR

Yük. İnş. Müh., İMO TMH Yayın Kurulu, necatozgur@yahoo.com

Özet

Kültür ve Turizm Bakanlığı, Gaziantep Büyükşehir Belediyesi ve Avrupa Birliğinin ortaklaşa gerçekleştirdiği bir projeyle Kendirli Kilisesi'nin restorasyonu 2021 yılında tamamlandı. Bahçesine de tarihi yapıların çevresiyle birlikte korunması ilkesine aykırı olarak Arkeometri Laboratuvarı inşa edildi. Yapıyı şimdi Türk Arkeoloji ve Kültürel Miras Vakfı çatısı altında kurulan Türk Arkeoloji ve Kültürel Miras Enstitüsü işyeri olarak kullanmaktadır. Kendirli Kilisesinin Kurtuluş Savaşımızın Antep Harbi olarak bilinen döneminde işgal güçleri tarafından askeri saldırı merkezine dönüştürülmüş olduğu bilinen bir gerçektir. Bildiri, kilisenin tarihi misyonundaki değişimler göz önüne alınmadan yapılan restorasyonu eleştirmektedir. Aslında yapılan bir restorasyon değil, kullanılmakta olan sapasağlam bir yapının tadilatıdır.

Anahtar Sözcükler: Kendirli, Gaziantep, Restorasyon, Arkeoloji, Kültürel Miras.

Abstract

Restoration of Kendirli Church was completed in 2021 jointly by the Ministry of Culture and Tourism, Gaziantep Greater City Municipality and the European Union. An archaeometry lab was constructed in its garden though historical sites should be protected together with environment. The building is now the office of Turkish Institute of Archaeology and Cultural Heritage. Church was transformed to a military attack centre by occupation forces during the Battle of Antep in Independence War. The paper criticizes restoration whereby changes in the church's historical mission were not considered. It is not a restoration but renovation of a building in service.

Keywords: Kendirli, Gaziantep, Restoration, Archaeology, Cultural Heritage

1. Giriş

Restorasyon konusunda çeşitli yaklaşımlar olmakla birlikte konunun özüne ilişkin bir ortak tanımlama yapmak olasıdır. Restorasyon, kültürel hazinelerin korunması, geleceğe aktarılmasını ve tarihi yapıların harap olan bölümlerinin daha fazla tahrip olmasını önlemek için aslına uygun biçimde yenilemek amacıyla yapılan çalışmalardır.

Venedik Tüzüğü tarihî yapıların korunması ve restorasyonu hakkında uluslararası bir çerçeve belirleyen, Mayıs 1964'te kabul edilmiş bir anlaşmadır. Eski Eserler ve Anıtlar Yüksek Kurulu'nun 24 Eylül 1967 tarih ve 3674 sayılı kararı ile kabul edilmiştir.Amacı, bir anıtın estetik ve tarihi değerini korumak ve ortaya çıkarmaktır. Anlaşmanın içinden seçilmiş önemli maddeler aşağıda sunulmaktadır (alt çizgiler yazar tarafından yapılmıştır):

Madde 1. Tarihi anıt kavramı sadece bir mimari eseri içine almaz, bunun yanında belli bir uygarlığın, önemli bir gelişmenin, tarihi bir olayın tanıklığını yapan kentsel ya da kırsal bir yerleşmeyi de kapsar. Bu kavram yalnız büyük sanat eserlerini değil, ayrıca zamanla kültürel anlam kazanmış daha basit eserleri de kapsar.

Madde 3. Anıtların korunmasında ve onarılmasındaki amaç, onları bir sanat eseri olduğu kadar, bir tarihi belge olarak da korumaktır.

Madde 4. Anıtların korunmasındaki temel tutum, korumanın kalıcı olması, sürekliliğin sağlanmasıdır.

Madde 6. Anıtın korunması, ölçeği dışına taşmamak koşuluyla çevresinin de bakımını içine almalıdır. Kütle ve renk ilişkilerini değiştirecek hiçbir yeni eklentiye, yok etmeye, ya da değiştirmeye izin verilmemelidir.

Madde 7. Bir anıt, tanıklık ettiği tarihin içinde bulunduğu ortamın ayrılmaz bir parçasıdır. Anıtın tümünün ya da bir parçasının başka bir yere taşınmasına -anıtın korunması bunun gerektirdiği ya da çok önemli ulusal veya uluslararası çıkarların bulunduğu durumlar dışında izin verilmemelidir.

Madde 8. Anıtın tamamlayıcı öğeleri sayılan heykel, resim gibi süslemeler ancak bunları korumanın başka çaresi yoksa kaldırılabilir.

Madde 11. Anıta mal edilmiş farklı dönemlerin geçerli katkıları saygı görmelidir; zira onarımın amacı üslup birliği değildir. Bir anıt üst üste çeşitli dönemlerin izlerini taşıyorsa, alttaki dönemleri açığa çıkarmak ancak bazı özel durumlarda -yok edilen malzemenin önemi azsa, açığa çıkarılan malzeme büyük tarihi, arkeolojik ya da estetik değer taşıyorsa ve korunma durumu böyle bir davranışı gerekli gösterecek kadar iyi ise haklı çıkarılabilir. İlgili unsurların öneminin değerlendirilmesi ile ilgili yargıyı ve neyin yok edileceği üzerinde kararı vermek, sadece bu işi üzerine almış kimseye bırakılamaz.

Madde 16. Bütün koruma, onarım ve kazı işlerinde her zaman çizim ve fotoğraflarla açıklık kazanmış çözüm getirici ve eleştirici raporlar halinde kesin belgeler hazırlanmalıdır.

Temizlemenin, sağlamlaştırmanın, yeniden düzenlemenin ve birleştirmenin her safhası

-çalışma sırasında ortaya çıkan, tanımlanmış biçimsel ve teknik özellikler göz önünde tutularak raporda gösterilmelidir. Bu belgeler bir resmi kurumun arşivine konmalı ve araştırıcılar bundan yararlanabilmelidir. Bu raporların yayınlanması tavsiye edilir.

Kendirli Kilisesinde yapılmış restorasyon yukarıdaki ilkelerin ışığı altında inclenecektir.

2. KENDİRLİ KİLİSESİ

2.1. Yapım Dönemi

Kendirli Kilisesi Kent merkezinde, Atatürk Bulvarı üzerinde bulunmaktadır. Kilisenin ilk yapım yılı 1860'dır. Gaziantepli Katolik Ermeniler kilisenin yapımında maddi yönden zorlandıklarından Fransa Kralı III. Napolyon'dan, Fransız misyonerlerinden ve Katolik topluluğundan maddi destek alınarak yapılmıştır. Ancak, kısa zaman sonra kullanılmaz hale gelen kilisenin yeniden yapılması için geniş kapsamlı yardım kampanyası düzenlenmiştir. Eski kilise yıkılarak yerine 1898 yılında şimdiki kilisenin inşasına başlanmış, ya-

pımı iki yıl sürmüş ve 1900 yılında büyük bir törenle açılışı yapılmıştır. Kilisenin planı Roma'daki San Francesco Kilisesi'nden örnek alınmış, Papalık makamından gönderilmiştir. Kilise geniş bir bahçe içerisinde siyah kesme taştan temel üzerine, beyaz kesme taştan yapılmıştır. Dikdörtgen planlı ve kırma çatılıdır. Üç basamakla giriş kapısına ulaşılmaktadır. (Resim 1)



Resim1:Kendirli kilisesi Genel Görünümü,1900 yılı

Yapıda kullanılan geleneksel kıymık taşı Gaziantep çevresindeki kireçtaşı (kalker) ocaklarından temin edilmiştir. Romanesk mimari tarzı yapıya sahip olan kilise, son restorasyondan sonra günümüzde Arkeoloji ve Kültürel Miras Enstitüsü'nün işyeri olarak kullanılıyor.

2.2. Antep Harbinde Kendirli Kilisesi

Öncelikle Antep Harbine ilişkin bir genel bilgi vermek gerekmektedir.

Birinci Dünya Savaşını bitiren 30 Ekim 1918 Mondros Mütarekesinden kısa bir süre sonra İngiliz askeri Antep'e girmiştir. Direnmeden o zaman boyun eğen halk, iki galip devletin aralarında daha 1916 yılında yaptıkları -imzacı subayların adlarıyla tanınan- gizli Sykes-Picot Anlaşmasıyla kenti devralacak olan Fransızlara bu kez geçit vermeyecektir.

İşgalciler halkı küçümsedikleri için, devir-teslimde gerekli güvenlik önlemlerini almazlar. İşgal eziyeti ve aşağılanmasını yaşamış olan ahali 1920 yılının Nisan ayı başında İngilizler terk ettikten sonra Antep'e girmeye kalkan Fransızlara karşı ayaklanma başlatır, kentin denetimini ele geçirerek, Fransız askerini sokmaz.

Fransa Suriye'den getirdiği yeni kuvvetler ve Ermeni birlikleriyle kenti kuşatacaktır. İşgalciler Amerikan Koleji ve Kendirli Ermeni Katolik Kilisesinde üslenir. Makineli tüfekler kuşatma altındaki halka bu yapılardan ölüm saçar. Kilisenin duvarlarındaki mermi delikleri o günlerin simgesidir. Milislerin karargâhı da Bekir Bey ve Karagöz camileridir. Şire Hanın duvarları ile İmam Çağdaş Lokantasının karşısındaki (Dulkadiroğlu Beyinin adını taşıyan) Alaüddevle (halk arasındaki adıyla Ali Dola) camisinin minaresindeki izler, Fransız mermi ve şarapnellerinden kalmadır.

Antep direnişi başlayınca Mustafa Kemal Kılıç Ali'yi örgütlenme konusunda görevlendirir. Milislerin önderleri Karayılan (Molla Mehmet) ve Yüzbaşı Şahin Bey savaşın başlarında ne yazık ki şehit düşmüştür. Karayılan ile Şahin Bey'den sonra direnişin diğer önderi Binbaşı Özdemir göreve gelir. Unutmamalı ki yalnız Türkler değil, tüm halk direnmektedir. Ülkemizde etnik köken henüz bir kamplaşma konusu yapılmamıştır. Antep kahramanlarından Karayılan Besnili bir Kürt beyinin oğlu, Özdemir Bey bir Çerkez'dir. Kurtuluş Savaşının ilk kurşununu 16.05.1919'da İzmir'de atan Hasan Tahsin de Sabetayist yani Yahudi kökenli bir yurtseverdir. Böyle bir mozaik, tüm Türkler ülkeye sahip çıkmaktadır. [1]

Kendirli Kilisesi ile Amerikan Kolejinin Fransız İşgal Güçleri tarafından karargah olarak kullanılmış oldukları o tarihten beri Gaziantep kamuoyunun bilgisi içindedir. 2021 yılında yapıyı restore ederek yeniden kilise formuna dönüştürenler de de bunu utangaç bir biçimde şöyle ifade etmektedirler:

".. 1920-1921 yılları arasında 10 ay süren Antep Kuşatması sırasında 'siper' olarak kullanılan yapı, sonradan sinema, halkevi ve öğretmenevi olarak hizmet verdi. .." [2]

2.3. Kurtuluştan Sonra Kendirli Kilisesi

Savaşta düşman tarafından dinsel niteliğinden uzaklatırılarak saldırı karargahı olarak kullanılan kilise kurtuluştan sonra öğretmenevi ve Halkevi olarak değerlendirilir. Sonradan Belediye Kültür Merkezi olarak 2019'a dek görev yapacaktır.

M. Kemal 1933 yılındaki ziyeretinde halka ünlü söylevini binanın yan balkonundan vermiştir. Bu nedenle Eski Öğretmenevi binası, Gazi Mustafa Kemal'in Gaziantep'e geldiği 26 Ocak tarihinde düzenlenen kutlamaların ve yürüyüşün son durağı olmaktadır.

Daha da ayrıntıya girmek gerekirse, Yapı önce Öğretmen Okulu olarak hizmet vermiş daha sonra Milli Eğitim Müdürlüğü'ne bağlı olarak Öğretmenevi Lokali olarak ve Toplantı Salonu olarak işlevlendirilmiştir.

Uzun yıllar Milli Eğitim Bakanlığı'na bağlı kalan Kendirli Kilisesi son olarak Turizm Otelcilik Meslek Lisesi olarak hizmet vermiştir. Lisenin taşınmasının ardından yapı, Gaziantep Büyükşehir Belediyesi tarafından devralınmıştır.

Kendirli Kilisesi, 2013 yılında Gaziantep Büyükşehir Belediyesi tarafından restore edilerek "Kendirli Gazi Kültür Merkezi" adıyla toplumsal yaşama kazandırılır. Yapının bir tarihsel belge olarak korunması ve gelecek kuşaklara son işleviyle aktarılması hedeflenmiştir. Çalışmalarda Antep'in kurtuluşu mücadelesinin izleri olan mermi delikleri korunmuştur.

Anıtsal nitelikte olması nedeniyle yapısal bir müdahaleden kaçınılmıştır. Yapının ana beden duvarları sadece yıkanarak temizliği ve çevresel atıklardan arınması sağlanmıştır. İç mekanda ise dekorasyon niteliğinde basit müdahaleler yapılmıştır.

Kilisenin ana mekanı duvarla ikiye bölünmüş, Apsis bölümü sahne biçimine dönüştürülmüştür. 1938'de görevle Gaziantep'e gelip kent yaşamı ve tarihinin işlendiği resimler yaptığı bilinen Feyhaman Duran'ın tabloları 2019'a dek Gaziantep Kültür Merkezi salon ve koridorlarının duvarlarını süslemiştir. (Resim 2)



Resim 2: Feyhaman Duran'ın tablolarıyla süslenmiş Gaziantep Kültür Merkezinin içi

16 Mart 2013'te halka açılan Yapıdaki ana tema Antep Harbi canlandırması olmuştur. Duvar panolarında ise yapının tüm geçmişi anlatılmaktadır. Canlandırmanın içeriğinde Gaziantep'in Kurtuluş serüveninin üç boyutlu ve hareketli sunumunun yanı sıra bir Atatürk Animatronik Robotu ile özel bir gösteri bulunmaktadır. Efektler ile özel ses ve görüntü teknikleri profesyonelce uygulanmıştır.

3. Yeni Restorasyon Süreci

"Türk Arkeoloji ve Kültürel Miras Enstitüsü" adıyla AB Katılım Öncesi Mali Yardım Aracı II (IPA II) Projesi kapsamında Kültür ve Turizm Bakanlığı ve Gaziantep Büyükşehir Belediyesi ortaklığında 2019 yılında bir arkeoloji enstitüsü kurulmuştur. Ocak 2019-Haziran 2022 tarihleri arasında yürütülen bu Proje kapsamında Enstitü binası olarak hizmet verecek Kendirli Kilisesi restorasyonu tamamlanmıştır.

Enstitü, içerisinde arkeometri laboratuvarı da bulunan ilk arkeoloji kuruluşudur, 02/03/2023 tarihli ve 7439 sayılı Kanunla kurulan Türk Arkeoloji ve Kültürel Miras Vakfı bünyesinde faaliyetlerini yürütmektedir.

Derin bir tarihsel anlam taşıyan yapıyı bir devlet dairesi benzeri işyerine dönüştürmek için restorasyon adı altında, dinsel duyarlılık öne çıkarılarak AB fonları devreye sokulmuştur. Tapınak işlevinden kendi topluluğunun ira-

desiyle yüz yirmi dört yıl önce uzaklaştırılmış olan Kendirli Kilisesi, ayakta sapasağlam biçimde bir başka tarihsel işlev görmekteyken özgün durumuna dönüştürülme adı altında bir ofis binası gereksinimini karşılamak üzere renove edilmiştir. (Resim 3)



Resim 3:Gazi Kültür Merkezinin Renovasyon Sonrasında İşyerine Dönüşmesi

Yapı dönüştürülürken, çevresiyle birlikte korunma ilkesine de uyulmamış, bahçesine laboratuvar binası eklenmiştir. (Resim 4)



Resim 4: Kendirli Kilisesinin Bahçesindeki YeniYapı

Tarihe saygısız bir restorasyon mantığıyla Gazi Kültür Merkezi bahçesinde 1935 yılından beri yer alan Şehitler Abidesi'nin de yapıyla ilişkisi kopmuştur. (Resim 5)



Resim 5: Restorasyon sonucunda yapıyla ilişkisi koparılan Şehitler Abidesinin girişi

4. Sonuç

Venedik Tüzüğü Madde 3'e göre "Anıtların korunmasında ve onarılmasındaki amaç, onları bir sanat eseri olduğu kadar, bir tarihi belge olarak da korumaktır." Ne yazık ki 2019 yılında başlatılan restorasyon süreci Kendirli Kilisesinin tarihsel belge niteliğini yok ederek basit bir işyerine dönüştürmüştür.

1938'de görevle Gaziantep'e gelip kent yaşamı ve tarihinin işlendiği resimler yaptığı bilinen Feyhaman Duran'ın tabloları 2019'a dek Gaziantep Kültür Merkezi salon ve koridorlarının duvarlarını süslerdi; şimdi kim bilir nerelerdedir?

Venedik Tüzüğü Madde 6'ya göre "Anıtın korunması, ölçeği dışına taşmamak koşuluyla çevresinin de bakımını içine almalıdır. Kütle ve renk ilişkilerini değiştirecek hiçbir yeni eklentiye, yok etmeye, ya da değiştirmeye izin verilmemelidir." Ne yazık ki anıtın bahçesine yeni bir yapı kondurulmuştur. Antep Harbinin simgeleştirildiği bir kent parçası anlamından çıkarılmış, sıradan bir ofis yerleşkesine dönüştürülmüştür.

Venedik Tüüzüğü Madde 7'ye göre "Bir anıt, tanıklık ettiği tarihin içinde bulunduğu ortamın ayrılmaz bir parçasıdır." Düşmanın saldırı karargâhı yaptığı kilisesini biz atalarımızın uygun gördüğü kullanım biçiminden çıkararak yüz küsur yıl sonra yenileyip yeniden sözde kiliseye çevirdik. "Sözde" dememin nedeni, yenilenen yapının kilise olarak değil, ilgisiz bir ofis olarak kullanılacağı gerçeğidir.

Bilemiyorum, bir tarih mi silindi, bir tarih mi ortaya çıkarıldı?

Ne yazık ki, bir tarih ortaya çıkarılmamış, bir tarih yok edilmiştir. Restorasyonu yapanlar da bunun bilincindedir; yapıyı özgün amacı doğrultusunda kullanımı yerine dinsel tapınakla ilgisi olmayan bir işyerine dönüştürmüşlerdir.

Kaynaklar

[1] Özgür, N, 4 Nesilden Yansımalar, İstanbul, 2016

[2] https://www.arkeolojikhaber.com

Resimler Google Görsellerinden alınmıştır.

HEKİMOĞLU ALİ PAŞA TÜRBESİ'NİN MEVCUT DURUM TAHKİKİ VE TAŞIYICI KEMERE TAKVİYE ÖNERİSİ

Erdinç Önen

İnşaat Mühendisi, beonen@gmail.com

Özet

Fatih ilçesi Davut Paşa mahallesinde yer alan türbe, I. Mahmud'un sadrazamlarından Hekimoğlu Ali Paşa tarafından 1730 – 1754 yılları arasında Çuhadar Ömer Ağa ve Hacı Mustafa Ağa adında iki mimara yaptırılmıştır. Makalede, tarihi değere sahip bu değerli yapının mevcut yapısal durum değerlendirmesi yapılarak gerekli görülen takviyeler önerilmiştir. Özellikle yapının ortasında bulunan ve beklenen depremde dayanımı sınır değerlere ulaşması ve hatta aşması öngörülen mevcut kemerin takviyesi için önerilen yine aynı malzemeden yapılacak takviye bir kemere dikkat çekilmiştir.

Anahtar kelimeler; Hekimoğlu Ali Paşa Türbesi, Güçlendirme, Kültürel Miras, Yığma Yapı

Current Structural Situation Assessment of Hekimoğlu Ali Pasha Tomb and Reinforcement Recommendations

Abstract

The tomb, located in the Davut Pasha neighborhood of Fatih district, was built by two architects named Çuhadar Ömer Ağa and Hacı Mustafa Ağa between 1730 and 1754 by Hekimoğlu Ali Pasha, one of the grand viziers of Mahmud I. In the article, the current structural condition of this valuable historical building was evaluated and necessary reinforcements were suggested. Particular attention was drawn to an additional belt made of the same material, which is recommended for the reinforcement of the existing belt, which is located in the middle of the building and whose strength is expected to reach or even exceed the limit values in the expected earthquake.

Keywords; Hekimoğlu Ali Pasha Tomb, Reinforcement, Cultural Heritage, Masonry Structure

1. Giriş

Türbenin Caddeye bakan cephesi, yapıya sonradan eklenmiş olan çatı saçağına kadar mermer ile kaplıdır (Resim 2, 4). Taşıyıcı beden duvarları ise 1 sıra taş ve 2 sıra tuğladan oluşan almaşık örgü ile inşaa edilmiştir (Resim 1, 2, 3, 4, 5, 6).

İç cephe sıva ile kaplanmıştır. Yine iç kısmın ortasındaki taşıyıcı kemer ise kesmetaş örgüdür. Kubbeye geçiş tromplarla sağlanmıştır, trompların altları mukarnas konsolludur (Resim 7, 8). Yapının eski fotoğraflarında görüldüğü üzere kubbe tuğla örgülüdür (Resim 1, 2).

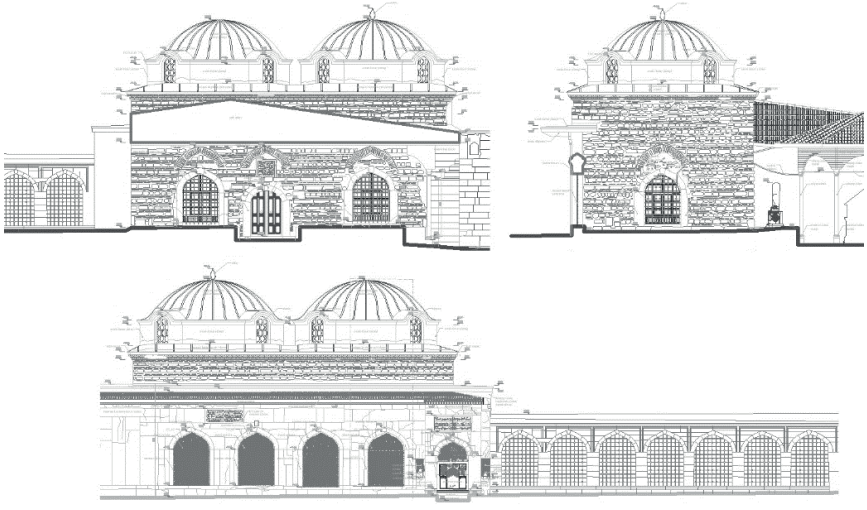


Resim 1- Bahçeden eski bir görünüş



Resim 2- Yol tarafından eski bir görünüş

Giriş cephesi ve girişin sol yan duvar kalınlığı 110cm, caddeye bakan duvar ve sağ yan duvar kalınlığı, mermer kaplama hariç, 82cm'dir. Yaklaşık 6,0 metre çapındaki basık kubbenin kalınlığı yaklaşık 40 cm'dir. Kubbenin iç yüzeyi çimento esaslı sıva tabakası ile dış yüzeyi ise kurşun kaplama ile örtülüdür (Resim 4). Yapı duvarlarında ve kubbede kılcal çatlaklar dışında belirli bir hasara veya oturmaya rastlanmamıştır.



Resim 3- Çizim- bahçeden yol tarafından ve yandan görünüşler

Önen



Resim 4- Yol tarafından görünüş



Resim 5- Bahçeden görünüşler



Resim 6, 7- Türbenin ortasında bulunan kemer ve kubbeler

2. Malzeme

Doğal taş veya tuğlanın, bir bağlayıcı harçla beraber kullanılması ile oluşan yapım tarzına kârgir (yığma) adı verilir. Çevre şartlarına ve zamanın ilerlemesiyle oluşan yaşlanma etkilerine göre de farklı özellikler gösterebilen kâgir malzemenin basınca karşı davranışı iyi sayılırken, kesmeye ve çekmeye karşı zayıftır. Taşıyıcı yığma duvarların mukavemeti, bağlayıcı harcın mukavemetine eşdeğer kabul edilebilir, zira oluşan yükler karşısında tuğla veya taş birimlerden önce harç güç tükenmesine erişir [3].

Taşıyıcı duvarlar 1 sıra taş ve 2 sıra tuğladan oluşan almaşık örgü, kubbe ise tuğla örgüdür. Kemerin malzemesi kesme taştır. Yığma yapı elemanlarının harç ile birlikte tek bir malzeme özelliği gösterdiği kabul edilerek, Elastisite modülü ve birim ağırlık kabulleri yapılmıştır. Taşıyıcı elemanların dayanım değerleri, 2017 Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetim Kılavuzu'nda [5] bulunan malzeme özellikleri tablosu (Tablo 3a, 3b) ile kıyaslanarak 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nden (TBDY) alınmıştır [10] (Tablo 1, 2, 3, 4);

Tablo 1- Kargir Birimlerin Delik Oranlarına Göre Gruplandırılması (TBDY Tablo 11.1)

Kargir Birim Cinsi(*)	Grup I	Grup II
Tuğla	$\alpha \leq \%35$	$\%35 < \alpha \leq \%50$
Beton	$\alpha \leq \%35$	$\%35 < \alpha \leq \%50$

Tablo 2- Yığma Taşıyıcı Duvarların Karakteristik Basınç Dayanımı, fk (TBDY Tablo 11.2)

Birim-Birim Sınıfı	Harç sınıfı	Harç basınç dayanımı, f_m (MPa)*	Kargir birim basınç dayanımı, f_b (MPa)					
			5	10	15	20	25	30
Grup I	Genel amaçlı harç	M10-M20	3.4-4.2	5.5-6.8	7.3-9.0	8.9-11.0	10.4-12.9	11.9-14.6
		M2.5-M9	2.2-3.3	3.6-5.3	4.8-7.1	5.9-8.7	6.9-10.1	7.8-11.5
		M1-M2	1.7-2.1	2.8-3.4	3.7-4.5	4.5-5.5	5.2-6.4	5.9-7.3
Grup II ve Kesme taş		M10-M20	2.8-3.4	4.5-5.5	6.0-7.4	7.3-9.0	8.5-10.5	9.7-12.0
		M2.5-M9	1.8-2.7	3.0-4.4	3.9-5.8	4.8-7.1	5.6-8.3	6.4-9.4
		M1-M2	1.4-1.7	2.3-2.8	3.0-3.7	3.7-4.5	4.3-5.3	4.9-6.0

Tablo 3- Duvarların Başlangıç Kesme Dayanımları, fvko (MPa) (TBDY Tablo 11.3)

Kargir birim	Genel amaçlı harç(*)		İnce tabaka harç
Tuğla	M10-M20	0.30	0.30
	M2.5-M9	0.20	
	M1-M2	0.10	
Beton	M10-M20	0.20	0.30
Gazbeton	M2.5-M9	0.15	0.30
Doğal veya Yapay Taş	M1-M2	0.10	Kullanılamaz

Tablo 3a- Yığma duvar malzemesinin mekanik özellikleri (TYDRY Tablo 6.1; Magenes, Penna, 2009)

Duvar türü	Basınç dayanımı f_m (MPa)	Kayma dayanımı τ_o (kPa)	Elastisite modülü E (MPa)	Kayma modülü G (MPa)	Birim hacim ağırlığı w (kN/m³)
Moloz taşlı yığma duvar	0.6~0.90	20~32	690~1050	115~175	19
Kaba yonu taşlı yığma duvar	1.1~1.6	35~51	1020~1440	170~240	20
Kesme taşlı iyi bağlantılı yığma duvar	1.5~2.0	56~74	1500~1980	250~330	21
Yumuşak taşlı (kalker, tüf) yığma duvar	0.8~1.2	28~42	900~1260	150~210	16
Düzgün kesme taşlı, sıvalı yığma duvar	3.0~4.0	78~98	2340~2820	390~470	22
Kireç harçlı tuğla yığma duvar	1.8~2.8	60~92	1800~2400	300~400	18

Tablo 3b- Yığma duvar malzemesinin Tablo 6.1.de verilen mekanik parametrelerine harç, duvar işçiliğine ve duvarın enine bağlantılarının özelliklerine bağlı kullanılabilecek düzeltme katsayıları (TYDRY Tablo 6.2)

Duvar düzeni	İyi bağlayıcı harç	İyi düzenlenen derzli duvar	Enine bağlantılı duvar	Harç enjeksiyonlu duvar	Donatılı sıva ile güçlendirilmiş duvar
Moloz taşlı yığma duvar	1.5	1.3	1.5	2.0	2.0
Kaba yonu taşlı yığma duvar	1.4	1.2	1.5	1.7	2.0
Kesme taşlı iyi bağlantılı yığma duvar	1.3	1.1	1.3	1.5	1.5
Yumuşak taşlı (kalker, tüf) yığma	1.5	-	1.5	1.7	2.0
Düzgün kesme taşlı, sıvalı yığma duvar	1.2	-	1.2	1.2	1.2

Tablo 4- Analizde kullanılan malzeme değerleri

Taşıyıcı Elemanların Fiziksel Değerleri	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği		Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetim Kılavuzu (Tablo 6.1, 6.2; Magenes, Penna, 2009)	
	Tuğla ve taş örgü duvar	Kesme taş kemer	Tuğla ve taş örgü duvar	Kesme taş kemer
(TDBY Tablo 11.1) Kargir Birimlerin Delik Oranına Göre Gruplandırılması	Grup I			
(TDBY Tablo 11.2) Harç basınç dayanımı, f_m (MPa)	M1 - M2	M1 - M2		
(TDBY Tablo 11.2) Kargir birim basınç dayanımı, f_b (MPa)	5,00	12,50		
(TDBY Tablo 11.2) Yığma Taşıyıcı Duvarların Karakteristik Basınç Dayanımı, f_k (MPa)	1,90	2,55	1,80	2,20
(TDBY Tablo 11.3) Duvarların Başlangıç Kesme Dayanımları, f_{vko} (MPa)	0,10	0,10		
(TDBY 11.2.9) Duvar karakteristik kesme dayanımı, Denk.11.1; $f_{vk} = f_{vko} + 0.4\sigma_d \leq$	0,50	1,25		
(TDBY 11.2.13) Esneklik Sabiti - Taşıyıcı duvarların elastisite modülü, $E_{duv} = 750f_k$	1425	1913		
(TDBY 11.2.13) Duvar kayma modülü, $G_{duv} = \%40E_{duv}$ (Mpa)	570	765		
Kütle Yoğunluğu - Özkütle (kg/m3)	1800	2520		
Poisson Oranı	0,20	0,20		

3. Model ve Mevcut Durum Tahkiki

Bu safhada öncelikle yerinde incelemeler ve geometrik olarak gözlemler yapılmış, yapının taşıyıcı sistemi ve yük aktarımının hangi elemanlar vasıtasıyla gerçekleştiği incelenmiştir. Sayısal modellemenin amacı, yapının tamamının, belli bir bölümünün ya da taşıyıcı sistem elemanlarının çeşitli yük veya çevresel etkiler altında gerçek davranışının belirlenmesini sağlamaktır. Sayısal analizlerle Elde edilen gerilme dağılımı davranış hakkında bilgiler verir, ancak modelden elde edilen gerilme değerleri mutlak veri olarak tanımlanamaz. Tarihi yapıların ve anıtların taşıyıcı sistemi çoğunlukla çok karmaşıktır. Bu nedenle, yapıyı modellemek için birçok sadeleştirmenin yapılması zorunludur. En doğru sonucu veren model her zaman en basit olanıdır. Doğrusal analiz veya malzemenin doğrusal elastik davranışı, taşıcıyı sistem elemanlarında meydana gelen şekil değiştirmenin sadece uygulanan yükün şiddeti ilgili olduğu anlamına gelir ve aşağıdaki kabullere dayanır;

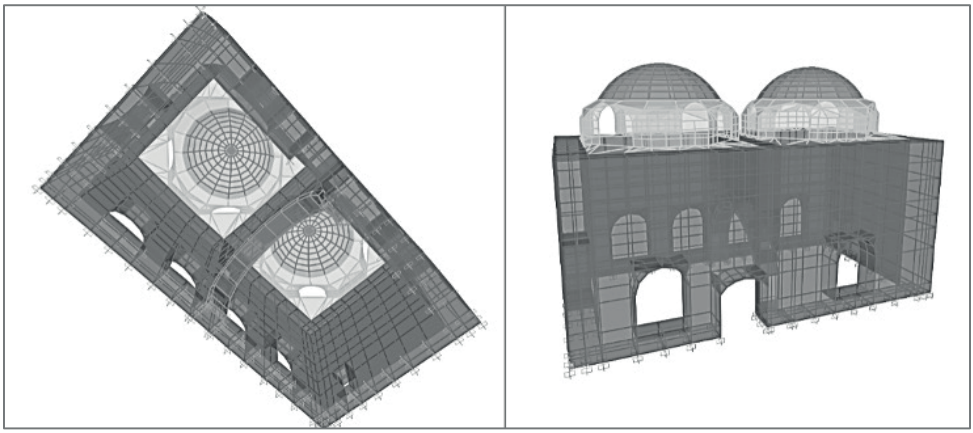
1.Gerilmenin şiddeti arttıkça, bunun sonucunda ortaya çıkan birim şekil değiştirme miktarı da doğrusal oranda artar,
2. Gerilmenin şiddeti azaldıkça, birim şekil değiştirme miktarı da aynı doğrusal oranda azalır,
3. Malzeme homojen ve süreklidir.

Birçok malzeme için küçük gerilme değerlerinde doğrusal gerilme-birim şekil değiştirme kabulü geçerlidir. Yığma yapı elemanları da genellikle, izotropik doğrusal elastik malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak modellenirler [20].

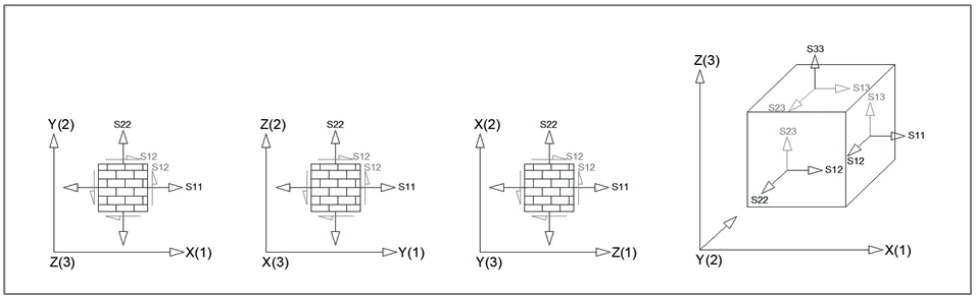
Yapının duvarları katı eleman, kubbeleri ise alan eleman olarak SAP2000 programı ile modellenmiştir (Resim 9, 9a). Makalede yapılan analiz ve değerlendirmelerde 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY Bölüm 11 Deprem Etkisi Altında Yığma Bina Taşıyıcı Sistemlerinin Tasarımı İçin Özel Kurallar) [10] ile 2017 Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetim Kılavuzu'ndan da yararlanılmıştır [5].

2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre yığma, ahşap ve hafif çelik binalar, DD-2 deprem yer hareketinin etkisi altında Kontrollü Hasar (KH) performans hedefini sağlayacaktır (TBDY Bölüm 3.5.1.2). DD-2 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %10 ve

buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu seyrek deprem yer hareketini nitelemektedir (TBDY Bölüm 2.2.2). Bu düzey, can güvenliğini sağlamak üzere bina taşıyıcı sistem elemanlarında çok ağır olmayan ve çoğunlukla onarılması mümkün olan hasar düzeyine karşı gelmektedir (TBDY Bölüm 3.4.3) [10].



Resim 9- Yapının Modeli



Resim 9a- Kabuk elemanlarda gerilmeler; S11 yatay eksen doğrultusundaki gerilmeleri, S22 düşey eksen doğrultusundaki gerilmeleri, S12 ve S21 ise kayma gerilmelerini gösterir. Katı elemanlarda gerilmeler; S11- X yönündeki depremlerde X ekseni doğrultusundaki gerilmeleri, S22- Y yönündeki depremlerde Y ekseni doğrultusundaki gerilmeleri, S33 ise düşey gerilmeleri ifade eder. Negatif gerilme değeri basınç gerilmesini, pozitif değer ise çekme gerilmelerini gösterir. S13-S23 kayma gerilmeleridir ve negatif veya pozitif olmaları sadece kaymanın yönüyle ilgilidir.

Analizde kullanılan Eşdeğer deprem yükü yöntemi, yüklerin hesabında yapı ve zemine ilişkin periyot değerleri gibi dinamik parametrelerin kullanılması nedeniyle, sadece birinci modun dikkate alındığı dinamik bir yöntem olarak kabul edilir ve sadece Yönetmelikte belirtilen, yapımızın da bu şartlara uyduğu, aşağıdaki bina sınıfları için kullanılabilir [4];

i. Yapının Kullanım Sınıfı, BKS=2 (Tablo 5a, TBDY Tablo 3.1),
ii. Deprem Tasarım Sınıfı, DTS=1 (SDS=1,107>0,75, Tablo 5b, TBDY Tablo 3.2)
iii. Bina Yükseklik Sınıfı, BYS=7 (Kubbe yüksekliği=10,50mt, Tablo 5c, TBDY Tablo 3.3)
iv. Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi 'nin Uygulanabileceği Binalar (Tablo 6, TBDY Tablo 4.4)

Mevcut durum değerlendirmesi yapılırken, gerilmeler R katsayısı ile azaltılmış deprem etkilerinden, yer değiştirmeler ise azaltılmamış deprem etkilerinden elde edilir [5] (Tablo 9, 10).

Tablo 5a- Bina Kullanım Sınıfları ve Bina Önem Katsayıları (TBDY Tablo 3.1)

Bina Kullanım Sınıfı	Binanın Kullanım Amacı	Bina Önem Katsayısı (I)
BKS = 2	**İnsanların kısa süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar** Alışveriş merkezleri, spor tesisleri, sinema, tiyatro, konser salonları, ibadethaneler, vb.	1.2

Tablo 5b- Deprem Tasarım Sınıfları (DTS) (TBDY Tablo 3.2)

DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyinde Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı (S_{DS})	Bina Kullanım Sınıfı	
	BKS = 1	BKS = 2, 3
$0.75 \le S_{DS}$	DTS = 1a	DTS = 1

Önen

Tablo 5c- Bina Yükseklik Sınıfları ve Deprem Tasarım Sınıflarına Göre Tanımlanan Bina Yükseklik Aralıkları (TBDY Tablo 3.3)

Bina Yükseklik Sınıfı	Bina Yükseklik Sınıfları ve Deprem Tasarım Sınıflarına Göre Tanımlanan Bina Yükseklik Aralıkları [m]		
	DTS = 1, 1a, 2, 2a	DTS = 3, 3a	DTS = 4, 4a
BYS = 7	$7 < H_N \leq 10.5$	$10.5 < H_N \leq 17.5$	

Tablo 6- Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi 'nin Uygulanabileceği Binalar (TBDY Tablo 4.4)

Bina Türü	İzin Verilen Bina Yükseklik Sınıfı	
	DTS = 1, 1a, 2, 2a	DTS = 3, 3a, 4, 4a
Her bir katta burulma düzensizliği katsayısının $\eta_{bi} \leq 2.0$ koşulunu sağladığı ve ayrıca **B2** türü düzensizliğinin olmadığı binalar	BYS ≥ 4	BYS ≥ 5
Diğer tüm binalar	BYS ≥ 5	BYS ≥ 6

Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi, birbirine dik (X) ve (Y) deprem doğrultularında binaya etkiyen depremler için ayrı ayrı uygulanacaktır (TBDY 4.7). Gözönüne alınan deprem doğrultusunda, binanın tümüne etkiyen toplam eşdeğer deprem yükü (taban kesme kuvveti) aşağıdaki formülle hesaplanır;

$$V_{tE} = m_t * S_{aR}(T_p) \geq 0.04 m_t * I * S_{DS} * g \qquad \text{Denklem 4.19}$$

Burada $S_{aR}(T_p)$, gözönüne alınan deprem doğrultusunda binanın hâkim doğal titreşim periyodu T_p gözönüne alınarak hesaplanan Azaltılmış Tasarım Spektral İvmesini göstermektedir. S_{DS} kısa periyot için tasarım spektral ivme katsayısı, m_t ise binanın toplam kütlesine karşı gelmektedir [10] (Tablo 7);

Tablo 7- Gözönüne alınan deprem doğrultusunda ve azaltılmamış deprem yükleri altında yapının tümüne etkiyen toplam eşdeğer deprem yükü (taban kesme kuvveti) hesabı

2018 TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİ VE AFAD DEPREM HARİTASI VERİLERİNE GÖRE DATALAR VE AZALTILMAMIŞ DEPREM KUVVETLERİ ALTINDA TABAN KESME KUVVETİ HESABI

Bina KütlesI (Programdan) $m_t = G + n*Q$	657,67	Ton
Bina Yüksekliği h	10,50	mt
(TDBY Bolum 11.1.2) Yığma Bina Türü	a	
(TDBY Bolum 2.2) Deprem Yer Hareketi Düzeyi	DD-2	
(TDBY Bolum 3.5.1.2) Performans Hedefi	KH	
(TDBY Tablo 15.1) Bilgi Düzeyi Katsayisi	1	
(TDBY Tablo 16.1) Zemin sinifi	ZD	
(Türkiye Deprem Tehlike Haritaları Raporundan) Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı - S_S =	1,01	
(Türkiye Deprem Tehlike Haritaları Raporundan) 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı - S_1 =	0,279	
(Türkiye Deprem Tehlike Haritaları Raporundan) Yatay Elastik Tasarım Spektrumu - T_L =	6	sn
(Türkiye Deprem Tehlike Haritaları Raporundan) Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı - F_S =	1,096	
(Türkiye Deprem Tehlike Haritaları Raporundan) 1.0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_1 =	2,042	
(TDBY Denklem 2.1, Tablo2.1, AFAD Raporundan) Tasarım spektral ivme katsayisi - $S_{DS} = S_S*F_S$	1,1070	
(TDBY Denklem 2.1, Tablo2.1, AFAD Raporundan) 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayisi - - $S_{D1} = S_1*F_1$	0,5697	
(TDBY Tablo3.1) Bina Kullanim Sinifi - BKS	2	
(TDBY Tablo3.1) Bina Onem Katsayisi - I	1,2	
(TDBY Tablo3.2) Deprem Tasarım Sınıfı - DTS	1	
(TDBY Tablo 4.1) Bina Tasiyici Sistemi; Donatısız Yığma Bina	E22	
(TDBY Tablo 4.1) Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı - R =	1	
(TDBY Tablo 4.1) Dayanım Fazlalığı Katsayısı - D =	1,5	
Kubbe yüksekliği=	10,5	mt
(TDBY Tablo 3.3) (TDBY Tablo 3.3) İzin Verilen Bina Yükseklik Sınıfları - BYS =	7	
(TDBY Tablo 4.4) Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi kullanılabilirlik durumu;	Kullanılabilir	
TDBY 2018_Denklem 2.3_Yatay tasarım spektrumu köşe periyodu TA = $0.2*(S_{D1}/S_{DS})$	0,103	sn
TDBY Denklem 2.3_Yatay tasarım spektrumu köşe periyodu TB = S_{D1}/S_{DS}	0,515	sn
Hakim doğal titreşim periyodu (Programdan) T	0,1696	sn
TBDY Denklem 4.1_Deprem Yükü Azaltma Katsayısı; $T \leq T_B$ ise; $R_a(T)=D+[R/I-D]*T/T_B$	1,28	√
TBDY Denklem 2.2_Yatay elastik tasarım spektral ivmesi (TL=6sn); $T_A \leq T \leq T_B$ ise; $S_{ae}(T) = S_{DS}$	1,107	√
TBDY Denklem 4.8_Yatay doğrultuda azaltılmış deprem yükleri'nin belirlenmesi için kullanılacak azaltılmış tasarım ivme spektrumu'nun belirli bir T doğal titreşim periyodu için ordinatı olan azaltılmış tasarım spektral ivmesi; $S_{aR}(T) = S_{ae}(T)/R_a(T)$	0,865	
TBDY Denklem 4.19_Gözönüne alınan (Y) deprem doğrultusunda, binanın tümüne etkiyen toplam eşdeğer deprem yükü (taban kesme kuvveti) hesabı;		
Hesap; $V_{tE}^{(X)} = m_t*S_{aR}(T_p^{(X)})$ =	568,647	Ton
Kontrol et; $V_{tE}^{(X)} \geq 0.04m_t*I*S_{DS}*g$ =	342,808	Ton √
Programdan; Ey =	550,702	Ton

Performans analizi yük kombinasyonları seçilirken, yatayda birbirine dik doğrultulardaki deprem etkilerinin birleştirilmesi ile binalarda düşey deprem etkisi dikkate alınmıştır (TBDY Bölüm 4.4, Denklemler 4.9, 4.10 ve 4.11 (Tablo 8);

$$E_d^H = E_d^X + 0{,}3E_d^Y \quad ; \quad E_d^H = 0{,}3E_d^X + E_d^Y \qquad \text{Denklem 4.9}$$

$$E_d^Z = (2/3)S_{DS}* G \qquad \text{Denklem 4.10}$$

$$G + Q + 0{,}2S + E_d^H + E_d^Z \qquad \text{Denklem 4.11}$$

Önen

Tablo 8- Analizde kullanılan yük kombinasyonları

Kombinasyonlar	G	EX	EY	Deprem etkisini içeren yük birleşimleri
G + Ex + 0,3Ey	1	1	0,3	TBDY 4.4.2_Yatayda Birbirine Dik Doğrultulardaki Deprem Etkilerinin Birleştirilmesi;
G + 0,3Ex + Ey	1	0,3	1	EdH = EdX + 0,3EdY EdH = 0,3EdX + EdY Denklem 4.9
G + Ex + 0,3Ey + 0,3Ez	1,22	1	0,3	TBDY 4.4.4.1_Düşey deprem etkisi;
G + 0,3Ex + Ey + 0,3Ez	1,22	0,3	1	EdZ = (2/3)SDS* G Denklem 4.10 G + Q + 0,2S + EdH + EdZ Denklem 4.11
--> G+Ex+0,3Ey+0,3Ez = G+Ex+0,3Ey+0,3*[(2/3)*S_{DS}*G] = (1+0,3*1,029*2/3)G+Ex+0,3Ey = 1,21G+Ex+0,3Ey --> S_{DS} = 1,107				

Tablo 9- Önerilen hedef performans düzeyleri (TYDRY Tablo 6.3)

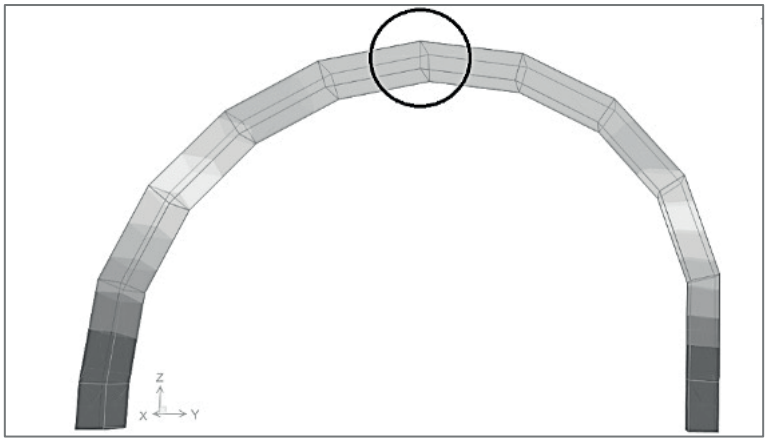
TARİHÎ YAPILARIN ÖNEMİNE GÖRE SEÇİLEBİLECEK PERFORMANS DÜZEYLERİ	Ulusal öneme sahip tarihî yapı Grup I	Evrensel öneme sahip tarihî yapı	
	DD-3 (50/%50, 72 yıl) Sınırlı hasar düzeyi (SH)	DD-2 (50/%10, 475 yıl) Sınırlı hasar düzeyi (SH)	DD-3 (50/%2, 2475 yıl) Sınırlı hasar düzeyi(SH)
Yerel öneme sahip tarihî yapı Grup II	DD-3 (50/%50, 72 yıl) Kontrollü hasar düzeyi (KH)	DD-2 (50/%10, 475 yıl) Kontrollü hasar düzeyi (KH)	DD-1 (50/%2, 2475 yıl) Kontrollü hasar düzeyi (KH)
	DD-3 (50/%50, 72 yıl) Göçmenin önlenmesi düzeyi (GÖ)	DD-2 (50/%10, 475 yıl) Göçmenin önlenmesi düzeyi (GÖ)	DD-1 (50/%2, 2475 yıl) Göçmenin önlenmesi düzeyi (GÖ)

Tablo 10- Performans düzeyleri ile ilgili hesap yöntemleri ve gerilme, yerdeğiştirme sınırları (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetim Kılavuzu Tablo 6.4)

Performans düzeyi	Hesap yöntemi ve sınırlar
Sınırlı hasar sınır durumu (SH)	1. Doğrusal hesap yöntemi kullanılıyor; a) Düşey yük ve azaltılmamış öngörülen deprem etkisinde bulunan hesap dayanımları aşılmıyor. b) Azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranı 0,3% sınırını aşmıyor.
Kontrollü hasar sınır durumu (KH)	1. Doğrusal hesap yöntemi kullanılıyor; a) Düşey yük ve Ra ≤3 ile azaltılmış öngörülen deprem etkisinde bulunan hesap dayanımları aşılmıyor. b) Azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranı 0,7% sınırını aşmıyor. 2. Doğrusal olmayan hesap yöntemi kullanılıyor; a) Öteleme oranı 0,7% sınırını aşmıyor. b) Malzemelerin şekil değiştirme kapasiteleri aşılmıyor.
Göçme öncesi sınır durumu (GÖ)	1. Doğrusal hesap yöntemi kullanılıyor; a) Düşey yük ve Ra ≤3 ile azaltılmış öngörülen deprem etkisinde bulunan hesap dayanımları belirli bir oranda (~1,5 katı) aşılabilir. b) Azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranı 1% sınırını aşmıyor. 2. Doğrusal olmayan hesap yöntemi kullanılıyor; a) Öteleme oranı 1% sınırını aşmıyor. b) Malzemelerin şekil değiştirme kapasiteleri sınırlı oranda (~1,2 katı) aşılabilir.

i. Yer Değiştirmeye Göre Değerlendirme

Mevcut durum değerlendirmesi yapılırken yer değiştirmeler azaltılmamış deprem etkilerinden elde edilir (Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı, R=1, TYDRY 2017, Tablo 6, 7). Buna göre taşıyıcı kemerin üst noktasında gerçekleşen yerdeğiştirmeler görülüyor (Resim 10). Bu değerlere göre hesapladığımız yerdeğiştirme oraları ise, %0,7 sınır değerinin altında kalıyor. Buna göre yapı deprem etkisi altında büyük bir sorun yaşamıyor.



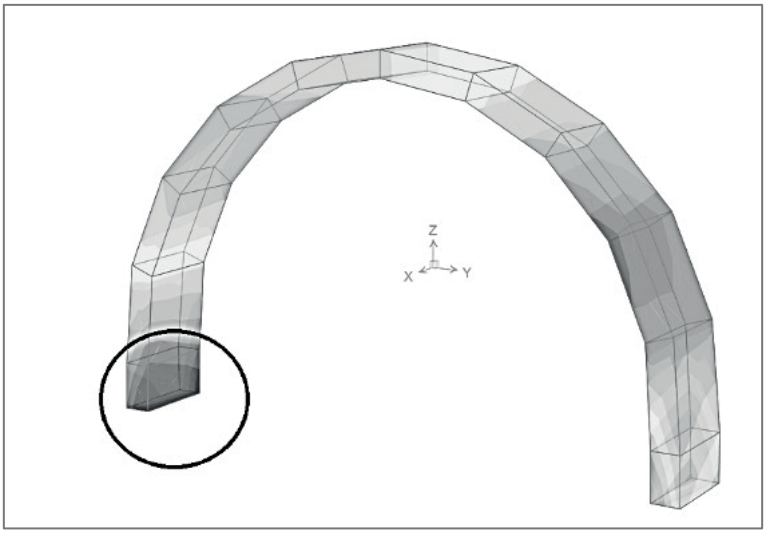
Resim 10- Y yönü (G+0,3Ex+Ey+0,3Ez) yüklemesi altında maximum yerdeğiştirme kemerin üst noktasında; 8,3mm. Yer değiştirme oranı = Yatay yönde yer değiştirme miktarı/Kemerin Yüksekliği= 8,30mm/4500mm=0,18%<0,70%; sınır değerinin altında



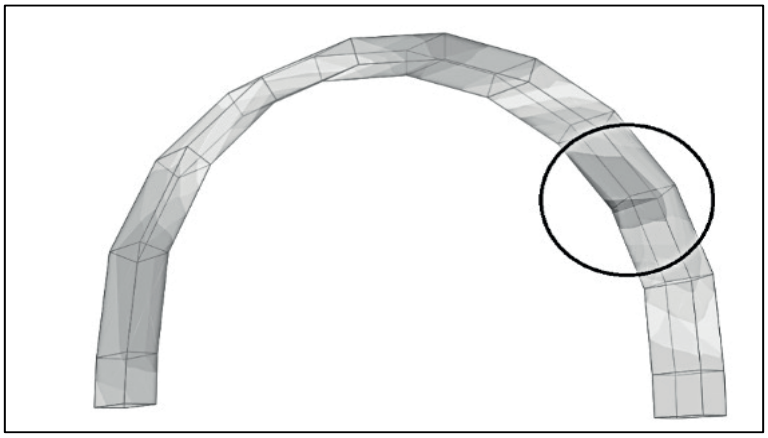
Resim 11- Kubbeleri taşıyan mevcut kemer

ii. Dayanıma Göre Değerlendirme

Mevcut durum değerlendirmesi yapılırken, gerilmeler azaltılmış deprem etkilerinden elde edilir (Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı, R=2,5, TYDRY 2017, Tablo 6, 7), ancak burada riskleri daha açık görebilmek için analiz azaltılmamış deprem yüklerine göre yapılmıştır (R=1). Buna göre en büyük gerilmeler kemerde oluşuyor (Resim 9a, 11, 12, 13).



Resim 12- Y yönü (G+0,3Ex+Ey+0,3Ez) yüklemesiyle kemerde oluşan (S33) basınç gerilmeleri, R=1; maximum gerilme 3,48MPa>2,55MPa. Sınır değerin üzerinde



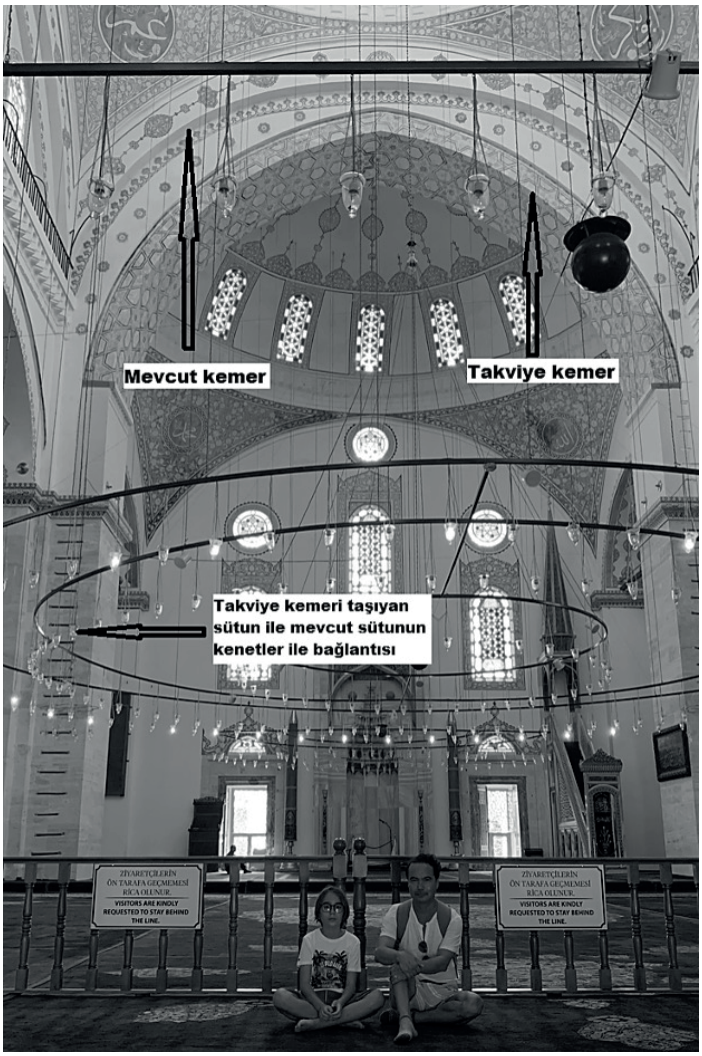
Resim 13- Y yönü (G+0,3Ex+Ey+0,3Ez) yüklemesiyle oluşan (S23) kayma gerilmeleri, R=1; maximum 1,47MPa>1,25MPa); sınır değerin üstünde

4. Taşıyıcı Kemer İçin Takviye Önerisi

Taşıyıcı sistemin, yapıya etki eden düşey ve yatay yükleri zemine güvenli bir şekilde ve herhangi bir hasara sebep olmadan aktarması gerekir. Bu iletim yollarının birden daha fazla olmasının sağlanmasıyla deprem gibi dış etkiler altında yapının aniden toptan göçmesi belirli ölçüde önlenebilir [6].

Analizde taşıyıcı duvarlarda oluşan gerilmeler genel olarak sınır değerlerin altında kalmış olsa da yapının ortasında bulunan taşıyıcı kemer Y yönündeki deprem etkisine karşı riskli görünmüştür (Resim 12, 13). Bu duruma karşı mevcut kemerin altına aynı özgün malzeme kullanarak ve aynı ölçülerde yeni bir kemer inşaa edilmesi önerilmiştir. Restorasyon Mimarları ise yeni kemerin özgün kemerden ayırt edilemeyeceği, bu nedenle de kabul edilemeyeceğini belirterek mevcut kemerin çelik konstrüksiyon ile takviye edilip edilemeyeceğini sormuştur. Buna karşı, fiziksel özellikleri çok farklı 2 ayrı malzemenin birbirleriyle uyumlu çalışmayacağı, üstelik Elastisite modülü çok yüksek olan çelik malzemenin özellikle deprem sırasında kesmetaş kemere zarar vereceği açıklanmıştır. Bununla birlikte Uluslararası koruma kurallarının yer aldığı 1964 tarihli Venedik Tüzüğü'nün temel ilkelerden biri *koruma müdahalelerinin tarihi yapıların belge ve estetik değerlerini gözeten bir yaklaşımla uygulanması*dır. Geleneksel malzeme ve tekniklerle inşa edilmiş olan tarihi yapıların onarımlarının özenli olması, yapılacak müdahalelerin, plan düzenini, görünümünü, malzeme ve yapım sistemlerini değiştirmemesi istenmektedir ki bu kriteri tamamen karşılayan önerimiz uygulanmak üzere kabul görmüştür [5].

Tüzüğün bir diğer ilkesi de kullanılan tekniklerin denenmiş ve uzun erimde tarihi yapıya uygun oldukları belirlenmiş olmasını ister. Bu kritere en muhteşem örnek Mimar Sinan'ın 1573 yılında Bayezid Camii'nin mevcut kemerine yeni bir kemer ilave ederek taşıyıcı sistemi güçlendirmesidir [15, 16, 17] (Resim 14).



Resim 14- Mimar Sinan'ın eserlerinin adlarını veren Tuhfetü'l-Mi'mârin 'den Bayezid Camii'nin içlerinde O'nun tarafından bir kemer inşa edilerek desteklendiği de öğrenilir. Bu kaynakta "...ve İstanbul'da Merhum Sultan Bayezid'in Cami-i Şerifi bir kemer-i cedidle istihkam bulmuştur, fi sene 981 (1573/74) ..." denilmektedir [15].

Takviye Kemerin Yapım Şartları (Resim 15, 16);

- Takviye kemerde kullanılacak kesme taşın menşei, görünümü bozmayacak şekilde, mevcuttaki taş ile aynı olacak (Onarılacak veya restore edilecek eski eserin bünyesine konacak taşın, eserin yapıldığı devrin tekniğine ve Vakıflar Genel Müdürlüğü Eski Eser Birim Fiyat Tariflerine uygun olarak üretilip konması esastır).

- Temel kısmı, mevcut zemin örselenmeden, dikkatlice ve Mühendis nezaretinde açılacak, temel taşının boyutuna, kemer taşının genişliği olan 30cm'den az olmamak üzere, zeminin durumuna göre Mühendis karar verecektir.

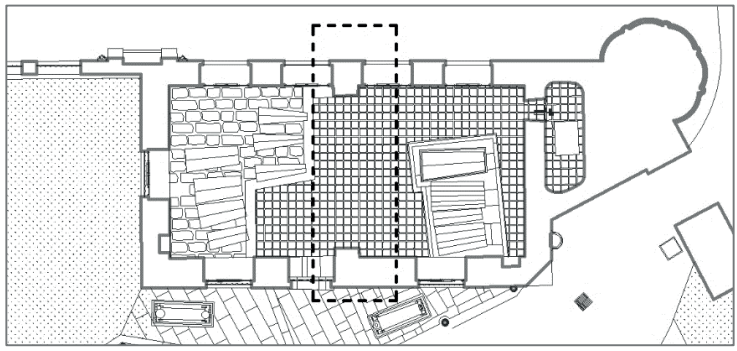
- Takviye kemerin kalıbı mevcut kemerin altında sivri kemer oluşturacak şekilde m1 ve m2 merkezli 2 adet daireden oluşacaktır. Taşların kesim yönlerinin nirengi noktası bu merkezler olacak (Merkezlerden çembere çizilen yarıçap çizgileri, taşların kesim yönüdür).

- Takviye kemer, dış sırtı, mevcut kemerin iç sırtına oturacak ve derz genişliği 1,5-2mm'yi geçmeyecek şekilde doğal hidrolik bağlayıcı kireç harcı kullanılarak örülecektir.

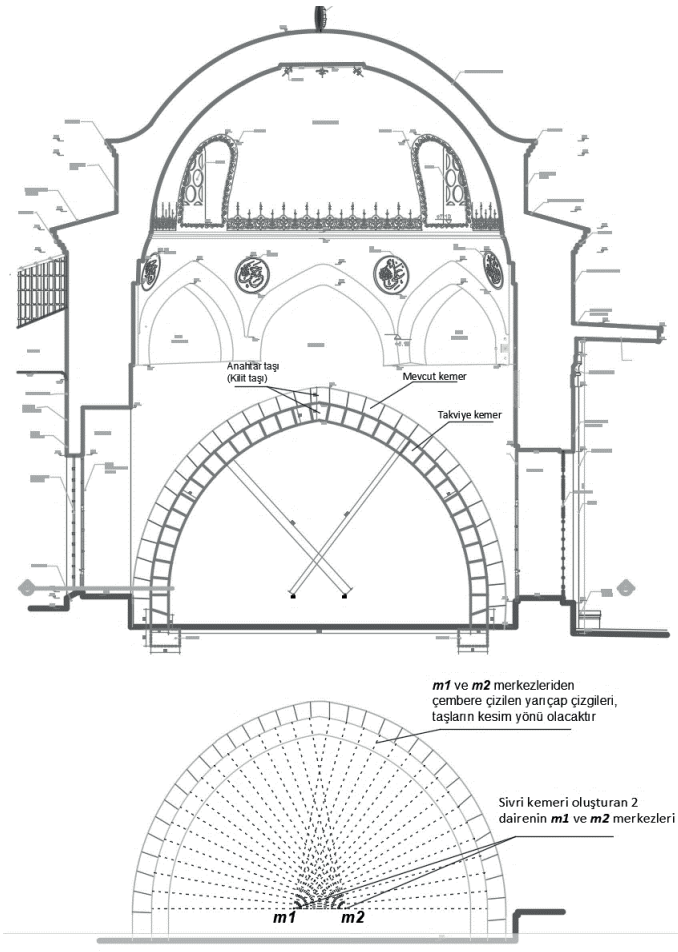
İstanbul'da 1883 yılında kurulan Mülkiye Mühendis Mektebi'nde Kargir Usul'i İnşaatı dersi muallimi mimar Ali Talat tarafından1911 yılında kaleme alınan ''Kargir İnşaat ve Eşkali'' kitabında kemerin yapım tarifi şöyledir;

- *''Kemeri oluşturan tuğla ya da kesme taş gibi malzemelerin bir bütün olarak davranması ve dayanıklı olması için birleşim yerlerini oluşturan derzlere özel bir istikamet verilmelidir.*
- *Takviye kemer malzemesinin derzleri kemerin iç karnına bir düzen içinde dizilir ki bu durumda taşların köşelerinde birer dik açı meydana gelir. Bu durumda bir taşın dış sırtı, iç karında kalan sırtından daha geniş olacağından taş yerinden çıkmayacak ve sabit kalması sağlanmış olacaktır.*
- *Kemere verilecek şekil belirlendikten sonra kemeri oluşturan taşların gerçek boyutlu kalıplarının hazırlanması gerekir. Bunun için düz bir döşeme üzerinde birebir ölçekte kemerin iç karnı ile dış sırtı ve derz yönleri gerçekte olacakları gibi çizilir ve her taş için gereken gövde kalıpları bu şekilde elde edildikten sonra taşlara şekil verilir.''* [2]

Önen



Resim 15- Kubbeleri taşıyan kemerin yerleştiği kısmın plan görünüşü

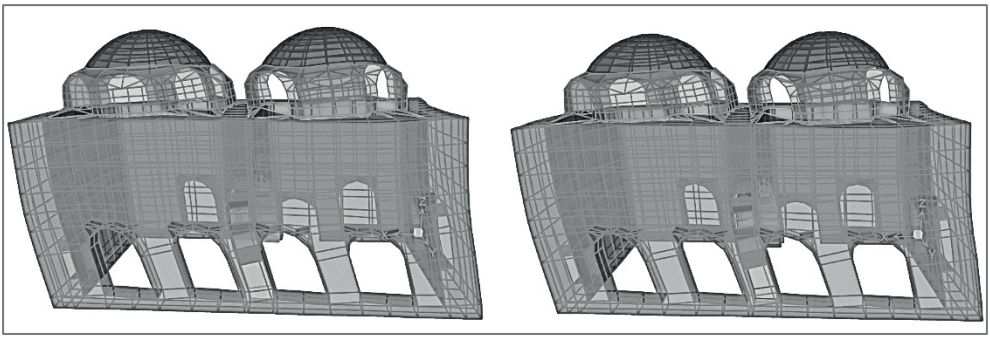


Resim 16- Mevcut sivri kemerin altına önerilen takviye kemer detay çizimleri

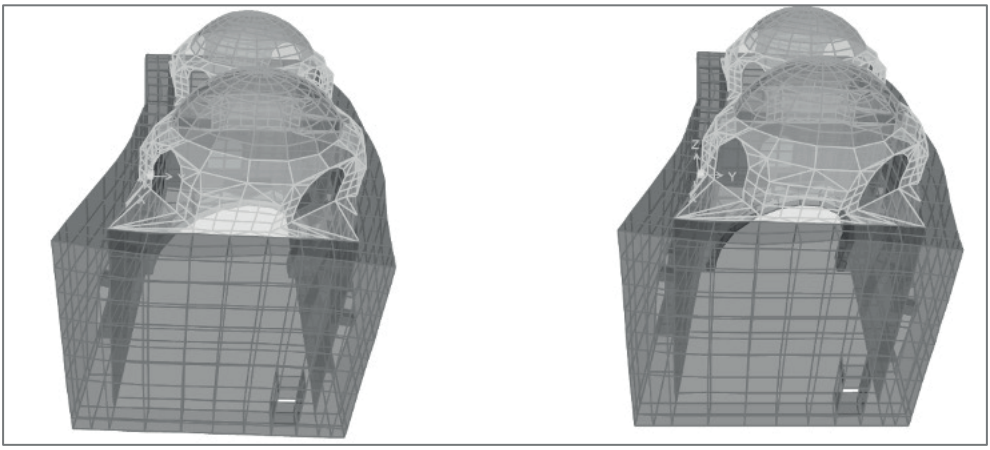
Önen

5. Takviye Kemerin Yapıya Katkısı

Mevcut yapının modları ile takviye önerisi doğrultusunda modele eklenen kemer ile oluşan modları karşılaştırdığımızda, takviye kemerin modele eklenmesinden sadece Y yönündeki hâkim periyodun etkilendiği, X yönündeki hâkim periyodda ise önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür (Resim 17, 18). Bu nedenle takviye kemerin yapımıyla yapıda oluşan yer değiştirme oranları ve gerilme dağılımlarının mevcut durum ile kıyaslaması sadece Y yönü yüklemeleri için yapılmıştır.



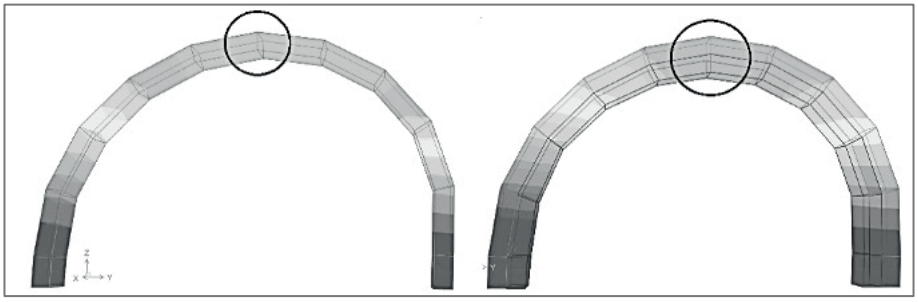
Resim 17- Solda X yönü hâkim periyod (Mod 2, T=0,13464sn) iken, sağda takviye kemer ile X yönü hâkim periyod değişmiyor (Mod 2, T=0,13406sn)



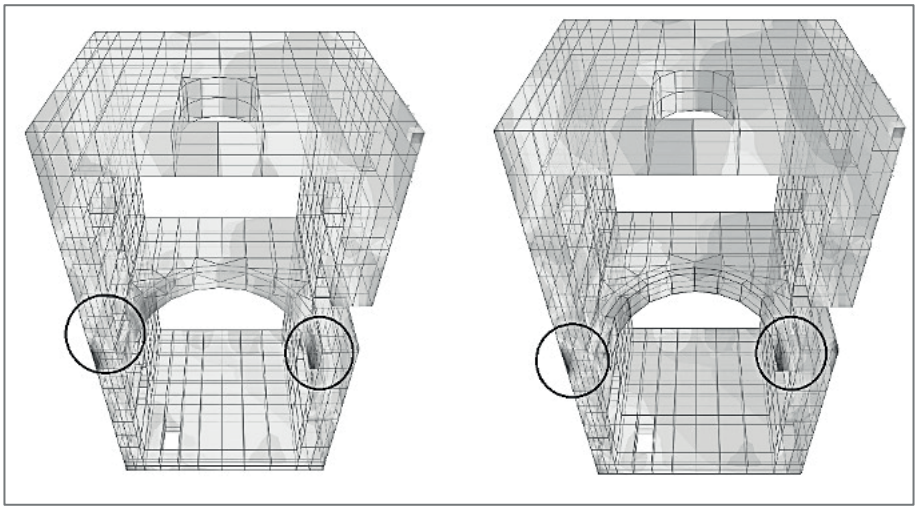
Resim 18- Solda Y yönü hâkim periyod (Mod 1, T=0,16964sn) iken, sağda takviye kemer ile Y yönü hâkim periyod azalıyor (Mod 1, T=0,15736sn)

Önen

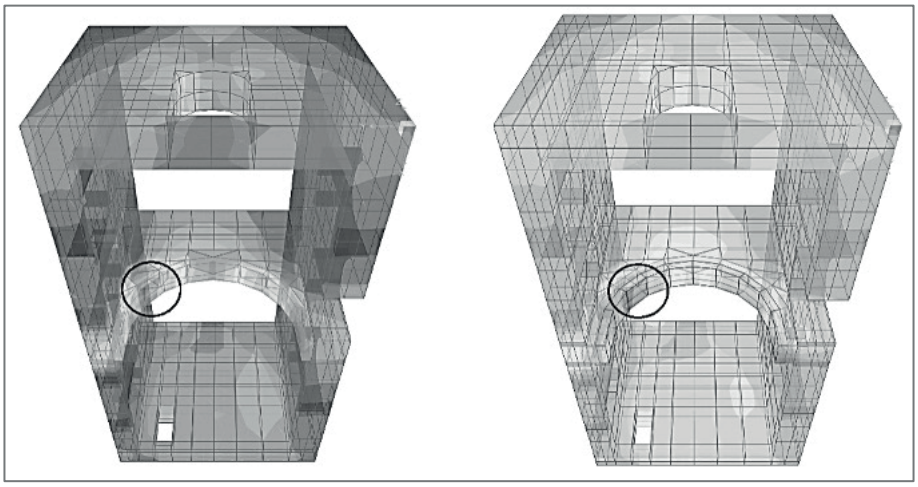
Takviye kemerin modele eklenmesiyle kemerde, duvarlarda ve kubbelerde depremden dolayı oluşan yer değiştirme ve gerilme değerleri azalıyor (Resim 19, 20, 21, 22, 23, 24);



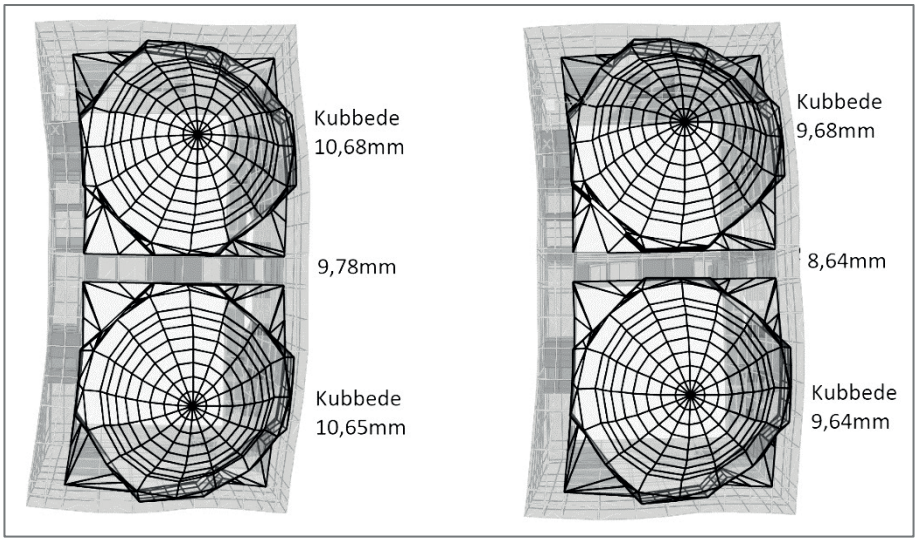
Resim 19- Solda Y yönü yüklemesiyle kemer üst noktasında oluşan yer değiştirme yatayda 8,30mm iken, sağda takviye kemerin mevcut kemerin hemen altına aynı genişlik ve malzeme özellikleri atanarak modele eklenmesi ile yatayda 6,26mm düşüyor



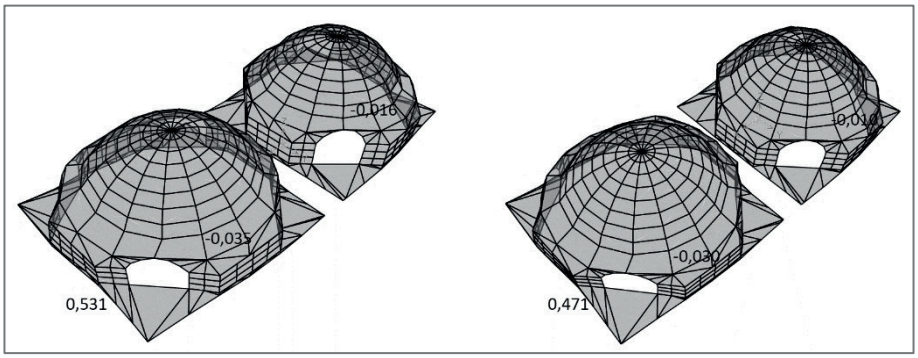
Resim 20- Solda Y yönü yüklemesiyle kemerde oluşan en büyük (S33) basınç gerilmesi 3,48MPa iken, sağda takviye kemer ile 2,92MPa (>2,55MPa); sınır değere yakın



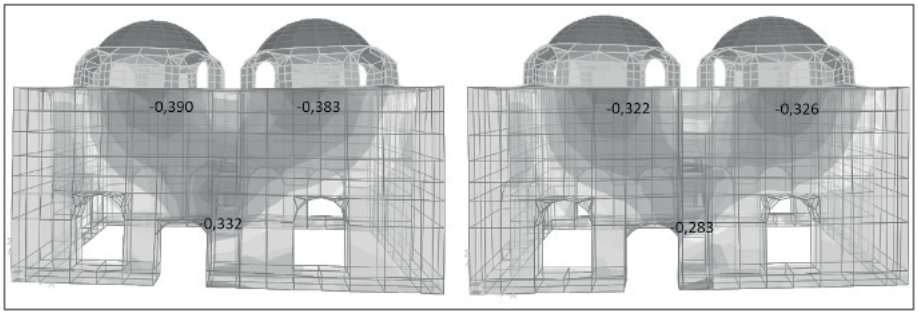
Resim 21- Solda Y yönü yüklemesiyle kemerde oluşan en büyük (S23) kayma gerilmesi 1,47MPa iken, sağda takviye kemer ile 1,36MPa (>1,25MPa); sınır değere yakın



Resim 22- Solda Y yönü (Ey) yüklemesiyle duvarda ve kubbelerde oluşan yer değiştirmeler (mm), sağda takviye kemer ile duvarda ve kubbelerde oluşan yer değiştirmeler azalıyor (mm)



Resim 23- Solda Y yönü (Ey) yüklemesiyle duvarda oluşan S12 kayma gerilmeleri (MPa), sağda takviye kemer ile S12 kayma gerilmeleri azalıyor



Resim 24- Solda Y yönü (Ey) yüklemesiyle duvarda oluşan S11 gerilmeleri (MPa), sağda takviye kemer ile S11 gerilmeleri azalıyor

6. Sonuç

1730 – 1754 yılları arasında Hekimoğlu Ali Paşa tarafından yaptırılan türbenin güçlendirilmesi için, mevcut kemerinin hemen altına bitişik olarak, aynı malzeme ve ölçülerde, mevcut kemer ile birlikte çalışacak yeni bir kemer tasarlanmış ve yapıya olabilecek katkıları gösterilmiştir. Türbenin restorasyonu sırasında uygulanmak üzere kabul gören önerimiz tarihi yapının geleceğe güvenle devrine katkı sağlayacaktır.

Tarih yapılarda müdahalelerin pek çoğu, yapıda görülen bir hasarı gidermek için yapılır. Bazı durumlarda yapının restorasyonu yapılırken, taşıyıcı sistemin düşey ve yatay yükler altındaki güvenliği incelenerek, hasar bulunma-

yan elemanlarda da bir sağlamlaştırma müdahalesi önerilebilir. Bir yapıda hasar olmaması, her zaman yapının yeterli taşıyıcı sistem güvenliğine sahip olduğuna işaret etmez. Mevcut durumda hasarlı olan tarihi yapıya müdahale edildiği gibi, restorasyonuna karar verilen bir tarihi yapıda hasar olmasa bile, taşıyıcı sistem güvenliğinin incelenmesi ve yetersiz bulunduğunda gerekli takviyenin yapılması önerilir [5].

Eğer yapının depremde zarar görebileceği öngörülüyorsa, gerekli takviye, "*estetik değerini gözeten bir yaklaşımla, geleneksel malzeme ve teknikle, plan düzenini, görünümünü, malzeme ve yapım sistemini değiştirmeden*" ve "*geleneksel konumuna, kompozisyonuna, dengesine ve çevresiyle olan bağıntısına zarar gelmeyecek*" [19] şekilde, yapının geleceğe güvenle devri adına ve yapı ayaktayken yapılmalıdır. Yapılacak olan müdahale yapıyı güncel şartnamelere uygun hale getirmese de onun deprem dayanımını artıracaktır.

7. Kaynaklar

[1] Ahunbay, Z., Tarihi Çevre Koruma ve Restorasyon, 2007
[2] Talat A., Kargir İnşaat ve Eşkali, 1911, Koruma Akademisi Yayınları, 2022
[3] Tarihi Ahşap Sütunlu Camilerin Sonlu Elemanlar Analizi ile Taşıyıcı Sistem Performansının Belirlenmesi, 2010, Aslı Er Akan
[4] Durutürk G., Yalvaç Hamidiye Cami Deprem Analizi, Süleyman Demirel Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2012
[5] Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetim Kılavuzu, İstanbul Valiliği, T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü, 2017
[6] Celep Z., Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, 2019
[7] Bayraktar A., Depremin Faydaları ve Depremden Korunmanın Yapı Tasarımları, 2020
[8] Bayülke N., Depremlerde Hasar Gören Yapıların Onarımı ve Güçlendirilmesi, 1984
[9] Sesigür H., Çelik O. C., Çılı F., Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Bileşenler, Onarım ve Güçlendirme, İstanbul Bülten, 2007
[10] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 2018
[11] Ural A., Kara M. E., Kenet ve Zıvanaların Yığma Duvarların Kesme Davranışına Etkisi, 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, 2015
[12] Kara H. G., Tarihi Yığma Yapıların Taşıyıcı Sistemleri, Güvenliğinin İncelenmesi, Onarımı ve Güçlendirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2009
[13] Bayülke N., Yığma Yapılar, Taş ve Tuğla, 2018
[14] Bayraktar A., Yığma Yapı Mühendisliğinin Gelişim Tarihi, 2011
[15] Eyice S., İstanbul'da Sultan II. Bayezid Külliyesi, Sanat Tarihi Araştırmaları Drg, 1990
[16] Bozdoğan M., Ovalı P. K., Özkan S., Mimar Sinan'ın "Koruma" Anlayışı Ve Günümüzde Sinan'ın Eserlerini "Koruma" Anlayışı (Edirne Örneği), 2006
[17] Dabanlı Ö., Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2008
[18] Değirmenci İ., Sarıbıyık M., Tarihi Yapıların Güçlendirilmesinde Yenilikçi Yaklaşımlar ve FRP Malzemelerin Kullanımı, 2015
[19] Venedik Tüzüğü, 1964
[20] Can H., Ünay A. İ., Tarihi Yapıların Deprem Davranışını Belirlemek İçin Sayısal Analiz Yöntemleri, 2011

MERZİFON TARİHİ KIZLAR MEKTEBİ RESTORASYON VE DEPREM GÜÇLENDİRME ÇALIŞMALARI

Ali SARIALİOĞLU[1], Mahitap SEL[2]

[1]Doktor İnşaat Yüksek Mühendisi, Samsun Rölöve ve Anıtlar Müdürlüğü, ali.sarialioglu@ktb.gov.tr
[2]Doktora Öğrencisi, Rest.Uzm.Yüksek Mimar, Arkeolog, Samsun Rölöve ve Anıtlar Müdürlüğü, mahitap.sel@ktb.gov.tr

Özet

Tescilli yapılardaki güçlendirme yaklaşımı, son dönem yapılarından daha farklı bir bakış açısı gerektirmektedir. Sistemin kayıp verdiği noktaları tespit edip mevcutla uyumlu şekilde müdahalesi, sistemde kaybolanın yerine konulması gerekmektedir ve bunlar esas olmalıdır. Güçlendirme uygulamalarının eksik veya çok uzun zaman dilimine yayılarak yapılması, binanın taşıyıcı sistemine zarar verdiği bilinmedir. Özgünlüğünü kaybetmiş bir binanın güçlendirilmesi daha fazla hassasiyet gerektirir. Bu makalede, ilk yapımı 1895'e tarihlendirilen Amasya Merzifon Amerikan Kızlar Mektebinde uygulanan iki farklı güçlendirme çalışması ilk kez değerlendirilmektedir.

Anahtar Sözcükler: Deprem, Koruma, Restorasyon, Güçlendirme, Malzeme, Tarihi Yapı

Abstract

The approach in registered buildings requires a different perspective than the recent buildings. The missing points of the system should be detected and intervened in a way that is compatible with the current one, the system should be replaced when it is lost, and these should be the basis. The fact that reinforcement applications are made incompletely or spread over a very long period of time is the lack of knowledge of the damage to the storage system of the building. A person who has lost his originality needs more details. In this article, two different reinforcement works applied in Amasya Merzifon American Girls School, the first construction of which is dated to 1895, are evaluated for the first time.

Key Words: Earthquake, Conservation, Restoration, Reinforcement, Material, Historical Structure

1. Giriş

Osmanlı Dönemindeki yabancı okullar, Osmanlı Devleti sınırları içerisindeki misyonerlik faaliyetleri ile birlikte 1851'de [1][2] açılmıştır. Buradaki en can alıcı nokta yabancı okulların, açılmadan önce 32 yıl boyunca nüfus, ekonomik, coğrafi, kültürel ve sosyal açıdan birçok yönüyle Osmanlı'yı analiz etmeleridir. Amerikan Board Cemiyeti örgütlenmesinin hemen hemen son aşamasında, Anadolu'nun farklı kilit noktalarında yabancı okullar açılmıştır [3]. Kayseri, Nevşehir, Yozgat, İzmir gibi yerlerde açılan okullardan birisi de Merzifon'daki Amerikan Board İstasyonu ve okul kampüsüdür [1][2][3] [4][5].

Merzifon Amerikan Koleji Kızlar Mektebi /Anadolu Koleji, Osmanlı'daki Misyonerlik ve devamındaki batılılaştırma süreci içinde açılan yabancı okullardan biridir ve tescilli anıtsal yapılardandır. 1895 yılında faaliyetinlerine başlamıştır. Amasya ili Merzifon ilçesi Sofular Mahallesinde tapunun 1704 ada, 1 parselde (eski 23 ada 95 parsel) bulunmaktadır.



Şekil-1: Merzifon Tarihi Kızlar Mektebi konumu [4]

Araştırmamıza konu olan okul yerleşkesi, sahip olduğu kurum ve kuruluşlarıyla küçük bir şehir görünümündedir. Kolej bünyesinde 10.000 den fazla kitap bulunan bir kütüphane, 7000 parçadan oluşan koleksiyonuyla arkeoloji müzesi, botanik müzesi, zooloji müzesi, hastane, fizik - kimya laboratuvarları, meteoroloji istasyonu, matbaa, yurt binaları, kilise, marangozhane ve yatılı okullar gibi farklı işlevli yapılar bulunmaktadır [2][5][6] (Şekil 2-3-4).



Şekil-2: Merzifon Tarihi Kızlar Mektebinin 1906-1910 deki görünümü [7]



Şekil-3: 1906 yılı -Merzifon Tarihi Kızlar Mektebi ve kampüs görünümü [7]

Yapı, 1895 yılından 1938 yılına kadar okul olarak kullanılmıştır (Şekil-4). 1938-1950 yılları arasında 8.Kolordu Kışlası olarak hizmet vermiş; 1950-1962 yılları arasında Astsubay hazırlama okulu olarak kullanılmıştır. 1962-2005 yılları arasında Merzifon Belediyesi'nce kullanılmış, 2005 yılında Milli Eğitim Bakanlığı'na devredilmiştir [2] [4] [5].



Şekil-4: Merzifon Tarihi Kızlar Mektebi görünümü [7]

Merzifon Tarihi Kızlar Mektebi, Merzifon Belediyesi tarafından 2012'de kültür merkezi olarak yeniden işlevlendirilmiş ve yapının rölöve, restitüsyon, güçlendirme ve restorasyon projeleri hazırlatılmıştır. Bu kapsamda hazırlanan güçlendirme projeleri, 2007 Türkiye Deprem Yönetmeliği (2007 TDY) göre tasarlanmıştır. Bu projelere göre, 2012'de başlanan restorasyon/güçlendirme uygulaması, maddi olanakların sınırlı olması nedeniyle, 2016 yılında yarım bırakılmıştır. Bu müdahalelerle taşıyıcı sistemine müdahale edilmiş olan yapı, aradan geçen 7 yıllık zamanda atıl kalmıştır.

Merzifon Belediyesi, 2022 yılında, Kültür ve Turizm Bakanlığı'na yapıyı devretmiştir.[6] Kültür ve Turizm Bakanlığı Samsun Rölöve ve Anıtlar Müdürlüğü'nce, 2023 yılında, güçlendirme projeleri Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018 TBDY) göre analiz ettirilmiştir. Yapının işlevi kütüphane olarak değiştirilmiş ve tüm projeler yeniden hazırlanmıştır. 2023 yılında, yeni müdahale kararları doğrultusunda uygulamaya geçilmiştir (Şekil-5).



Şekil-5: Merzifon Tarihi Kızlar Mektebi'nin restorasyon öncesi görünümü [7]

2. Literatürde Merzifon Kızlar Mektebi

Amasya Merzifon Amerikan Koleji Kızlar Mektebi / Anadolu Koleji; Erdoğan [2], Alan [3] Kırbaş [5], Genç [8], Saatçi [9] ve Gül [10] 'de tez konusu olarak ele alınmaktadır. Bu çalışmalarda; Karadeniz Bölgesi'nden İç Anadolu'ya geçişin kilit güzergâhındaki Merzifon'un okul konumu olarak seçilmesi, Osmanlıdaki Amerikan Board İstasyonlarının gelişmesi, Osmanlı Devleti topraklarındaki yabancılaştırılma/batılılaştırılma sürecinde yapının rolü, okulun faaliyetleri ve Kurtuluş Savaşı'ndaki misyonerlerin zararlı faaliyetleri ve etkileri ele alınmaktadır. Yapının statik değerlendirilmesine ve güçlendirmesine ilişkin herhangi bir veriye hem bu tezlerde hem de literatürde herhangi bir veri/çalışmaya rastlanmamıştır.

3. Restorasyon Çalışmaları Öncesi Mevcut Durumun Mimari, Statik Ve Jeolojik Olarak Genel Değerlendirilmesi[1]

Güçlendirme uygulamaları öncesinde, 2012 yılında, yapı son katı yıkılmış durumda olup bodrum, zemin ve bir kattan oluşmaktadır. Dikdörtgen planlı

1 Bu kısımda verilen paftalar 2012 yılında Fersah Mimarlık ve alt ekipleri tarafından hazırlanmış olan rapor ve paftalardır. Bu projenin tüm müelliflik hakları Kültür ve Turizm Bakanlığı'na ait olup tüm işlemler Samsun Rölöve ve Anıtlara Müdürlüğü (SRAM) tarafından gerçekleştirildiğinden kaynakça olarak SRAM arşivi verilmektedir.

yapı, 13,00 m x 27,25 m ölçülerindedir[2]. Yapının girişi güney cephesindendir, batı cephesinde 1906 da eklenen saat kulesi bulunmaktadır. Güçlendirme uygulama öncesi araştırma kazısı yapılmış ve temele rastlanmamıştır (Şekil-6-7-8).



Şekil-6: 2012 Restorasyon uygulama öncesi doğu cephesi kazı-duvarda temel durumu[6]



Şekil-7: 2012 Restorasyon uygulama öncesi güney cephesi [6]



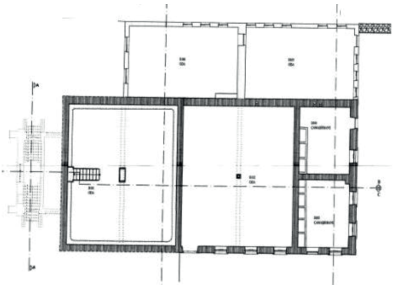
Şekil-8: 2012 Restorasyon uygulama öncesi güney cephesi [6]

Yapının kemerli pencere ve kapıları, taş sövelidir. Yapı içinde açıklıklar, kemerli olarak geçilmiş durumdadır. Yapı döşemesi, volta döşeme olup çimento esaslı şap kaplamadır. Duvarlar içten ve dıştan sıvalıdır. Yapının taşıyıcı sistemi, yığma tuğla duvarlarla ve çelik taşıyıcılı volta döşemelerle

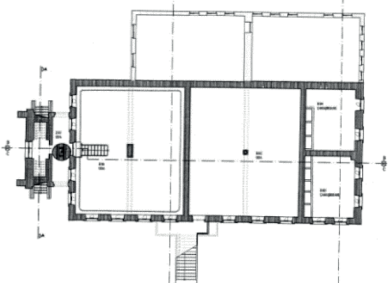
2 Yapının kuzey cephesinde 7,00 m x 21,60 m ek bina bulunmaktadır. Ek bina yakın dönemlerde (kesin tarihi bilinmemekte olup muhtemelen 1990'lı yıllarda-) yapılmıştır. Ek bina 2012 yılı uygulamasında yıkılarak tamamen yeniden yapılmıştır.

oluşturulmuştur. Yapı özgününde; bodrum- zemin-2 normal katlıdır; kırma çatılı, yığma dolu tuğla duvarlıdır [11]. Yapının bodrum kat duvar kalınlığı 70 cm olup zeminde 60 cm'e, birinci katta ise 40 cm'e düşmektedir.

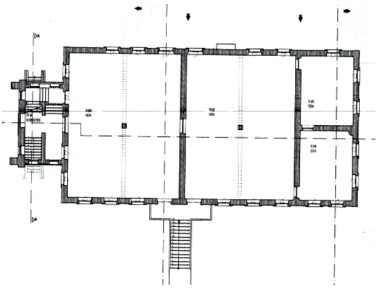
İncelenen yapı 1895 yılında yatılı okul [1], 2012'de çok amaçlı kültür merkezi ve 20223'de ise kütüphane olarak işlevlendirilmiştir. Döşemelerin tamamı volta döşeme olarak yapılmış olup çelik taşıyıcı olarak IPN kullanılmıştır. Geçilen en büyük açıklık 5 metredir. Mevcutta, volta döşeme kalınlıkları 20 cm - 25 cm arasındadır, döşeme içindeki IPN profillerin sıklığı ise 65 cm -75 cm arasında değişmektedir. IPN profiller taşıyıcı duvarlar üzerine oturtularak imalatı yapılmıştır. 2012 yılı tespitlerinde bu döşemelerde yürüme esnasında bile döşemenin ciddi derecede sallandığı belirtilmektedir [6] (Bkz. şekil 9-10-11-12-13-14).



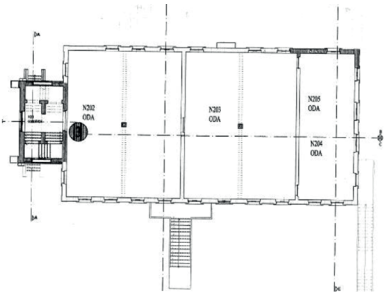
Şekil-9: -2.90 kotlu kat planı - 2012-restitüsyon projesi [6]



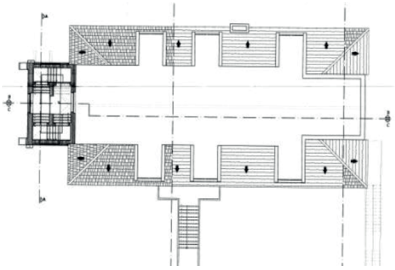
Şekil- 10 :+-0.00 kotlu kat planı - 2012-restitüsyon projesi [6]



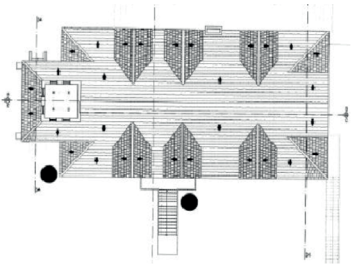
Şekil-11: +3.00 kotlu kat planı -2012-restitüsyon projesi [6]



Şekil-12: +7.50 kotlu kat planı -2012-restitüsyon projesi [6]



Şekil-13: +10.00 kotlu kat planı - 2012-restitüsyon projesi [6]



Şekil-14: Çatı planı -2012-restitüsyon projesi [6]

4. Merzifon Amerikan Kolejine İlişkin Statik Güçlendirme Projeleri

Amasya İli Merzifon İlçesinde bulunan yapı, Türkiye Deprem Bölgeleri haritasına göre birinci derece deprem bölgesinde yer almaktadır. Yapıya ilişkin iki farklı statik güçlendirme projesi bulunmaktadır; bu projeler 2012 yılında ve 2023 yılında hazırlatılmış ve Samsun Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu'na (SKVKBK) sunulmuştur.

İlk statik güçlendirme uygulaması 2012 yılı projesine göre başlanmış, 2016 yılında bu uygulama yarım bırakılarak iş tasfiye edilmiştir. Yapı bu haliyle yedi yıl boş kalmıştır. Yapıda bozulmaların olması ve 2018 yılında deprem yönetmeliğinin değişmesi nedenleriyle, 2023 yılında Samsun Rölöve ve Anıtlar Müdürlüğü'nce (SRAM) projeler yeniden hazırlatılmıştır. Günümüzde son onaylı projesine göre uygulama SRAM denetiminde devam etmektedir.

4.1. İlk Statik Güçlendirme Proje Kararları- 2012 Yılı Projeleri (2007 TDY'e Göre)[6]

2012 yılında yapıda, ağır hasarlar olduğu tespit edilmiştir. Yapıya ilişkin; rölöve –restitüsyon- restorasyon projeleri ile birlikte statik analizi ve güçlendirme projeleri hazırlatılmıştır. Projeler, Samsun Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu (SKVKBK) tarafından 2012 yılında onaylanmıştır (statik analizi ve güçlendirme projeleri hariç olmak üzere).

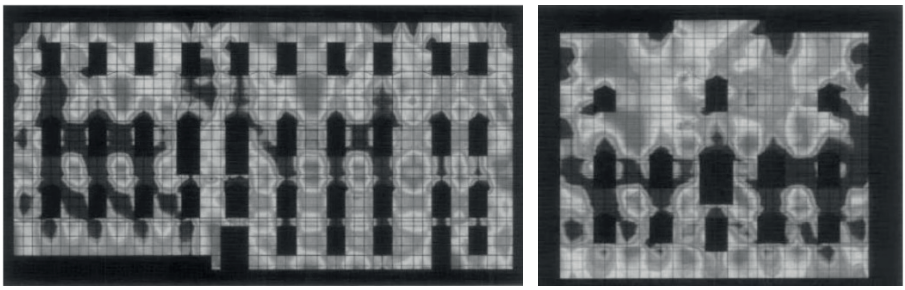
Tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesine ilişkin, 2007 tarihli Türkiye Deprem Yönetmelik'inde amir hükmü bulunmamaktadır ve konu ile ilgili güncel farklı bir yönetmelik de bulunmamaktadır. Buna rağmen ilk statik

güçlendirme projesinde, 2007 TDY tasarım kriterleri referans olarak kullanılmıştır.

4.1.1. Tanımlanan Yapı Hasarları – (Genel Olarak)

Yapıdaki hasarların deprem ve hava şartları etkisinde oluştuğu düşünülmüştür. Öte taraftan, yapı genelinde gözlemlenen çatlakların değerlendirilmesinden hareketle, zemindeki herhangi bir oturmadan kaynaklanan bir hasarın olmadığı düşünülmüştür.

2012 yılı itibariyle boş ve atıl durumda olan yapının hasar tespitlerinde; zeminden gelen su sorunları, saat kulesine çıkan merdiven bloğundaki cephe duvarlarında lokal yapısal çatlaklar, pencere çevrelerinde ve kemer üstlerinde bulunan yapısal ve kılcal çatlaklar (Şekil-15-16), iç ve dış cephe derzlerinde boşalmalar, döşemelerde vibrasyonlar, son katın yıkılmış durumda olması ve çatının olmaması ana sorun başlıkları olarak tanımlanmıştır.[3]



Şekil 15-16: Güney cephesi gerilme dağılımı ve duvar iç aksına ait gerilme dağılımı [6]

4.1.2.Güçlendirme Raporunda Yapısal Analiz

Statik raporuna göre; yapının modal analizinde RİTZ Yöntemi kullanılarak mevcut yığma yapı ile önerilen çelik konstrüksiyon sistem birleştirilmesi yapılmıştır. Mevcut yapı ile çelik konstrüksiyon sisteminin entegre olmasıyla mevcut duvarların üzerine gelen yatay yüklerin büyük bir kısmının çelik konstrüksiyon elemanlar ile taşınırken, rijitliği oranında duvarlardaki yatay yükün taşıma sistemine katıldığı öngörülmüştür.

3 2012 yılında hazırlanan Fersah Mimarlık tarafından hazırlanan rölöve projesinin bütününde olan hasar analiz paftasında, diğer hasarlar detaylıca verilmekte olup çalışmada özellikle statik açıdan esas teşkil eden hasarlara vurgu yapılmaktadır.

Yatay gelen bu yükler ile duvar kapasiteleri karşılaştırıldığında, bazı bölgelerde kapasite aşımları tespit edilmiştir. Çözüm olarak; duvarlara karbon lamine plak uygulaması önerilmiştir. Boşluklu yerlerde ise, özellikle pencere arasındaki duvar parçalarının güçlendirilmesinde, karbon kumaş uygulaması sadece iç cephede öngörülmüştür. Dış cephede özgün taş söveler olduğundan, dış cepheye karbon kumaş önerilmemiştir.

Analizden elde edilen sonuçlar, yığma yapı kısmı için emniyetli kayma gerilmeleri ile kıyaslanmıştır. Analiz sonuçlarından da görüldüğü gibi, kayma gerilmeleri, mevcut emniyetli kayma dayanımının üstündedir. Kayma gerilmelerinin aşıldığı yerlere hem lokal olarak hem de duvar genelinde müdahale edilerek, duvarın kayma kapasitesi arttırılmıştır. Mevcut kapasitenin aşılma noktalarının tespiti sonucunda elde edilen durum, Şekil-15 ve Şekil-16'da görüldüğü gibi analiz edilmiştir. Şekildeki, mor-mavi-kırmızı alanlar, mevcut kapasitenin aşıldığı noktalardır. Bu bölgelerde gerilme yığılmalarını ve depremde hasar görebilecek noktaların minimize edilmesi hedeflenmiştir. Çözüm olarak; uygun yerlere yer yer karbon plak uygulaması yer yer ise karbon lifli polimer uygulaması tasarlanmıştır.

Gerilme yığılmalarına bağlı hasar beklentileri, pencere aralarında yoğunlaşmaktadır. Bu kısımlara karbon plak uygulamasının yerine, dış cepheye ve sövelere zarar vermeden duvarın iç tarafından yapılacak olan uygulama ile çözüme gidilmesi öngörülmüştür.

4.1.3. Güçlendirme Projesi Kararları

Yapının, "spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının % 10 ve 475 yıllık periyoda denk gelen tasarım depremi"[4] altındaki davranışı irdelenmiştir. Yapıya ilişkin hazırlanan güçlendirme projesinin yapısal analizi, SAP2000 V14.2 paket yazılımı ile analiz edilmiştir.

Analizler sonucunda; "*tasarım depremi altında yapının yığma duvarlarında genel veya lokal* güçlendirme yapılması gerektiğine*"* karar verilmiştir.

Statik güçlendirme raporunda; esas olarak iki farklı türde müdahale önerilmiştir. Önerilen müdahalelere göre; yapının bilgisayar ortamında matematiksel modeli kurulmuş, sonlu elemanlar metotları ve 2007 TDY'de refere

4 Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2) DD-2 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının % 10 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu seyrek deprem yer hareketini nitelemektedir. Bu deprem yer hareketi, standart tasarım deprem yer hareketi olarak da adlandırılmaktadır [12].

edilen hesap yöntemleri çerçevesinde analiz yapılmış, elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır.

Önerilen esas müdahaleler ve bu müdahalelere ilişkin uygulamalar ise şöyledir (Şekil 17-18-19-20-21-22-23-24-25-26-27-28-29-30-31-32-33-34):

1. **Mevcut yığma yapının güçlendirilmesi:**

- Puzolanik Kireç esaslı enjeksiyon harcı uygulaması;

Lokal olarak tespit edilmiş çatlaklara puzolanik kireç esaslı enjeksiyon yapılması uygun olacaktır.

- Puzolanik Kireç esaslı onarım harcı uygulaması;

Dış cephedeki derzlerin dayanımlarının kaybolmasından ötürü dış cephelerde puzolanik kireç esaslı onarım harcı uygulaması ile derzlerin yenilenmesi yapılmalıdır.

- Karbon lifli polimer ile mevcut duvarların güçlendirilmesi;

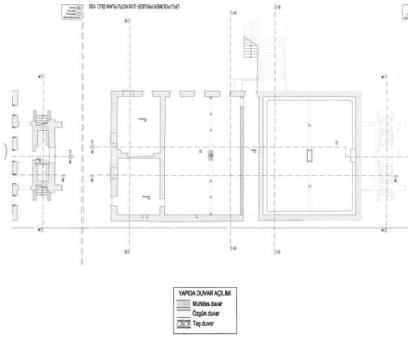
Karbon lamine plaklar[5] ile güçlendirme ve karbon kumaşlar ile güçlendirme[6], Projede belirtilen duvarlarda uygulanması öngörülmüştür ve saat kulesinin iç cephesinde de güçlendirme yapılması önerilmiştir (Şekil-17-18)[7].

- Derz onarımlarının yapılması;

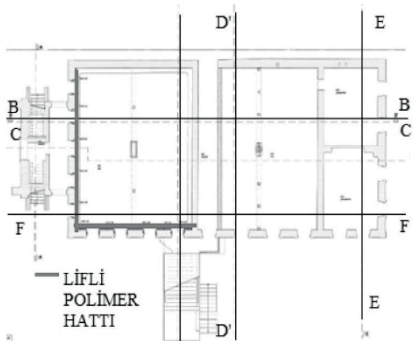
5 Karbon Lamine Plak Uygulaması- 2012 Projesindeki Uygulama Önerisi: Boşluk olmayan duvar parçalarında düzgün bir şekilde taş kesme makinası ile lazerli ilerleyerek yaklaşık 5-7 mm kalınlığında 60 mm derinliğinde olmak üzere; projesinde gösterilen yerlerden duvarlar kesilerek, karbon lamine plaklar yerleştirilmelidir ve uygun yapıştırıcı malzemesi ile duvara aderansı sağlanmalıdır. Karbon plaklar iç ve dış cephede orijinal söve ve silme detayları korunacak şekilde yerleştirilmesi esastır. Karbon plaklar kılıçlamasına yerleştirilecektir. Derzler uygun orijinal malzemesi ile kapatılacaktır.

6 Lifli Polimer Kumaş Uygulaması-2012 Projesindeki Uygulama Önerisi: Pencere arasına karbon plağın ankre edebileceği bir alan bulunmadığından, sadece iç yüzden pencere aralarına yapılmalıdır. Pencere aralarında ihtiyaç duyulan yerlerde U şeklinde, dış yüzeye ve pencere ve kapının orijinal taş ve silmelerine dokunmadan içerden lifli polimer kumaş uygulaması yapılacaktır.

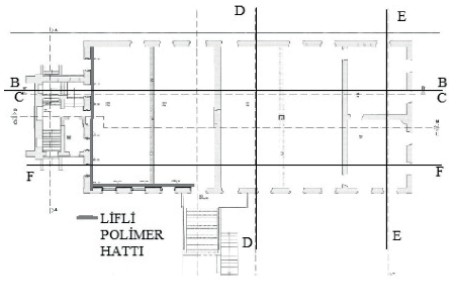
7 2012 yılı projesine göre; Saat Kulesinin güçlendirme önerilen duvarları, 2023 yılı projesinde tamamen kaldırılmış durumdadır. 2024 uygulamasında saat kulesi yeniden yapılmıştır.



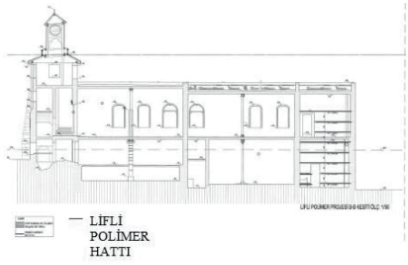
Şekil-17:-2.00 kotlu kat planı-2012 yılı lifli polimer projesi –[6]



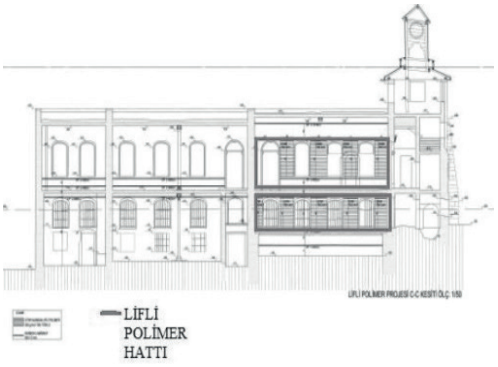
Şekil-18:-+-0.00 kotlu kat planı-2012 yılı lifli polimer projesi –[6]



Şekil-19: +3.00 kotlu kat planı-2012 yılı lifli polimer projesi –[6]



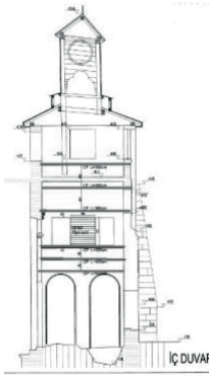
Şekil-20: B-B kesiti -lifli polimer projesi 2012 yılı lifli polimer projesi –[6]



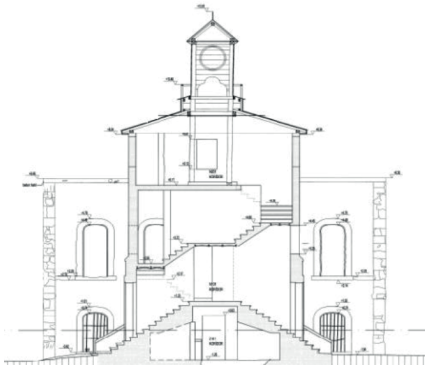
Şekil-21: C-C Kesiti - 2012 yılı lifli polimer projesi –[6]



Şekil-22: D-D Kesiti -2012 yılı lifli polimer projesi –[6]



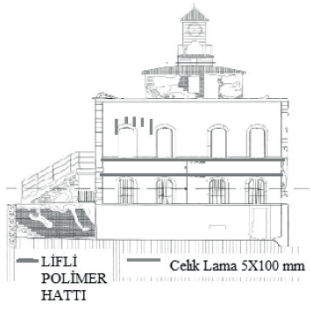
Şekil-23 : 2012 yılı merdiven içi kesitleri–[6]



Şekil-24 : 2012 yılı merdiven içi kesitleri–[6]



Şekil-25: Batı cephesi—2012 yılı çelik lama paftası –[6]



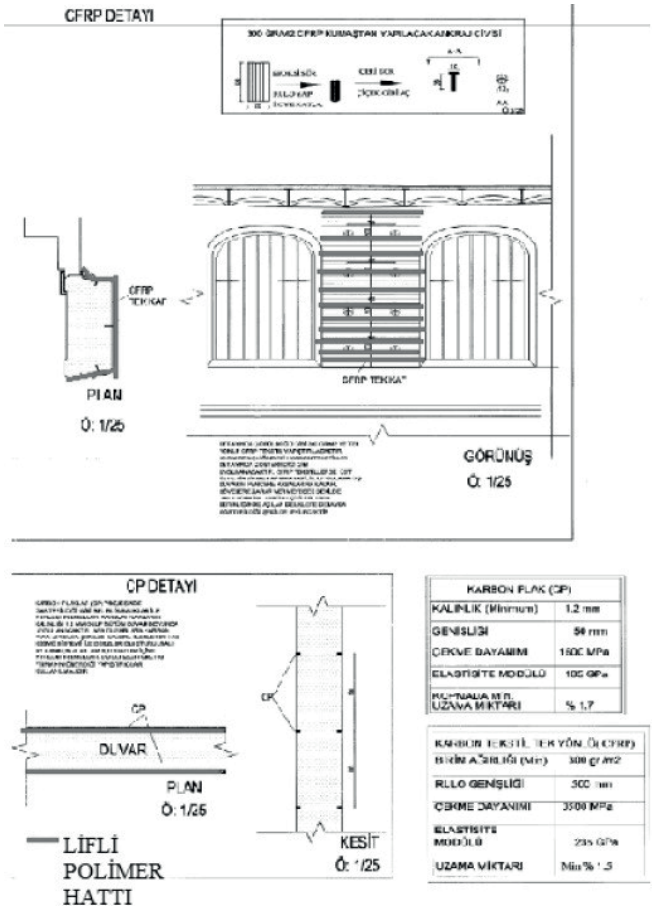
Şekil-26: Doğu cephesi—2012 yılı çelik lama paftası –[6]



Şekil-27: Güney Cephesi—2012 yılı çelik lama paftası –[6]



Şekil-28: Kuzey cephesi—2012 yılı çelik lama paftası–[6]



Şekil-29: 2012 yılı Lifli polimer uygulama detayı–[6]

2. **Yapı içerisine mevcut yapı ile entegre edilen bir çelik konstrüksiyon taşıyıcı sistemin yapılması:**

- Çelik kasnak detayı;

Mevcut yapıda, mimariye bağlı açılan yeni boşlukların çevresine çelik konstrüksiyon kasnak dönülmesi önerilmiştir.

- Çelik konstrüksiyon - yıkılmış olan son katının yapılması (Şekil31-32-33-34);

Yıkılmış olan son katının çelik konstrüksiyon ile yapılması- yeni artan yükler, yapıya kazandırılan yeni fonksiyonlar, döşemenin mevcut durumu, son ilave katın depremde yıkıldığı düşünüldüğünde mevcut yapıya en az müdahale olarak değerlendirilmiştir.

- Karbon lifli polimer ile mevcut duvarların güçlendirilmesi (Şekil-29);

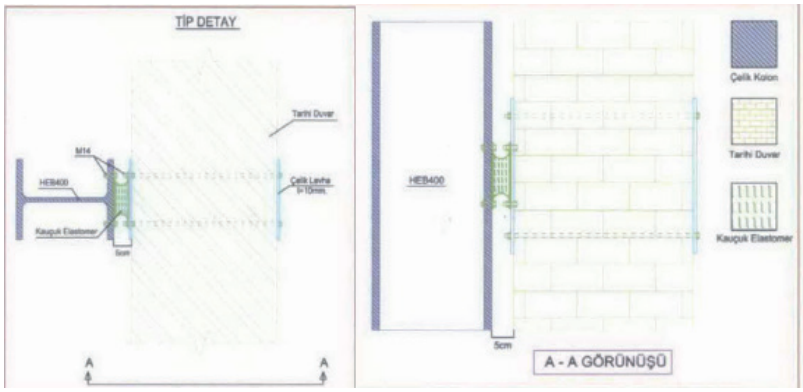
İlave katın yapılması için içeride yeni bir taşıyıcı sistem önerilmiştir. Bu öneri taşıyıcı sistemin aynı zamanda, özgün volta döşemeleri destekleyeceği ifade edilmiştir. Çelik konstrüksiyon sisteminin **döşeme tali kirişleri**nin mevcut volta sistemini destekleyecek şekilde olması düşünülmüştür.

- Radye temel yapılması;

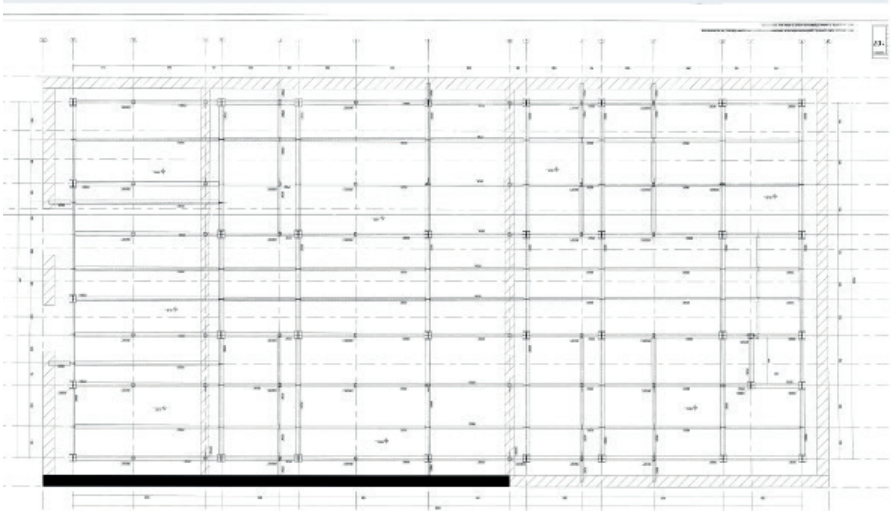
Çelik konstrüksiyon, bodrum katında radye temel sistemi ilave olarak yapılmıştır.

- Çelik konstrüksiyon sistemin mevcut yapıya bağlantısı;

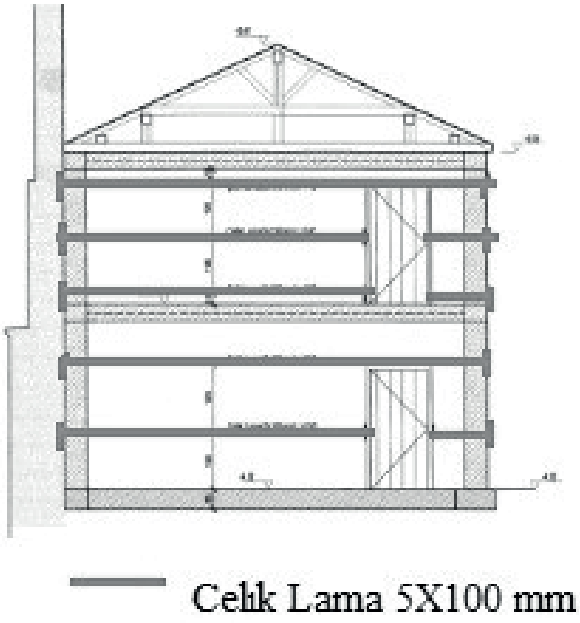
Çelik konstrüksiyon sistemin mevcut yapıya bağlantısı, çelik-elastomer bağlantı detayı ile önerilmiştir. Çelik-elastomer bağlantı detayı, lineer elastik bir davranış sergilemesi ve yatay hareketlenmede gelen etkilerin bir kısmını sönümleyerek, duvarlarla yeni yapılan çelik konstrüksiyon yapı arasında, göreli hareket esnasında esneklik sağlayacağı (bir nevi izolatör) bilinmektedir. Sonuç olarak: çelik yapının hem çekiç etkisi yaratmamış olacağı hem de duvarların düzlem dışı hareketi engellenmiş olacağı belirtilmiştir (Şekil-30).



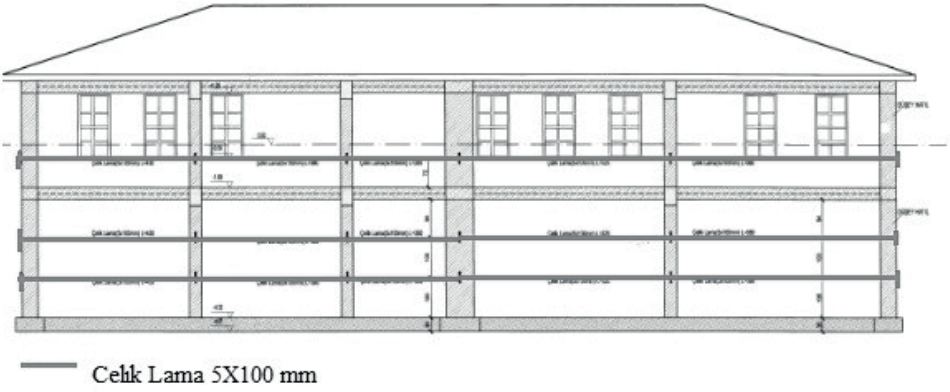
Şekil -30: Çelik-elastomer bağlantı detayı: duvar bağlantısına ait örnek teşkil edecek tip detay ve tip detaya ait görünüş[6]



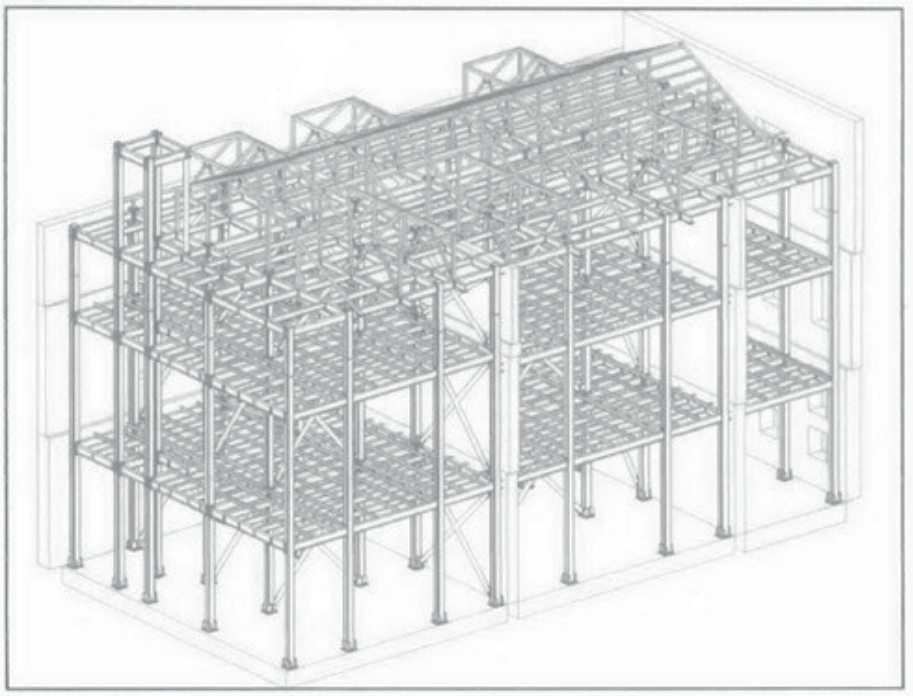
Şekil-31: +9.00 kotlu çelik tavan planı –2012 yılı statik proje [6]



Şekil-32: E-E kesiti—çelik lama paftası 2012 yılı statik proje [6]



Şekil-33: F-F kesiti - çelik lama paftası – 2012 yılı statik proje [6]



Şekil-34: Statik projenin 3 boyutlu görüntüsü - 2012 yılı statik proje [6]

4.2. İkinci Statik Güçlendirme Proje Kararları-2023 Yılı Projesi[8] (TBDY 2018'e Göre)

Yapının ikinci statik güçlendirme analizleri, 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre değerlendirilmiştir.

2016 yılında yarım bırakılan güçlendirme uygulaması ve aradan geçen yedi yıllık sürede bakımsız kalan yapıda; hasarların/bozulmaların/değişimlerin olduğu görülmüştür. Ayrıca, 2007 TDY yürürlükten kaldırılması ve 2018 TBDY yürürlüğe girmesi, yapının mimari fonksiyonunun kütüphane olarak değiştirilmesi gibi nedenlerle, 2012 güçlendirme projeleri geçerliliğini yitirmiştir. Bu nedenlerle 2023 yılında; statik güçlendirme analizleri, raporları

8 Bu kısımda verilen paftalar 2012 yılında Fersah Mimarlık ve alt ekipleri tarafından hazırlanmış olan rapor ve paftalardır. Bu projenin tüm müelliflik hakları Kültür ve Turizm Bakanlığı'na ait olup tüm işlemler Samsun Rölöve ve Anıtlara Müdürlüğü (SRAM) tarafından gerçekleştirildiğinden kaynakça olarak SRAM arşivi verilmektedir. Öte taraftan çalışmaya istinaden, etik olarak, NAS İnşaat Ltd. ve Adnan Bayram Restorasyon Şti.'den resmi izin alınmıştır.

ve buna bağlı mimari restorasyon vb. projeleri yeniden SRAM tarafından yeniden hazırlatılmıştır. Bu projeler de SKVKBK tarafından onaylanmıştır (statik analizi ve güçlendirme projeleri hariç olmak üzere).

.2.1. Tanımlanan Yapı Hasarları – (Genel Olarak)

2023 yılında yapının mevcut durumu özetle şöyledir: 2012 projesinde önerilen ilave son katın çelik sistemi, strüktürü ve çatısı yapılamamış; çatı, geçici bir örtüyle kapatılmıştır. Radye temeli yapılmıştır, döşemelerin tamamı ise yapılmamıştır. Saat kulesinin olduğu kısım yıkılmış durumdadır. Yapıda tesisat ve alt yapıya ilişkin (drenaj vb.) herhangi bir uygulama yapılamamış durumdadır. Pencereler geçici olarak kapatılmış ve yapı boş durumda teslim alınmıştır. Duvar güçlendirme uygulamalarının, özellikle iç cephede, yapılamamış olduğu tespit edilmiştir. Yapının değerlendirilmesinde; Zerin ve Sarıalioğlu [13]'de önerilen tarihi yapıların deprem performanslarının değerlendirilmesine ilişkin yöntemlerden referans alınmıştır. Yapı, bu haliyle yeniden ele alınmıştır.

4.2.2.Güçlendirme Raporunda Yapısal Analiz (Çelik ve Yığma Yapılar)

Mevcut yapı değerlendirmesi, DD2 seviyesi Depreme göre 475 yıllık depreme[9] göre Eurcode 3,6,8 prosedürlerine göre yapılmıştır. Etkin dış tesir deprem olduğu için genelde yapı performansları deprem etkinliğine göre çıkarılmıştır. Analiz sonucu olarak Mod Kütle katılımları, taban kesme kuvvetleri ve eleman tasarım (Eurocode 3 e göre) performans faktörleri hesaplanmıştır.

2023 statik güçlendirme raporunda: deprem etkileri yapısal analizlerinde, yapıların etkin birinci şekil değiştirme spektruma uygun yük etkime değerleri dikkate alınarak eş değer deprem yüklemesi prosedürünce yapıya etkiyen yük hesabı, deprem etkisinin %75'i minimum tesir edecek şekilde katsayılarla arttırılmaktadır. Bu işlem uygulandığında, çelik taşıyıcılı yapıda dikkate alınan R=2,5 seviyesinde plastikleşme davranışı güvenli kalınarak elastiğe yakın davranış olarak değerlendirilmiş olmaktadır. Diğer yandan yığma kabuk davranışı için R=1 seviyesi hesap değeri alınırken duvarların üzerine gelen gerçek yüklerin çıkarılması, eşdeğer deprem yükü prosedürü uygula-

9 Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2) DD-2 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %10 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu seyrek deprem yer hareketini nitelemektedir. Bu deprem yer hareketi, standart tasarım deprem yer hareketi olarak da adlandırılmaktadır [12].

narak arttırılmıştır. Dolayısıyla çok rijit duvarlar üstlerine beklenenden fazla yük aldığı hesaplarda da kabul edilmiştir.

Mevcut Çelik Yapının DD-2 Deprem Hareketi Altında Değerlendirilmesi

Mevcut çelik ve yığma yapı, düşey yüklerin ortak etkisi altında analiz edilmiştir ve yapı elemanlarının performansları belirlenmiştir.

Yatay yük etkileri için Ss=1,171 ve S1=0,353 olarak tanımlanmıştır. DD2 (50 yılda aşılma olasılığı % 10) yer hareketi deprem için tanımlaması için yapı önem katsayısı I = 1,5 olarak alınmıştır. R katsayısı ise mevcut yapı olmasına rağmen plastikleşme kapasitesi düşünülerek 2,5 alınmıştır. Ancak Eşdeğer deprem yükü prosedürü uygulandıktan sonra yapıya tesir eden taban yükleri elastik davranışa yakın çıkmıştır.

Performans faktör analizi sonucunda; yapının "Kontrollü Hasar" seviyesinde bulunmakta olduğu ama yapının plastik alana geçmediği anlaşılmıştır. Bu sonucun başlıca sebebi, düşey yüklerdir. Sonuç olarak; çelik yapının deprem etkilerini plastikleşmeden karşılayabildiği sonucuna ulaşılmıştır**.**

Yapının her yönde olmak üzere, yaklaşık %60 duvar alanı hasar alarak yapının can güvenliği sınırını geçtiği gözlemlenmiştir. Bu durumda duvarların FRP kumaşlar kullanılarak güçlendirilmesi ve Kontrollü Hasar bölgesine çekilecek şekilde dayanımının arttırılması öngörülmüştür.

Güçlendirme hesaplarına göre; yapı üzerine gelen deprem yüklerinin % 90'nından fazlasını karşılayacak şekilde güçlendirilip kontrollü hasar bölgesinde tutulabilmektedir. Diğer yandan Hesap Modellemesinde R katsayısı 2.0 olarak kullanılırken Eurocode 8 2.2 seviyesine izin vermektedir. Bu durumda lamine karbon çubukların sağlayacağı % 10 unun altındaki dayanım seviyesi zaten plastikleşme davranış katsayısı sınır değerinin altında kalarak bu elemanların kullanılmasının gerekliliğini egale etmektedir.

Ayrıca güçlendirme hesaplarında, VR_{CP} lamine karbon çubuk katkısının VR_{FRP} ve Kumaşa göre ne kadar düşük kaldığı gözlemlenmiş ve bu malzeme güçlendirme sisteminden çıkarılarak güçlendirme sadece FRP kumaş ve FRP ankraj sistemiyle tasarlanmıştır.

Yığma ile Çelik Yapının Bağlantı Tasarımı

Yığma duvarların mevcut çelik konstrüksiyon ile bağlantısında; duvarın içe veya dışa hareketi durumu nedeniyle hem çekme hem de basınç kuvvetleri oluşabilmektedir. Bu nedenle bağlantıda hem çekme kuvvetini taşıyacak dolu demir dairesel kesitler (M30, M36 veya M42) hem de UNP120 profiller kullanılmıştır.

Yığma duvar – mevcut çelik konstrüksiyon bağlantısı M30 gijonlar[10] maksimum 1 metre aralıklar ile gerçekleştirilmiştir.

S235 malzemeden imal edilmiş M30 gijon çekme kapasitesi

$$ØTn = Ø\ Fy\ A = 0.9 * 235 * 706.86\ e\text{-}3 = 149.5\ kN$$

Yığma duvar dışındaki plaka boyutu: 200 mmx 200 mm

M30 gijonda çekme kuvveti olması durumunda plaka altında oluşacak basınç gerilmesi;

$$q = 149.5\ e3 / (200 * 200) = 3.74\ MPa$$

Mevcut çelik yapıda gerçekleştirilen analizler sonucunda, yapının üzerine etkiyen düşey yüklerin plastik alana geçtiği ama hem yapı önem katsayısının 1,5 kullanılması hem de eşdeğer deprem yükü yaklaşımı ile neredeyse elastik davranış sergilemesi beklenen yapı için deprem yüklerinin uygulanması, dolayısıyla bu performans faktör limit aşımları, düşük (dikkate alınmayabilir) düzeyde bulunmuştur.

4.2.3. Güçlendirme Projesi Kararları

Yapının özgün durumu olan yığma taşıyıcı sisteme ait projeleri mevcut değildir. Proje bilgilerinin doğrulanması amacıyla, yeterli düzeyde ölçümler yapılan mevcut yapı "*2018 -Deprem Etkisi Altındaki Binaların Tasarımı –*

10 M30 (veya diğer gijonlar için M36- veya M42 gijon) kullanılması-2023 statik güçlendirme raporuna göre: Uygulama sırasında öncelikle yığma duvarda M30 gijonun geçeceği delik açılacaktır. İki ucunda t=25 mm (gijona göre olacak) kalınlığında plaka bulunan UNP120 profil mevcut çelik kiriş üst başlığı üzerine sahada kaynakla sabitlenecektir. Sonrasında M30 gijon hem UNP120 profil ucundaki plakalardaki deliklerden hem de duvardaki delikten geçirilerek duvar dışında plaka ve somunlar ile sabitlenecektir.

Bölüm 15.2'ye" göre sınırlı bilgi düzeyinde seçilmiş ve bu bilgi düzeyi için istenilen şartlara uyulmuştur.

Yapının deprem performansı, "*TBDY 2018 Bölüm 15 – Deprem etkisi altında mevcut bina sistemi değerlendirilmesi ve güçlendirme tasarımı için özel kurallar*" ve "Eurocode 1998-1 (Seismic Code) & Eurocode 1996-1 (Masonry Code) kapsamında değerlendirilmiştir.

Restitütif çalışmalara bakıldığında 2023 deki mevcut iki katlı yapı; ilk döneminden sonra en üst katı ve çatısı kaldırılarak bu hale getirilmiştir.

Kültür ve Turizm Bakanlığı Samsun Rölöve ve Anıtlar Müdürlüğü'nce yürütülen restorasyon işi kapsamında; 2012 projeleri ve uygulamaları yeniden değerlendirilmiştir. Yapının; restitüsyon projesinde önerildiği gibi bodrum + zemin + iki normal katlı hale getirilmesi öngörülmüştür.

2023 projesinde; yapının ilk restitütif hali dikkate alınarak:

- Modifiye edilen çelik konstrüksiyon ve dış kabuk duvarların analizi yapılmıştır.

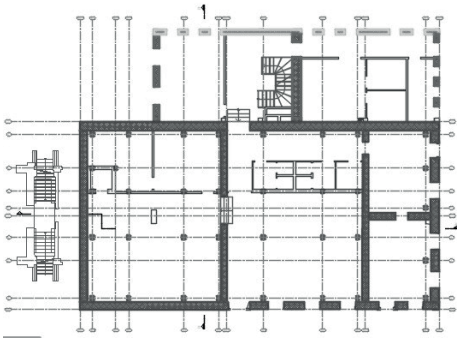
- Sırasıyla statik güçlendirmenin detaylandırılması (FRP kumaşlar kullanılarak) yapılmıştır.

- 2023 yılı statik güçlendirme raporu kapsamında, yarım kalan çelik konstrüksiyon uygulamasının değerlendirilerek yeniden tasarımı yapılmıştır. Hazırlanan proje ve detay örnekleri Şekil 35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-45-46-47 de verilmektedir.

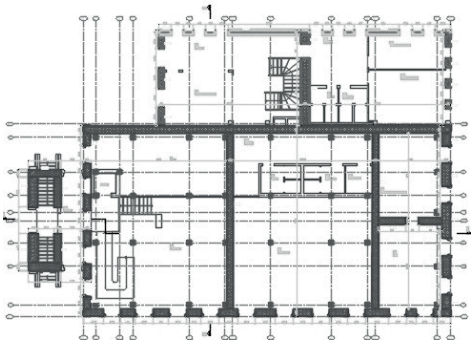
2012 yılı uygulamaları kapsamında; yığma sistemli olan yapının içine çelik bir konstrüksiyon yerleştirilmiş olup volta döşemelerin bu çelik konstrüksiyon tarafından taşınması tasarlanmıştır. Fakat önerilen sistemlerin yapılması sırasında, zaten mevcut olan volta döşemelerin neredeyse tamamen kaldırıldığı tespit edilmiştir.

Yapının, mevcut statik projeleri olmamasından dolayı, onaylı mimari rölöve projeleri incelenmiş ve tüm elemanlar yerinde tespit edilmeye çalışılmıştır. Yapının taşıyıcı sistemine 2012-2016 yılı arası uygulamalarla müdahale edildiğinde, tüm taşıyıcı elemanları kesin olarak tespit edilememiştir. Ancak yığma duvarlarda harç kalınlığının varsayımı yapıldıktan sonra, yaklaşık etkin kalınlıkları gerçek boyutları hesaplanmıştır. Bölgesel harç analizlerinin değerlendirilmesinde Sarıalioğlu [14] tezinde ve Sarıalioğlu [15] makale-

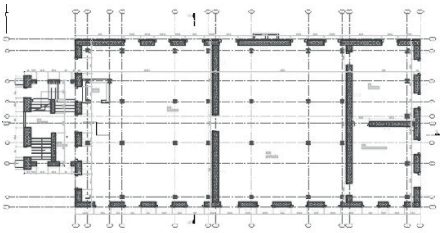
sinde verilen harç analizleriyle yapının harç analizleri arasında karşılaştırma yapılmıştır. Sarıalioğlu'nun bu çalışmalarındaki analizler, bölgesel malzemenin temini noktasında yol gösterici olmuştur.



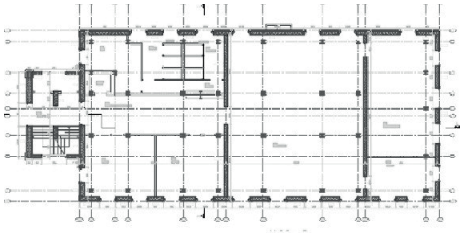
Şekil-35: -2.00 kot kat planı- 2023 projesi [6]



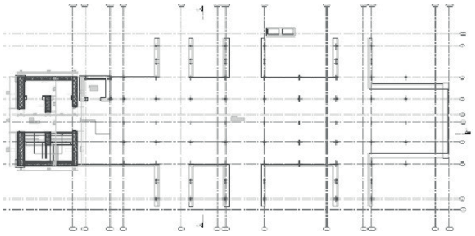
Şekil-36: +-0.00 kot kat planı 2023 projesi [6]



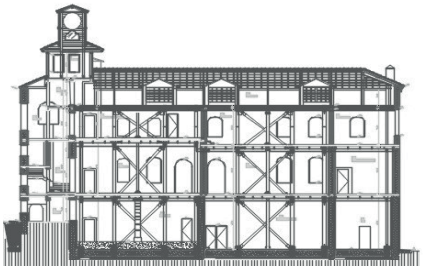
Şekil-37: +3.00 kot kat planı 2023 projesi [6]



Şekil-38: +7.50 kot kat planı- 2023 projesi [6]



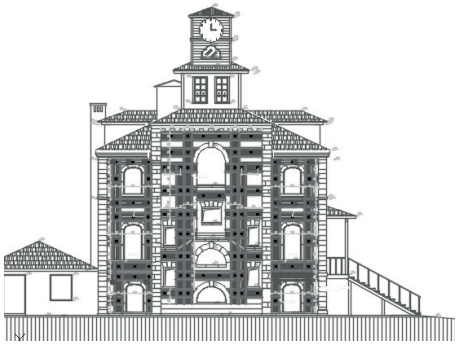
Şekil-39:+10.00 kot kat planı -2023 projesi [6]



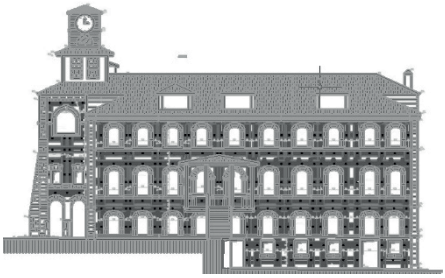
Şekil-40: A-A kesiti-sarı renkli olan kısımlar çelik uygulaması-2023 projesi- [6]



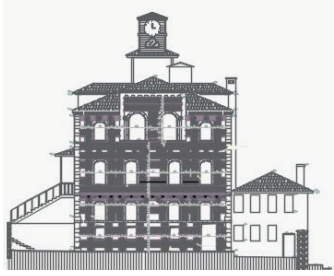
Şekil-41: B-B kesiti -sarı renkli olan kısımlar çelik uygulaması-2023 projesi [6]



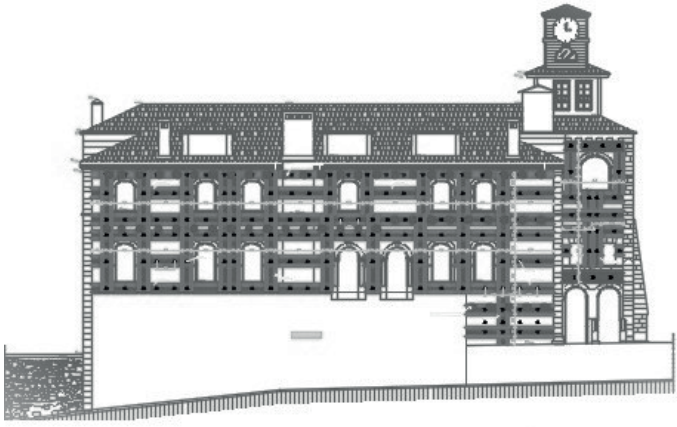
Şekil-42: Batı cephesi-mor renkli olan kısımlar FRP uygulaması-2023 projesi [6]



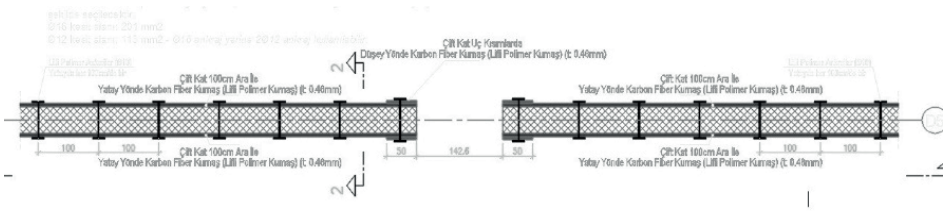
Şekil-43: Güney cephesi-mor renkli olan kısımlar frp uygulaması-2023 projesi [6]



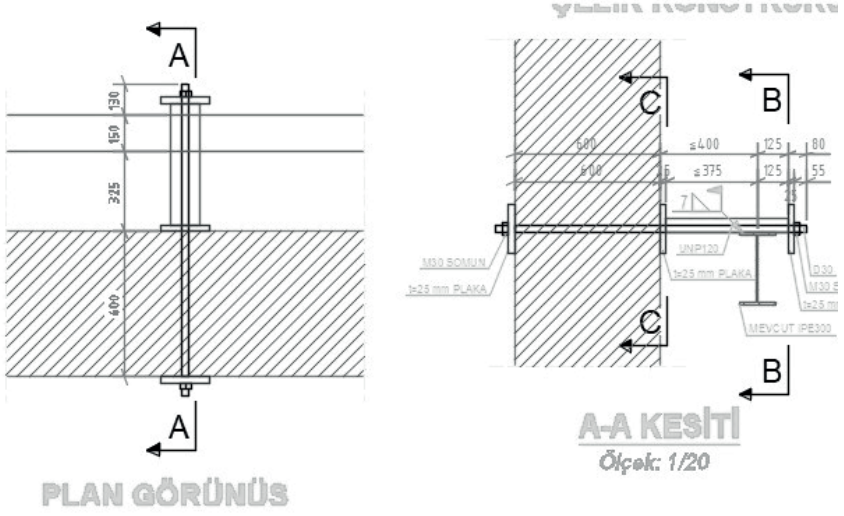
Şekil-44: Doğu cephesi -mor renkli olan kısımlar FRP uygulaması-2023 projesi - [6]



Şekil-45: Kuzey cephesi-mor renkli olan kısımlar FRP uygulaması-2023 projesi - [6]



Şekil-46: Güçlendirme uygulaması duvar detayı -2023 projesi - [6]



Şekil-47:Çelik konstriksiyon - yığma duvar bağlantı detayı-2023 projesi - [6]

4.3. TDY-2007 ve TBDY-2018 Karşılaştırılmalı Değerlendirme [6]

TDY-2007 ve TBDY-2018'e göre yapılmış iki farklı güçlendirme projesi ve uygulaması ile yapının restorasyon süreci tamamlanmak üzeredir. TDY-2007 göre hazırlanan ilk projeler doğrultusunda yaptırılan uygulama yarım kalmıştır. TBDY-2018 göre yapılan projede tüm uygulama bileşenleri değişmiş, analiz bakış açısı, mimar, denetim kurumu ve yüklenici yenilenmiştir. İki projenin projelendirmede kabul ettiği değerler Tablo-1 de özetlenmiştir (Tablo.1).

Tablo-1: TDY-2007 ve TBDY-2018 Karşılaştırılmalı Değerlendirme Tablosu

	TDY-2007	**TBDY-2018**
Mevcut Bina Projesi (Var/Yok)	Yok	Var
Yapının önem katsayısı	Kültür merkezi işlevi olduğundan (I) 1,2	I = 1,5 olarak
Etkin yer ivmesi (A0)	0,4 g	-
Hareketli yük katılım katsayısının (n)	0,6	0,3
Yerel Zemin Sınıfı	-	ZD
Bina Kullanım Sınıfı (BKS)	-	1
1.0 Periyot Spektral İvmesi Katsayısı (S1)	-	0,359
Güçlendirme Elemanlarının Beton Dayanımı	-	25 MPa
Mevcut Çelik Dayanımı	Yok	S275-275MPa
Çelik konstrüksiyon yapının Yapı Davranış Katsayısı (R)	Her iki yön için 5 "Deprem Yüklerinin Çerçeveler ile Birlikte Merkezi Çaprazlı Çelik Perdeler İle Taşınması R=6	R=2,5
Süneklilik Düzeyi	Normal	-
Deprem Parametreleri		
Kısa Periyot Spektral İvmesi Katsayısı (Ss)		1,191 Yatay yük etkileri için Ss=1.171 ve S1=0.353
Tüm sistemdeki deprem yükleri altındaki göreli kat ötelenme seviyeleri	0,005 civarında kaldığı görülmüştür. Böylelikle çok deplasman yeteneği olmayan mevcut yığma duvarların deprem esnasında olası hasar görme riskleri minimize edilmiştir.	-

2012 yılında hazırlanmış olan projede;

- Yapının mevcut yığma sitemi, yığma-çelik iskelet sistem kombinasyonu olarak değiştirilmiştir.
- Mevcut yığma yapı korunup likitleştirilirken, yapının içinden çelik konstrüksiyon yapı çıkmaktadır. Mevcut volta döşeme – çatı – duvar - hareketli ve ilave yükler, çelik konstrüksiyona taşıtılacak şekilde çe-

lik sistem tasarlanmıştır. Bunun yanında, yığma duvar ile çelik yapının entegrasyonu sağlanarak, deprem esnasında birlikte çalışması amaçlanmıştır.

- Yığma yapının, çelik yapıya oranla daha az sünek davranış sergileyeceği düşünülürse; yapacağı kat ötelemeleri, deplasman limitlerinin mümkün olduğu kadar minimuma indirgenmesi ve yığma duvarların ötelenme isteminin tamamen çelik konstrüksiyon yapı tarafından domine edilmesi gerektiği açıklanmıştır.
- Bazı duvarlarda lokal de olsa güçlendirilmeye ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle güçlendirilmesi gereken bölgeler: lokal gerilme yığılmalarının olduğu pencere ve kapı boşluklarının köşe noktaları ve kat hizalarıdır. Bu bölgelere, kılıçlamasına karbon plak uygulaması öngörülmüş, böylelikle hasar görebilecek duvarlarda hasar limitleri de sınırlandırılmak istenilmiştir.
- Yapının asıl kütlelerini duvarlar oluşturduğu için, kabuk model olarak tanımlanan duvarlar sonlu eleman analizi için yaklaşık 0,5 m x 0,5 m karelajlara bölünmüş ve kütleler her bir düğüm noktasına ayrı ayrı olarak tanımlanmıştır.
- Böylelikle kütle kat seviyesinde tanımlanmayarak, diğer durumda ortaya çıkabilecek olan gerçek olmayan yüksek gerilme değerlerinin elde edilmesinden kaçınılmıştır.
- Çelik yapı kısmı için, yığma yapının mevcut geometrisine uygun olarak düzenlenmiş aks sistemi oluşturulmuş ve kat seviyelerinde yığma duvar ile olan bağlantıları için rijit kütlesi olmayan çelik - elostermetrik bağlantı elemanları tanımlanmıştır

2023 yılı statik müdahalelerinde:

- Başlanmış ve yarım bırakılmış olan bir uygulamanın toparlanması ve sistemin son deprem yönetmeliğine göre değerlendirilmesi zorunlu hale gelmiştir.
- Çelik tasarım hesaplarında; yapı çelik elemanlarına etkiyen yükler görülemediği için elemanların hangi etkilere dayandığı anlaşılamamıştır. Bu nedenle düşük çıkan performans faktörleri 2023 yılı projesinde tekrar sorgulanmıştır (Şekil 48-49).
- Yapı için plastikleşme katsayısı R=6 alındığı, eşdeğer deprem yükü artırımı yapılmadığı ve çelik perde sistemlere etkiyen deprem etkileri olası deprem etkilerinden düşük verildiği için kolon ve düşey çapraz performansları buna bağlı olarak güvenli çıkmıştır.

- Yığma duvar analizleri ve güçlendirme hesapları neticesinde; lamine karbon plak, FRP kumaş katkısına kıyasla % 10 seviyelerinde kalmıştır. Ancak 2012 yılında gerçekleştirilen güçlendirme projesinde her bir duvarda sadece 2 sıra derze konulmuş lamine karbon plakların duvara kayma dayanım katkısıyla duvar dayanımını neredeyse 2 katına çıkarmaktadır.
- Derzlere konulan cam elyaf çubukların tek etkili olduğu deformasyon tipi, diyagonal çatlak oluşumudur. Nitekim 2023 statik raporunda duvar deformasyon tiplerine bakıldığında, çok az duvarda diagonal deformasyonun etkin olduğu anlaşılmaktadır. Daha çok moment etkilerinden dolayı azalan basınç kesit alanında oluşacak kayma riski, daha etkindir. Bu da ancak duvarı FRP kumaş ile dikey yönde de sargılayarak sağlanabilecek bir davranıştır. Bu nedenle 2023 yılı güçlendirme tasarımı, buna dikkat edilerek gerçekleştirilmiştir. 2012 duvar güçlendirme sisteminin, duvar dayanım arttırma yük seviyelerine ulaşılamayacağı anlaşılmıştır.

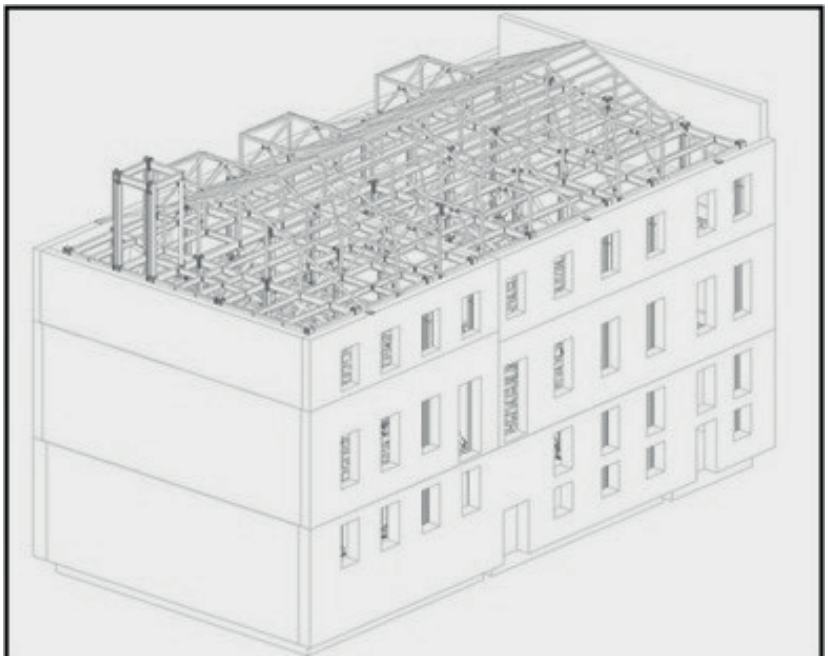
2012 analizleri sadece 3 katlı yapı için gerçekleştirilmiştir. 2012 güçlendirme projesinde; SAP2000 yazılımında kabuk elemanlarla tanımlanan duvarlar, olması gerekenden daha kuvvetli gösterilmiş; cam elyaf etkileri hesaplarında sadece duvar kayma dayanımına destek sağlayacak şekilde değerlendirilmiştir. Duvarların kayma dayanımlarının, görece diğer deformasyon tiplerine göre çok daha yüksek çıkması nedeniyle gerçek durum bu çalışmada yansıtılamamış olup yapı olduğundan çok daha güçlü gösterilmiştir.

2023 hesap raporu kapsamında, yapı duvarlarına etkiyebilecek doğru yükler çıkarılmış, yapı duvarları doğru deformasyon risklerine göre güçlendirilmiştir. 2023 güçlendirme projesinde, 2012 projesinde önerilen duvar derzlerine sokulan lamine karbon plaklar çıkarılmıştır.

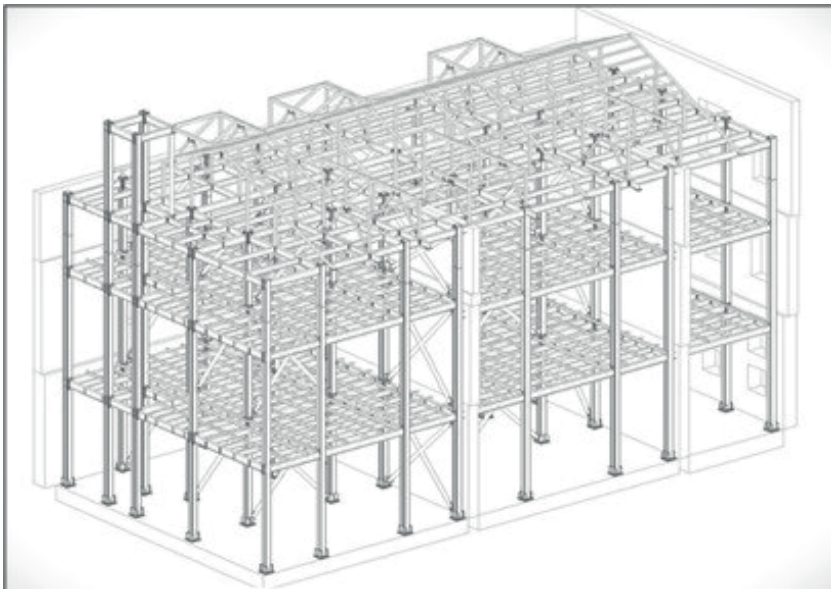
2023 güçlendirmesi, yapı kontrollü hasar düzleminde kalabilecek (475 yıllık döngüsü olan (50 yılda aşılma olasılığı % 10 olan deprem seviyesi) deprem olması durumunda) FRP kumaş ve FRP ankraj sistemiyle duvarlar yüzeylerinden desteklenerek tasarlanmıştır.

2023 güçlendirme projesinde; kabuk yerine çubuk elemanlarla modellenen yapı duvarlarında, gerilme okunması yerine eleman reaksiyon yükleri çıkarılmış, bu yük seviyeleri standartlarda verilen ampirik dayanım formüllerinden çıkarılan dayanımlarla karşılaştırılmış, yapı güvenliği için daha yüksek güvenlik katsayısı ile değerlendirme yapılmıştır. Böylece ikincil efektler

veya lokal yapım tekniği sorunlarından doğabilecek hasar etkileri de kompanse edilmiştir (Şekil-48-49).



Şekil-48: Statik proje 3 boyut görünüm (dış duvar ile birlikte)- 2023 projesi [6]



Şekil-49:Statik proje 3 boyut görünüm (çelik taşıyıcı sistem)- 2023 projesi [6]

5. Sonuç

Osmanlı Devleti'nde, 1854 tarihinde başlayan batılılaşma sürecinde, Osmanlı Devleti topraklarında değişimler birçok alana yayılmıştır. Batılılaşma sürecinde, eğitim alanında, özellikle yabancılar tarafından, Anadolu topraklarında; Kayseri, Yozgat, Nevşehir gibi önemli şehirlerde okullar açılmıştır. Bunlardan birisi de Merzifon Amerikan Koleji'dir.

1895 yılında hizmete açılan okul binası [1]; Amasya ili, Merzifon ilçesi, Sofular Mahallesi, kentsel sit alanı sınırları dışında, mülkiyeti maliye hazinesine ait 1704 ada, 1 parselde (eski 23 ada, 95 parsel) bulunmaktadır.

Kızlar Mektebi (Amerikan Koleji) olarak tanımlanan yapı, Ankara Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kurulunun 06.02.1998 gün ve 5635 sayılı kararı ile tescil kaydı devam eden yapılardandır.

Kızlar Mektebi (Amerikan Koleji) olarak tanımlanan yapı, Ankara Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kurulunun 06.02.1998 gün ve 5635 sayılı kararı ile tescil kaydı devam eden yapılardandır.

Söz konusu yapıya ilişkin SKTVKBK'nın; 24.12.2005 gün ve 493 sayılı kararı ile koruma grubu 1 olarak belirlenmiş, 27.06.2009 gün ve 2181 sayılı kararında taşınmazın İlçe Halk Kütüphanesi olarak kullanılmak üzere Kütüphaneler ve Yayımlar Genel Müdürlüğüne tahsisi uygun bulunmuş, 15.12.2011 gün ve 143 sayılı kararı ile rölöve-restitüsyon projeleri uygun bulunmuş, 28.09.2012 gün ve 561 sayılı kararı ile de restorasyon projesi onaylanmış, 22.05.2014 gün ve 189 sayılı kararında tescilli Amerikan Koleji (Kızlar Mektebi)' nin bahçe duvarının tehlike arz eden bölümünde sağlamlaştırmaya yönelik müdahalelerin aynı malzeme kullanılarak özgün duvar dokusuna uygun olarak yapılabileceğine karar verilmiş, 23.01.2015 gün ve 2409 sayılı kararı ile imar planı değişikliği uygun bulunmuş, 26.02.2015 gün ve 2409 sayılı kararı ile tescilli yapılar için belirlenen koruma alanı içerisinde kalmış, 21.06.2017 gün ve 4541 sayılı kararı ile de yola terk belgeleri uygun bulunmuştur.

SKVKBK'nın 26.01.2023 tarih ve 9099 sayılı karar ile de " ... *Merzifon Kızlar Mektebinin Restorasyon işi kapsamında yapımına başlanacak bahçe duvarına ilişkin Müze Müdürlüğünce yapılan sondaj kazıları sırasında bahçe duvarı güzergahında ortaya çıkan 19. y*üzyıla *ait su kanalının mimari ve malzeme olarak korunmaya de*ğer özellik taşımadığı ve bozul*muş durumda olduğu anlaşıldığından, 2863 sayılı yasa kapsamında korunması gerekli taşınmaz kültür varlığı olarak tesciline gerek olmadığına, tescilli Kızlar Mek-*

tebinin restorasyon işi kapsamında yer alan bahçe duvarı inşaatının Rölöve ve Anıtlar Müdürlüğü denetiminde devam edebileceğine .. " karar verilmiştir [16]. Yapının restorasyon ve deprem güçlendirme çalışmaları bu kararlar doğrultusunda devam etmektedir.

2007 TDY VE 2018 TBDY ile analiz edilen aynı yapının güçlendirme yaklaşımları, farklı sonuçları ve uygulamaları getirmiştir. Özellikle 2012 yılı çalışmasında; mevcut durum statik rölövesinin ve analizinin belgelenmemesi, 2007 TDY ile başlanılmış statik projeye göre yapılmış uygulamanın yarım bırakılması ve önerilen güçlendirmenin gereklerinin tam anlamıyla yerine getirilmemesi sonucunda yapı melezlenmiş ve özgün halini yitirmiştir. Bu nedenle 2023 yılı çalışmasında, yapıda elde kalan kalıntının toparlanıp ayağa kaldırılması/işlevlendirilmesi amacını ön plana çıkarmıştır.

Tescilli eserlerin güçlendirme projelerinde, mevcut sistem ruhunun, öncelikle tam anlamıyla analizinin ve irdelenmesinin yapılması gerekmektedir.

Gelinen nokta itibariyle; yapının özgün taşıyıcı sistemi FRP destekli yığma duvar - çelik iskelet sistemlerinin iççice geçirildiği bir hale getirilerek güçlendirilmiştir. Yapının işlevi ve plan şeması de kullanım ihtiyacına bağlı olarak değiştirilmiştir. Yapının cephe görünümü ve gabarisinde restitüsyon projesine uygun şekilde özgününe sadık kalınmıştır (Şekil 50-51-52).



Şekil-50: Mimari proje 3 boyut görünüm [11]



Şekil-51: Tarihi yapının restorasyon aşamasındaki görünümü [11]



Şekil-52: Tarihi yapının restorasyon aşamasındaki görünümü (ön cephe)[11]

Güçlendirme uygulamalarında yapının mevcut durumu ve taşıyıcı sisteminin mevcut haliyle korunmasının, koruma yaklaşımı açısından daha doğru olduğu görülmektedir. Yıllarca ilk yapıldığı haliyle ve taşıyıcısı ile ayakta kalan tescilli yapılara, yakın dönem tekniği ve anlayışı ile yaklaşıldığında; yapıya hem zarar verilebilmekte, yıkılmasına ve/veya hasarlanmasına ve özgünlüğünün tamamen ortadan kalkmasına neden olunabilmektedir. Ancak uzun zaman atıl kalan, depremde veya herhangi bir nedenle tahrip olan tarihi yapıların farklı işlevle kullanılmak amacıyla yeniden tasarlanmalarında;

teknolojik yapı malzemelerinin de (yapının özgün görünümüne ve orijinal yapı malzemesine zarar vermeden) kullanılabilmesinin tarihi yapıların daha uzun sürelerde hizmet vererek fayda sağlayacağı görüşüne varılmıştır. Bu durumda inşaat mühendisliği çalışma alanında karar vermemiz ve cevap bulmamız gereken sorular oluşmaktadır:

- Tarihi yapı mevcuttaki malzeme ve mevcut yapım tekniğiyle depreme karşı korunabilinir mi ?
- Tarihi yapılardaki güçlendirme uygulamalarında hangi elemanı ne kadar hangi yöntem ile güçlendirilmelidir ?

Yüzyılın felaketi olarak adlandırılan 6 Şubat 2023 tarihli Kahramanmaraş merkezli depremler bize göstermiştir ki tarihi yapılara dair müdahaleler üst düzey inşaat mühendisi tecrübesi gerektirmektedir. Tarihi yapılar için koruma uygulama kararlarının alındığı Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulları'nda tarihi yapılara dair sağlıklı ve realist statik müdahale kararlarını alınabilmesi için bu kurullara tarihi yapı uzmanı inşaat mühendisleri üye olarak alınmalı, konusunda uzman üyenin verdiği kararlar doğrultusunda onaylanan güçlendirme projeleri uygulanmalıdır.

Teşekkür

Merzifon Tarihi Kızlar Mektebi Restorasyon ve Deprem Güçlendirme Çalışmaları'na katkısı olan Kültür ve Turizm Bakanlığı'na, Kültür Ve Turizm Bakanlığı Samsun Rölöve ve Anıtlar Müdürlüğü'ne ve Müdürlük personellerinden Mimar Adnan AYTUĞLU'ya, İnşaat Mühendisi Engin MUTLU'ya, Makine Mühendisi Ali ŞENDUR'a, Elektrik-Elektronik Mühendisi İbrahim TOKER'e; Kütüphaneler ve Yayımlar Genel Müdürlüğü'ne, Samsun Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu Müdürlüğü'ne, Proje Müellifleri Fersah Mimarlık Müh. İnş. Ltd. ŞTİ.'ne, Mimar Emre BOĞA'ya, Nas Restorasyon – Adnan Bayram Restorasyon'dan İnşaat Mühendisi Emin Çağrı BAYRAM'a, Mimar Mesut YILMAZ'a ve Sanat Tarihçisi Mehmet ŞAHİN'e teşekkür ederiz.

Kaynaklar

[1] Bayram, S., Tarihte Merzifon Amerikan Anatolian Koleji ve Belgeleriyle Ermeni Ayaklanmaları, Önder Matbaacılık, Ankara, 15-216. https://www.sadibayram.com/?page=makaleler&mid=399&id=3

[2] Erdoğan, N., Merzifon Amerikan Koleji'nin incelenmesi, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mimarlık Ana Bilim Dalı, Konya.2020.

[3] Alan, G., Merzifon Amerikan Koleji Ve Anadolu`daki Etkileri, Yayımlanmamış Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Tarih Ana Bilim Dalı, Yakınçağ Tarihi Bilim Dalı, 2002.

[4] Boğa, E., Fersah Mimarlık proje raporları,2012.

[5] Kırbaş, A., Geç Osmanlı döneminde bir misyoner yerleşkesi: Merzifon Anadolu Koleji, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Ana Bilim Dalı, Mimarlık Tarihi Bilim Dalı, s.32-48, 2019.

[6] Samsun Rölöve ve Anıtlar Müdürlüğü Arşivi,2024 ve öncesi,2024.

[7] SALT arşivi,2024.

[8] Genç, S. Merzifon kazasının idari, sosyal ve ekonomik tarihi (1839-1914) , Yayımlanmamış Doktora Tezi, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Tarih Ana Bilim Dalı,2019.

[9] Saatçi, B., Merzifon Amerikan board misyoner yerleşkesinde yer alan yapıların değişim analiz ve değerlendirmesi, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Ana Bilim Dalı,2019.

[10] Gül, O.,Amerikan Board misyonerliği ve 1892-1893 Merzifon Ermeni İsyanına etkileri, Yayımlanmamış Yüksek Lisans tezi, Batman Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Tarih Ana Bilim Dalı, 2012.

[11] Sarıalioğlu, A., 2024 ve öncesi kişisel arşivi,2024.

[12] Bozer,A., Tasarım Spektral İvme Katsayılarının DBYBHY 2007 ve TBDY 2018 Yönetmeliklerine Göre Karşılaştırması, DÜMF Mühendislik Dergisi, 11-1, 393-404, 2020.

[13] Zerin,Z. ve Sarıalioğlu,A., Restorasyon Uygulaması Yapılacak Tarihi Yapılarda Tahribatsız Yöntemlerle Deprem Performansının İncelenmesi Örnek Çalışma: Sinop Tarihi Cezaevi, Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Trabzon.2017.

[14] Sarıalioğlu, A., Orta Karadeniz Bölgesi Sahil İllerinde Restorasyon Aşamasındaki Bazı Tarihi Yapı Harçlarından Genel Harç Önerileri Geliştirilmesi. Yayımlanmamış Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2021.

[15] Sarıalioğlu, A., Ünye İlçesi Saray Hamamı Restorasyon Değerlendirmesi, Türk Arkeoloji ve Etnografya Dergisi, sayı 82, s.95-109,2021.

[16] Samsun Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu Müdürlüğü Arşivi, 05.03/229 sayılı dosya, 2024.

27 EYLÜL 2024

7. ULUSLARARASI TARİHİ YAPILARIN GÜÇLENDİRİLMESİ VE GELECEĞE GÜVENLE DEVRİ SEMPOZYUMU

7. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRENGTHENING HISTORICAL BUILDINGS AND TRANSFERRING THEM SAFELY TO THE FUTURE

7. SEMPOZYÛMA NAVNETEWEYÎ LI DERBARÊ QEWÎKIRIN Û PARASTINA AVAHÎYÊN DÎROKÎ

DİYARBAKIR, SEZAİ KARAKOÇ KÜLTÜR MERKEZİ

A SALONU - 2A OTURUMU

Oturum Başkanları
Sinan Açıkgöz, Bora Pulatsu

Geleneksel Sivil Mimari Yapılarının Deprem Sonrası Keşif Verisinin Toplanması için Bir Yaklaşım: Antakya'nın Hımış Evleri Üzerinden 2023 Türkiye Deprem Sekansı Deneyimi
Kökcan Dönmez, Yasemin Didem Aktaş, Barış Erdil, Filiz Diri Akyıldız, Felat Dursun

Lazer doppler vibrometrisi kullanılarak tarihi duvar yapılarının deprem sonrası titreşim frekanslarının hızlı tahmini
Baran Bozyiğit, Sinan Açikgöz

Kahramanmaraş ve Hatay Merkezli Depremlerden Etkilenen Tarihi Köprüler
Ayşe Avşin

Türkiye'nin Güneydoğusu'ndaki Tarihi Taş Yığma Camiinin Sismik Değerlendirilmesi
Arova Konak, İdris Bedirhanoğlu, Sinan Açıkgöz

Güçlendirilmemiş Yığma Yapıların Çökme Mekanizmasının, Süreksizlik Tabanlı Analiz Yoluyla İncelenmesi
Andrei Farcasiu, Peter Griesbach, Rhea Wilson, Sinan Açıkgöz and Bora Pulatsu

TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI ANKARA ŞUBESİ
TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI DİYARBAKIR ŞUBESİ
ODEYA ENDAZYARÊN AVAHÎYÊ

GELENEKSEL SİVİL MİMARİ YAPILARININ DEPREM SONRASI KEŞİF VERİSİNİN TOPLANMASI İÇİN BİR YAKLAŞIM: ANTAKYA'NIN HIMIŞ EVLERİ ÜZERİNDEN 2023 TÜRKİYE DEPREM SEKANSI DENEYİMİ

Kökcan DÖNMEZ[1], Yasemin Didem AKTAŞ[2], Barış ERDİL[3], Filiz DİRİ AKYILDIZ[4], Felat DURSUN[5]

Doktora Öğrencisi, University College London, k.donmez@ucl.ac.uk
[2]Doçent Doktor, University College London, y.aktas@ucl.ac.uk
[3]Doçent Doktor, Van Yüzüncü Yıl üniversitesi, bariserdil@yyu.edu.tr
[4]Öğretim Görevlisi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, f.diri@metu.edu.tr
[5]Dr. Öğretim Üyesi, Dicle Üniversitesi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, felat.dursun@dicle.edu.tr

Özet

2023 Türkiye deprem sekansı, Türkiye'nin güneydoğu bölgesinde yer alan 11 ilin beşerî ve yapılı çevre unsurlarını derinden etkiledi. Depremin etkilerinin belgelenmesi amacıyla, Birleşik Krallık'ın Deprem Mühendisliği Saha Çalışmaları Ekibi (EEFIT), deprem bölgesinde kapsamlı ve zamana yayılan bir araştırma başlattı. Bu kapsamda, bölgenin geleneksel sivil kültür varlığı yelpazesinde önemli bir yeri olan *hımış* tipolojiler üzerine çalışılarak yapısal özelliklerin ve ortaya çıkan hasarın Coğrafi Bilgi Sistemlerinden (CBS) faydalanılarak hızlı ve kullanıcı dostu bir yaklaşımla belgelenerek bir veri tabanı oluşturulması amacıyla Kahramanmaraş, Malatya, Hatay ve Osmaniye'de iki fazdan oluşan bir saha keşif çalışması gerçekleştirildi. Bu makale, benimsenen CBS tabanlı yaklaşımın Türkiye ve geleneksel sivil mimari un-

surları bağlamında eleştirisini yaparak, verinin bir ilksel dökümünü vererek ve özellikle Antakya'daki *hımış* tipolojilere ve deprem performanslarına dair saha gözlemlerini ve analizleri paylaşarak, gelecekteki benzer çalışmalara ışık tutmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Sözcükler: *Hımış*, Deprem Mühendisliği Saha Çalışmaları, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), Ahşap Çerçeveli Yapılar, Geleneksel Sivil Mimari

Abstract

The February 2023 Türkiye earthquake sequence, which struck 11 provinces spread over the southeastern part of the country, devastated the region's built environment with lasting social impacts. In the aftermath of the events, the United Kingdom's Earthquake Engineering Field Investigation Team (EEFIT) launched a comprehensive and longitudinal study within the earthquake-affected area. As part of this study, a two-phase post-disaster reconnaissance survey on the region's traditional building stock, with specific emphasis on *hımış* typologies (hybrid structures with a masonry ground floor and timber framed upper floors with infill or cladding), was also conducted in Kahramanmaraş, Malatya, Hatay and Osmaniye. The survey aimed to document the structural characteristics and conditions of *hımış* structures, and the extent and mechanisms of damage due to earthquakes, using a rapid and user-friendly protocol incorporating Geographic Information Systems (GIS). This article aims to critically assess the adopted GIS-based approach within the context of Türkiye and its vernacular-built heritage, while sharing field observations and analyses on the seismic performances of *hımış* typologies in the region and especially Antakya, to shed light on similar future endeavours.

Keywords: *Hımış*, Earthquake Engineering Reconnaissance, Geographic Information Systems (GIS), Timber-framed Structures, Masonry Structures, Traditional Architecture

1. Giriş

Türkiye'nin güneydoğusunu ve Suriye'nin kuzeyini kapsayan geniş bir coğrafya, 6 Şubat 2023 günü moment büyüklüğü yedinin üstünde, sığ ve merkez üssü Kahramanmaraş olan iki yıkıcı deprem (sırasıyla, TSİ, 04:17'de ve 13:24'de gerçekleşen 7.8 [1] ve 7.5 [2] magnitüde sahip depremler) ile başlayan Türkiye tarihindeki en etkili deprem sekanslarından birine maruz kaldı. Bu coğrafyayı teşkil eden hem beşerî hem de yapılı çevreye ait unsurların depremler karşısındaki hasar görebilirlikleri daha görünür ve ölçülebilir bir hale geldi. Depremlerin ve kapsamlı olarak etkilerinin incelenerek geleceğe dönük derslerin çıkarılmasıyla afet riskinin azaltılması çerçevesinde kilit rolü olan deprem mühendisliği saha çalışmaları, bu dönemde hem ulusal hem de uluslararası birçok tekil veya çok disiplinli ekip tarafından gerçekleştirilmeye başlandı.

Depremleri izleyen ilk haftada Birleşik Krallık Yapı Mühendisleri Odası -Institute of Structural Engineers (IstructE)- bünyesindeki Deprem Mühendisliği Saha Çalışmaları Ekibi -Earthquake Engineering Field Investigation Team (EEFIT)- de 32 kişiden oluşan çok disiplinli bir ekip ile saha çalışmalarını planlamak ve hazırlık yapmak üzere masa başı çalışmalarını başlattı [3, 4, 5]. Ekip, uzmanlıklarına göre, birbirinden beslenen altı grup altında organize oldu: (1) Sismoloji ve Kuvvetli Yer Hareketleri, (2) Geoteknik, (3) Yapı, (4) Altyapı, (5) Uzaktan Algılama ve (6) Yardım, Müdahale ve İyileşme. Saha çalışmalarından birincisi ve en kapsamlısı 13-17 Mart tarihleri arasında 15 kişilik bir ekip ile gerçekleştirildi. Bunu takiben, ilk saha çalışması ışığında tespit edilen ihtiyaçlara yönelik daha spesifik amaçlarla: birincisi 12-20 Nisan 2023 tarihlerinde Hatay ve Osmaniye'deki anıtsal yapılar üzerine [6], ve son ikisi 16-24 Haziran 2023 ve 29 Eylül-4 Ekim 2023 tarihlerinde geleneksel sivil mimari örneklerinden *hımış* tipolojileri ve ayrıca bölgedeki yeniden inşa ve iyileşme süreçlerini incelemek üzere üç saha çalışması daha organize edildi. *Hımış* yapılar özelinde gerçekleştirilen bu saha çalışmalarının amaçları şu şekilde özetlenebilir: (1) Deprem sonrası saha keşif çalışmasında geleneksel yapılar özelinde kullanılabilecek veri toplama formlarının oluşturulması ve tecrübe edilmesi; (2) Kahramanmaraş, Hatay, Malatya ve Osmaniye'de incelenen *hımış* yapıların yapısal özellikleri ile gözlemlenen hasar seviyesi ve mekanizmalarının belgelenmesi; (3) Toplanan verinin kuvvetli yer hareketi özellikleri ve yerel zemin koşullarını da dikkate alarak analiz edilmesi aracılığıyla deprem altında iyi performans gösteren yapı özelliklerinin ortaya konması; ve (4) *Hımış* yapılar için ampirik fiziksel hasar görebilirlik eğrilerinin türetilmesi.

Bu makalede, çalışmamız dahilinde *hımış* tipolojiler için geliştirdiğimiz CBS tabanlı dijital veri toplama yaklaşımı, tüm *hımış* örneklemi için ilksel nitelikteki temel sonuçlar ve Antakya'nın tarihi merkezinde, Kurtuluş caddesi ve yakın çevresinde kümelenen yapılardan elde edilen tipoloji ve hasar bulguları paylaşılıp tartışılmaktadır.

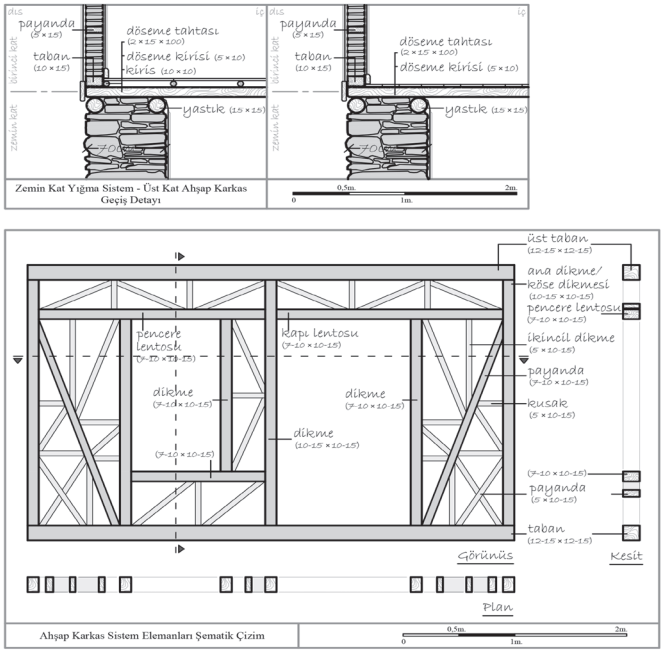
2. Hımış Yapıların Özellikleri ve Deprem Performansı

Ahşap çerçeveli, yığma dolgulu veya çatkılı tipolojiler dünyanın hemen hemen her yerinde farklı uygulamalarıyla karşımıza çıksa da, Türkiye coğrafyasındaki *hımış* yapılar, tekniğinin gelişimi Osmanlı dönemine tekabül eden ve muadillerine Balkanlar ya da Yunanistan gibi komşu bölgelerde de rastladığımız bir tipolojidir. Bu inşa teknolojisinin deprem performansı bakımından sahip olduğu üstünlükler bilimsel literatürde deneysel ve analitik yöntemlerle gösterilmiştir [7-11]. Bunun yanı sıra, Şekil 1'de gösterildiği gibi, *hımış* tipolojilerin, örneğin betonarme gibi yaygın, ancak tasarım ve inşa zafiyetleri sebebiyle Türkiye'de potansiyelini tam gerçekleştiremeyen diğer tipolojilere göre üstünlükleri deprem sonrası saha çalışmaları kapsamındaki gözlemlere dayalı olarak da tespit edilmiştir [12-15]: bu olumlu etkilerden küresel olarak en öne çıkanlar, dolguda veya çatkıda oluşan hasarın onarılabilir oluşu ve can kayıplarının sınırlı kalmasıdır.



Şekil 1- Hımış ve betonarme yapıların Türkiye tarihinin önemli depremlerindeki performansları: 1999 (a) Adapazarı [15] ve (b) Düzce depremi [14], hımış için dolgu seviyesinde kalan ve betonarme için tam veya kısmi göçme ile neticelenen hasar, ve (c) 2023, Kahramanmaraş, hafif hasarlı hımış yapı ve üst üste - pancake tipi - tam göçmüş betonarme bina.

Hımış, alt katı yığma, üst kat(lar)ı ise düşey, yatay ve çapraz ahşap elemanlarla meydana getirilen hibrit bir yapı tipolojisidir. Tanımındaki bu genel prensiplere uymakla birlikte, *hımış* yapılar hem bölgesel hem de tekil olarak büyük farklılıklar göstermektedir. Yığma alt kat, hem örgü çeşidi hem de malzeme seçimi anlamında değişkenlik arz eder - kimi zaman tamamen takviyesiz, kimi zaman depreme dayanımı artırdığı önceki çalışmalar tarafından gösterilmiş olan *hatıl* kullanılarak [16,17], bazen dikmelerle ve/veya payandalarla desteklenerek, yerine göre taş, tuğla, taş ve tuğla veya kerpiç kullanılarak inşa edilebilir. Yığma giriş kat, özellikle düşük kaliteli malzeme yahut yetersiz işçilik ile inşa edildiği durumlarda, *hımış* yapıların deprem dayanımı açısından en zayıf halkasını teşkil eder. Özellikle alt kattaki açıklıkların sonraki müdahalelerle artırıldığı örneklerde, hasarın burayla sınırlı olduğu haller veya buradan başlayarak yapının bütününü etkilemesi sık sık karşılaşılan durumlardır [7].



Şekil 2. Hımış yapılarda zemin kat yığma sistem ile üst kat ahşap çerçeveli sistem geçişinin en tipik iki örneği (üst) ve sistemde kullanılan ahşap çerçevenin şematik çizimi (alt), [18-19]'dan Türkçeleştirilmiştir.

Öte yandan, üst katlar, yapının bütün yüksekliği boyunca yığma devam eden servis duvarları hariç, neredeyse tamamen çivilerle birbirine bağlanan elemanlardan meydana gelen ahşap çerçevelerden müteşekkildir (Şekil 2). Ahşap çerçevelerin içinde kalan, kapı/pencere açıklığı dışındaki bölmeler yığma dolgu ile doldurulabilir, veya ahşap çatkılarla kapatılabilir. Çatkılı türler, çatkının genişliğine göre *bağdadi* veya *şamdolma* gibi isimlerle anılırlar. Kimi literatürde *hımış* terimi yalnızca dolgulu örnekleri karşılamak için kullanılsa da, bu makalede dolgulu veya çatkılı bütün yığma-ahşap çerçeveli hibrit yapılar bu şekilde isimlendirileceklerdir.

Hımış yapıların ahşap çerçeveleri üzerine yürütülen çalışmalar, çerçeveyi inşa ederken kullanılan çivili bağlantıların yüksek enerji sönümleme kapasitesinin olumlu deprem performansında büyük rolü olduğunu ortaya koymaktadır [8, 9]. *Hımış* yapıların ahşap çerçevelerinde kullanılan çapraz elemanların da yanal rijitliği ve kapasiteyi artırarak olumlu davranışa katkısı olduğu ileri sürülmüştür [20]. Çatkılı sistemlerin dolgulu sistemlere göre, hem ağırlıkları nispetinde maruz kaldıkları deprem yükünün daha düşük olması, hem de düzlem dışı kapasitesi çok düşük dolgulu örneklere kıyasla daha iyi bir diyafram etkisi sağlamaları sayesinde daha iyi bir deprem performansı sergilemeleri beklenmektedir [10].

Bütün bunlara rağmen, çoğu zaman, yığma katın inşa özellikleri ile yığma kat ve ahşap çerçeveli üst katlar arasındaki bağlantıların sağlığı (Şekil 2) *hımış* bir yapının deprem performansını etkileyen en önemli faktörlerdendir. Yapıların sonradan maruz bırakıldığı müdahaleler ve korunmuşluk seviyesi de göz önüne alınmalıdır.

3. Hımış Tipolojisi için Deprem Keşfi

Saha keşif çalışmaları, doğal tehlikelerin yapılı çevredeki etkilerinin anlaşılması için önemlidir. Söz konusu depremler ve/veya deprem kaynaklı ikincil tehlikeler olduğunda, keşif çalışmalarından elde edilen veri, yeniden inşa süreçlerinde karar vericilere kılavuzluk edebilmesi ve risk projeksiyonlarının önemli bir katmanı olan ampirik fiziksel hasar görebilirlik modellerinin geliştirilmesine katkı sunması açısından hem yerelde hem de küresel olarak kritik öneme sahiptir. İzlenecek yaklaşım çalışmanın amacı ve hizmet ettiği ihtiyaca göre şekillenir. Örneğin, yalnızca temel yapısal özellikleri ve hasar düzeylerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen hızlı hasar tespit çalışmaları ile örneklemi geniş ancak çözünürlüğü düşük bir veri seti oluşturmak kamusal bilgilendirme ve depremin geniş çaptaki etkilerini görmek bakımından

faydalıdır. Yapıların geometrisinin, inşa tekniklerinin, malzeme özelliklerinin, hasar düzeylerinin ve mekanizmalarının belgelenmesiyle yapılacak çözünürlüğü yüksek daha ayrıntılı bir çalışmada ise aynı süre zarfında daha küçük bir örneklem oluşturulabilirken deprem mühendisliği açısından daha faydalı bilgilere ulaşılabilir.

3.1. Deprem Sonrası Veri Toplama Araçları

Deprem sonrası veri toplama yöntemleri geniş bir spektrumda çeşitlenmektedir. Geleneksel olarak bu işlem kâğıt bazlı veri föyleriyle gerçekleştirilirken, son yıllarda dijital araçlar bunların yerini almıştır. Özellikle CBS tabanlı araçlar, kullanıcının, konum bilgisine entegre metin, nümerik ve medya türünden verileri noktasal olarak toplamasına olanak tanıması açısından sağladığı pratiklikle yaygınlaşmaktadır. Bu araçlar farklı platformlarda oluşturulup çalıştırılabilir. Örneğin, 2020 Ege Denizi depreminin ardından yürüttüğü çalışmada EEFIT ekibi, DeviceMagic isimli bir platformda oluşturulan LfE (Learning from Earthquakes) aracını kullanarak [21], Türkiye'nin depremden etkilenen kıyı kentlerinde ve Yunanistan'ın Samos adasında, yığma ve ahşap türü geleneksel yapıları da içine alan bir veri seti ortaya koymuştur [22]. 2021'deki Haiti depreminden sonra ise, StEER (Structural Extreme Events Reconnaissance) tarafından organize edilen saha çalışması kapsamında Haitili gönüllülerce toplanan 10,000'den fazla yapıya dair bilgi içeren veri seti Fulcrum platformu ile oluşturulmuş ve bahsedilen veri seti hem ilksel analizlere olanak tanımış hem de daha ayrıntılı çalışmalar için elverişli olmuştur [23-25].

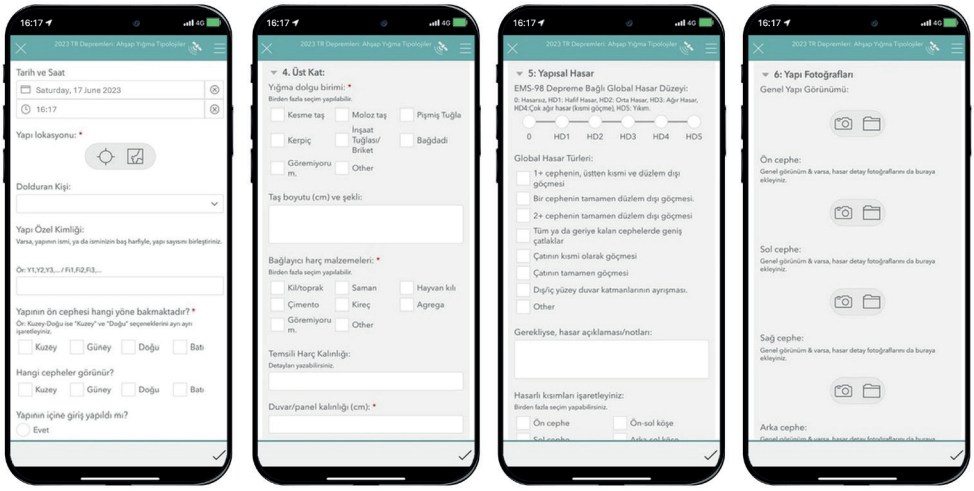
Bu makalenin konusu olan 2023 deprem sekansı sonrası yürütülen çalışmalarda da hem ulusal hem de uluslararası ekipler çeşitli platformlardan faydalanmıştır: EEFIT saha çalışmalarında, AFAD'ın CBS föyü, LfE aracı ve StEER'in Fulcrum platformu ile Orta Doğu Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilen SahaGözü [26] olmak üzere çeşitli araçlar kullanılmıştır. Bütün bu örneklerde, araçların içerdiği veri toplama formlarının, çalışmanın başında depremin ve etkilediği bölgedeki yapıların niteliklerine bağlı olarak yeniden kurgulanabilir olması, cep telefonu veya tablet aracılığıyla kullanılabilir ve hem çevrimiçi hem de çevrimdışı çalışabilir olması vurgulanması gereken özellikler arasındadır. LfE aracı, hem kısa hem de detaylı değerlendirmelere olanak tanıyan bir biçimde tasarlanmıştır ve kullanıcının yürüyor olması ya da bir araçla seyahat halindeyken veri toplaması durumlarını dikkate aldığı için pratiktir. Diğer yandan, Fulcrum ve SahaGözü, mevcut CBS ortamında statik katmanlar eklemeye olanak tanımaktadırlar. Bu ek katmanlar, deprem-

lerin sismotektonik özelliklerini göstererek ekiplere rehberlik etmektedirler. Örneğin, kırılan fayın yüzey projeksiyonu, jeolojik formasyonlar, işlenen AFAD kayıtçılarının ivme, hız ve yer değiştirmeye dair temel mühendislik parametreleri, özellikle depremleri izleyen kısa vadede saha ekiplerince faydalı bulunmuştur.

Tüm bu araçlar, geleneksel tipolojilerin özellikleri ve ihtiyaçları doğrultusunda yeniden tasarlanarak ya da takviye edilerek, bu türden yapıların hasar tespiti amacıyla kullanılabilir olmakla birlikte, bazılarının lisans gereksinimleri, diğerlerininse açık erişim sağlamamaları sebebiyle bu çalışmada ArcGIS'in Survey123 aracı tercih edilmiştir. Bu araç, CBS ile olan entegrasyonu, çevrimdışı çalışma olanağı, geleneksel *hımış* tipolojilerin gerektirdiği tasarım esnekliğini barındırması ve arzu edilen çözünürlükte medya destekli noktasal veri toplayabilme kabiliyeti sebebiyle tercih sebebi olmuştur.

3.2. Tasarlanan Veri Föyü

Veri toplama aktivitesinin gerçekleştirileceği platformun belirlenmesinin ardından, veri föyünün tasarlanması aşamasına geçilmiştir. *Hımış* için hazırlanan içerik taslağı, Survey123'nin çeşitli araçları -metin, nümerik, tekli/çoklu seçim, ölçek, fotoğraf ve ses medyası- kullanılarak internet tarayıcısı üzerinden bir elektronik föy haline getirilmiştir. Föy, maddelerin kendi arasındaki uyumluluğu ve sahada ekipçe kullanımını hızlandırıp kolaylaştırması bakımından gruplandırılarak yedi bölüm halinde organize edilmiştir. Genel hatlarıyla, yapının genel özellikleri kaydedildikten sonra yığma giriş kat ve ahşap çerçeveli üst kat(lar) seviyelerinde ayrıntılı belgeleme, global ve katlar özelinde deprem kaynaklı hasarın işlenmesi ve son olarak yapının fotoğraflanması üzerine bir akış oluşturulmuştur. Formun içeriği ve akışı arazi ekibi tarafından yürütülen bir dizi pilot uygulama sonucunda son halini almıştır. Nihai haline getirilen *hımış* föyü, hem iOS hem de Android ile uyumlu cep telefonu ve tablet ortamlarında çevrimiçi/çevrimdışı olarak Survey123 mobil uygulaması (Şekil 3) veya herhangi bir mobil internet tarayıcısı üzerinden kullanılmaya başlanmıştır.



Şekil 3- Hımış tipolojiler için geliştirilen deprem sonrası saha verisi toplama formları ve ArcGIS® Survey123 mobil uygulamasından ekran görüntüleri.

Her bir bölümün ilgili içeriği ve toplanan verinin türü Tablo 1'de paylaşılmaktadır. Toplanan verinin, tipolojinin özgün özelliklerinin ve *hımış* yapıların deprem performansı üzerinde belirleyici olduğu veya olabileceği gösterilen faktörlerin belirlenebilmesine olanak sağlaması amaçlanmıştır. Bu kapsamda düşünüldüğünde hatıl mevcudiyeti, yapının restorasyon durumu, kapı, pencere, niş gibi açıklıkların sayısı, boyutu ve yerden yüksekliği gibi örnekler verilebilir. Yanı sıra, yapının tasarım ya da mevcut özellikleriyle doğrudan bağdaştırılamayacak, yapının deprem öncesi döneminde çevresel etmenlere maruziyetinden kaynaklanan ve ahşap elemanlarda ortaya çıkan malzeme ve bağlantı özelliklerindeki etkileriyle deprem performansında belirleyici olabilecek başka etmenler de söz konusudur [24]. Bu hususta, "V.v." ile çoklu seçim formatında ahşap çerçevedeki iklimsel, biyolojik, fiziksel etmenlere ya da yaşlanmaya bağlı genel bozulmalar için de veri toplanmıştır.

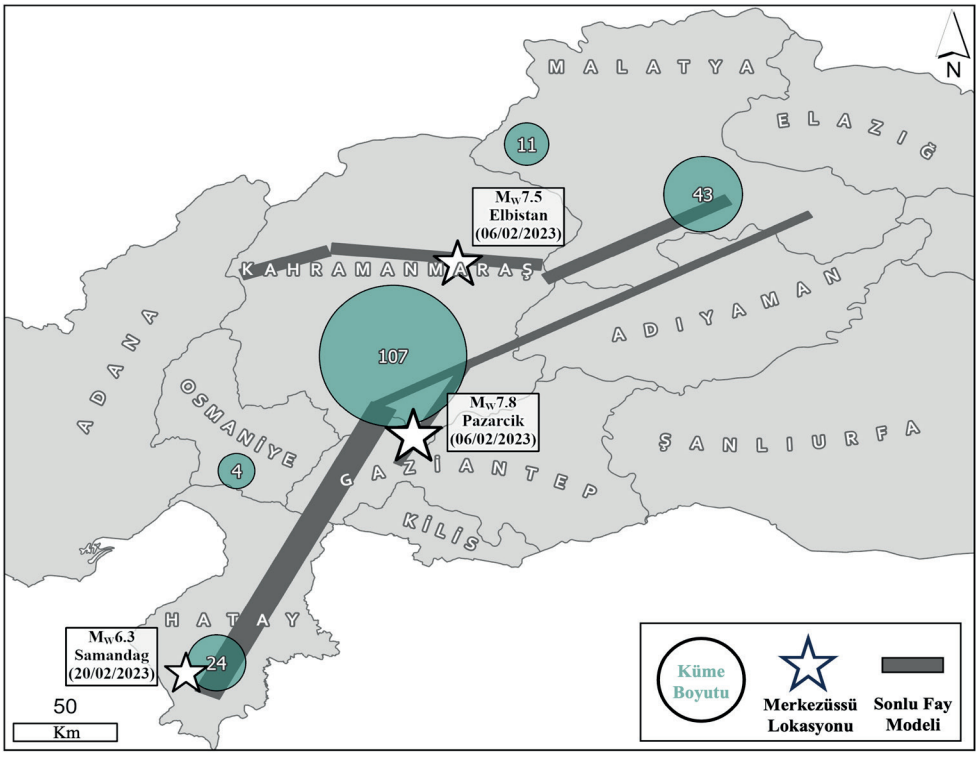
Hasar tespiti çerçevesinde, veri föyü tasarlanırken ve verinin toplanması esnasında karşılaşılan en büyük zorluk *hımış* tipolojisine uygun bir hasar sınıflandırma sistemi bulunmaması olmuştur (Tablo 1, madde "V.i"). Yığma yapılar için yaygın olarak kullanılan EMS-98 (European Macro Scale) hasar ölçeği giriş kat duvarlarının hasar değerlendirmesi için referans olarak alınsa da hibrit doğasından kaynaklı olarak *hımış* tipolojisinin bütüncül değerlendirmesi saha verisini ve yaygın hasar modlarını da dikkate alan yenilikçi bir yaklaşıma ihtiyaç duymaktadır.

Tablo 1- Geliştirilen Survey123 saha föyünün içeriği ve dökümü. Föydeki soruların tiplerini ayırt etmek için lejant şu şekildedir: ◉ çoklu seçim; ☑ tekli seçim; ▼ açılır menüden tekli seçim; | Tek satırlık metin; ↲ Çok satırlı metin; ★ Likert ölçeği; № Sayı; 📷 fotoğraf; 🎤 ses dosyası.

Bölüm(n=madde sayısı) Maddeler	**Survey123 *Hımış* Föyü** (N=62)
Giriş (n=7)	
**(i)Tarih ve saat; *(ii)Yapının coğrafi konumu; |(iii) İncelemeyi yapan kişi; |(iv)Yapı özel kimliği; ▼(v)Yapının ön cephesi hangi yöne bakmaktadır; (vi)Hangi cepheler görünür?; ↲(vii)Yapının iç bölümlerine giriş yapılabildi mi?*	
I. Yapının Genel Özellikleri (n=11)	
▼(i)Yapının nizamı; |(ii)Yapı Global Ölçüleri (cm); ▼(iii)Yapı plan geometrisi; ▼(iv)Yapı restore edilmiş mi?; ↲(v)Varsa, restorasyona dair gözlemlenebilir problemler; ★(vi) Yapının değiştirilmişlik düzeyine göre özgün niteliği (subjektif); ★(vii) Yapısal müdahale düzeyi; №(viii)Biliniyorsa, Yapı Yaşı ya da İnşa Yılı; ▼(ix)Yapı yaşı bilinmiyorsa, yapı dönemsel sınıfı (Eldem'e göre); ▼(x)Kat adeti; ↲(xi)Varsa, yapının plansal/yüksekliğe bağlı düzensizliklerini açıklayınız.	
II. Giriş Kat (n=20)	
◉(i)Yığma örgü birimi; ↲(ii)Taş boyutu (cm) ve şekli; ★(iii)Yığma duvar işçiliği (subjektif); ◉(iv)Bağlayıcı harç malzemeleri; |(v)Temsili harç kalınlığı; ◉(vi)Yığma duvar katmanları; №(vii)Biliniyorsa, Duvar Katmanları Sayısı; ◉(viii)Varsa, sıva/dış kaplama malzemeleri; ▼(ix)Duvar köşesi birleşim detayı; №(x)Duvar kalınlığı (cm); №(xi)Kat yüksekliği (cm); ▼(xii)Hatıl mevcut mu?; ↲(xiii)Hatıl süreklilik durumu; ↲(xiv)Varsa, ahşap elemanların en kesit ve yüksekliği (cm); ▼(xv) Kılıçlamasına taş mevcut mu?; №(xvi)Dört cephedeki toplam kapı açıklığı sayısı; ↲(xvii)Temsili kapı açıklığı boyutları; №(xviii)Dört cephedeki toplam pencere/niş açıklığı sayısı; ↲(xix)Temsili pencere/niş açıklığı boyutları; ↲(xx)Genel notlar.	
III. Katlar Arası Geçiş (n=2)	
◉(i)Döşeme hangi giriş kat cehpe duvarlarına oturmaktadır?; ◉(ii)Döşeme malzemeleri.	
IV. Üst Kat (n=10)	
◉(i)Yığma dolgu birimi; ↲(ii)Dolgu boyutu (cm) ve şekli; ◉(iii)Bağlayıcı harç malzemeleri; |(iv)Temsili harç kalınlığı; №(v)Duvar/panel kalınlığı (cm); ↲(vi)Tipik panel genişliği; №(vii) Kat yüksekliği (cm); ↲(viii)Çıkma ile ilgili genel notlar; ☑(ix)Çatı geometrisi; ↲(x)Genel notlar.	
V. Yapısal Hasar (n=7)	
★(i)Global hasar düzeyi; ◉(ii)Global hasar türleri; ↲(iii)Hasar açıklaması/notları; ◉(iv)Hasarları yapı kısımlarını işaretleyiniz; ◉(v)Ahşap elemanlarda gözlemlenen genel bozulmalar (deprem öncesi); ↲(vi)Ahşap elemanlarda gözlemlenen depreme bağlı hasarı açıklayınız; 🎤(vii) Genel notlar için ses kaydı.	
VI. Yapı Fotoğrafları (n=5)	
📷(i)Genel yapı görünümü; 📷(ii)Ön cephe; 📷(iii)Sol cephe; 📷(iv)Sağ Cephe; 📷(v)Arka Cephe.	

3.3. Saha Çalışması Rotası ve Örneklem

Saha çalışmalarının ilk fazı için izlenecek rotanın ve örneklemin oluşturulmasında benimsenen yaklaşımda öncelikli olarak etkilenen illerde tipolojinin yaygınlığını anlamak üzere yapılan literatür taramasından ve deprem sekansının sismolojik ve kuvvetli yer hareketi özelliklerinden faydalanılmıştır. Bu masa başı çalışması, Kahramanmaraş'ın merkezinin saha rotasının başlangıç noktası olarak belirlenmesinde faydalı olsa da bunun yanı sıra, saha çalışmasına başlandıktan sonra bölge halkı ile yapılan görüşmelerin de kimi zaman örneklemin devamlılığını sağlamada bilgilendirici ve yönlendirici nitelikte olabildiği görülmüştür. Ayrıca ek olarak, gündelik toplanan veri setinin kimi günler CBS ortamına aktarılarak jeoloji ve V_{S30} harita altlıkları üzerinden incelenmesiyle zemin profillerinin çeşitlendirilmesi de izlenen stratejinin bir parçası olmuştur.



Şekil 4. Sekansın önemli depremlerinin merkez üssü ve sonlu fay yüzey izdüşümleri [1,2] ile saha çalışmalarıyla toplanan Hımış yapı kümelerinin dört ildeki coğrafik dağılımı.

Ülkemizdeki geleneksel yapı stokunun dökümünü veren envanterlerin ve hatta, yerel yönetim birimleri bazında bile olsa, temel istatistiksel bilginin eksikliği ve/veya açık veri olarak kullanıma sunulmamış olması da göz önüne alındığında, rotanın belirlenmesi için yapılacak ön çalışmalarda birincil kaynak olarak literatürdeki *hımış* ve/veya ahşap çerçeveli yapılar üzerine çalışılan tez ve makaleler kullanılmıştır [27, 28]. Diğer yandan, depremlerin özellikleri de belirleyici nitelikte olmuştur. 7.8 ve 7.5 moment büyüklüğündeki 6 Şubat depremleri sırasında gerçekleşen yüzlerce kilometrelik fay kırılmaları, Doğu Anadolu Fayı'nın, yoğun kentsel alanların altından veya oldukça yakınından da geçen, karasal kollarında gerçekleşmiştir. USGS, *United States Geological Survey*, tarafından yayınlanan sonlu fay çözümlerine dayalı kırılmaların yüzey izdüşümleri de değerlendirildiğinde depremden etkilenen 11 il arasından Hatay, Kahramanmaraş, Adıyaman, Malatya ve Gaziantep'in etkilenmişlik bakımından öne çıktığı, hem EEFIT'in Mart ve Nisan aylarında gerçekleştirdiği saha çalışmalarıyla gözlemlenmiş, hem de Haziran 2023'e dek yayınlanan ön raporlardan anlaşılmıştı. Bunun yanı sıra, AFAD, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, bünyesindeki ivmeölçer ağındaki kayıtların analiziyle elde edilen yer hareketi parametreleri de bu durumu destekleyici nitelikteydi.

Tüm bunlar ışığında belirlenen rota ve bu rota üzerinde gerçekleştirilen saha çalışmalarıyla derlenen nihai *hımış* örneklemi kümeler halinde Şekil 4'te depremlerin temel karakteristikleriyle birlikte verilmiştir. Örneklemin büyük bir bölümü *yakın fay* alanına tekabül etmekle birlikte, Malatya, Osmaniye ve nispeten Kahramanmaraş'da çeşitlilik sağlamak için bu durumdan kaçınılmaya gayret edilmiştir. Saha ekibi Gaziantep şehir merkezine ve İskenderun'a da gitmiş, ancak buralarda örneklenebilecek *hımış* yapı bulmayı başaramamıştır.

Bu *çalışmada* 189 *h*ımış yapı değerlendirilmiştir. Örneklem, sırasıyla, Kahramanmaraş'dan 107, Malatya'dan 54, Hatay'dan 24 ve Osmaniye'den 4 adet yapıdan meydana gelmektedir. Bu dört ilden derlenen örneklerin belli başlı özelliklerinin genel bir dökümü Tablo 2'de verilmektedir. Toplanan veri ikincil bir değerlendirmeye tabi tutulacağından buradaki veriler ilksel kabul edilmelidir.

Tüm örneklemde, *Hımış* yapıların global ölçülerinde temsili ortalama değerler kısa kenar için 6.9 metre, uzun kenar için 10.2 metre, ve yükseklik için 6.7 metre olarak saptanmıştır. Genellikle yöredeki erişilebilir doğal kaynaklara göre şekillenen malzeme seçimi, yakın bölgelerde bile farklı kullanımlar doğurabilmektedir. Yığma giriş kat kesme, yontulu ve/veya moloz taş

ile oluşturulmuştur. Ancak, baskın olarak Malatya ve nadiren Kahramanmaraş'da incelenen yapılarda kerpiç yığma giriş katlara da rastlanmıştır. Giriş kat ortalama duvar kalınlığı 0.6 metre, duvar yüksekliği ise 3.26 metredir. Duvarların köşe birleşimi kimi zaman tekdüze kimi zaman taşların kilitlenmesiyle teşkil edilmiştir. İç morfolojisi gözlemlenen duvarlarda, duvarların çoğu zaman üç katmandan teşkil edildiği ve bunun taş kaplama arası moloz ya da tamamen moloz/kerpiç olarak karşımıza çıktığı söylenebilir. Gözlemler dahilinde, yapıların yaklaşık dörtte birinde hatıl kullanımına rastlanmıştır, ancak bunlar her zaman süreklilik göstermemektedirler. Bağlayıcı harç olarak tercih edilen malzemelerde ise toprak (%57) ve kireç (%29) öne çıkmakla birlikte, bazen de çimento (özellikle restorasyondan geçmiş yapılarda) gözlemlenmiştir. Özellikle toprak ve kireç bazlı harçlarda saman katkısına sıklıkla rastlanmaktadır. Üst katlarda ahsap çerçeveler çoklukla kerpiç dolgulu (%29) veya *bağdadi* çatkılıdır (%55). Her iki uygulama (dolgu ve çatkı) aynı yapı içinde birlikte karşımıza çıkabilmektedir. Ahşap çerçeveli üst katlarda ortalama panel kalınlığı 0.15 metre, kat yüksekliği ise 3.2 metredir.

Tablo 2. Tüm örneklemde ve/veya Antakya özelinde bazı tanımlayıcı istatistikler. (I) Yapısal hasarın dağılımı ve Antakya'dan temsili fotoğraflar (HD0, hasarsız; HD1, hafif hasar; HD2, orta hasar; HD3 ağır hasar; HD4, çok ağır hasar/kısmi yıkım; HD5, büyük ölçüde veya tamamen göçme), ve (II) Tipolojinin malzeme, geometri ve özgünlük özelliklerinin dökümü (Kısaltmalar, E: Evet, H: Hayır, X: Gözlemlenemeyen, bilinmeyen veya değerlendirme dışı kalan veri örnekleri).

***Hımış* Veri Seti için Tanımlayıcı İstatistikler**						
(I) Global Yapısal Hasar (%)						
Hasar Düzeyi	*HD0*	*HD1*	*HD2*	*HD3*	*HD4*	*HD5*
Örneklem (N=189)	*%5*	*%39*	*%15*	*%10*	*%23*	*%8*
Antakya (n=24)	-	%21	%16	%25	%25	%13
						
(II) Tipolojik Özellikler						
Giriş Kat Yığma Örgü Birimi (%)	*Kesme Taş*	*Yarı Yontulu/ Moloz Taş*	*Kerpiç*	*İnşaat Tuğlası / Briket*	*Pişmiş Tuğla*	*Bağdadi / Şamdolma*

Örneklem	*%59.7*	*%53.9*	*%36.5*	*%5.2*	*%1.0*	*-*
Antakya	*%70.8*	*%79.2*	*-*	*-*	*%4.2*	*-*
Hımış Çerçeve Dolgusu ve Çatkısı (%)	*Bağdadi / Şamdolma*	*Kerpiç*	*Yarı Yontulu/ Moloz Taş*	*Pişmiş Tuğla*	*Kesme Taş*	*İnşaat Tuğlası / Briket*
Örneklem	*%55*	*%29.1*	*%6.3*	*%5.8*	*%2.1*	*%2.1*
Antakya	*%62.5*	*-*	*%8.3*	*%29.1*	*-*	*%4.1*

Bağlayıcı Harç Malzemesi (%)	*Kil/ Toprak*	*Kireç*	*Çimento*	*Saman*	*Agrega*	*Hayvan Kılı*	*X*
Örneklem	*%57.1*	*%29.1*	*%32.3*	*%7.4*	*%1.6*	*-*	*%10.1*
Antakya	*%45.8*	*%50.0*	*%54.1*	*%4.1*	*%4.1*	*-*	*%8.3*

Global Geometri (metre)	*Kısa Kenar*	*Uzun Kenar*	*Global Yükseklik*	*Yığma Giriş Kat Yüksekliği*	*Yığma Duvar kalınlığı*	*Üst Kat Yüksekliği*	*Üst Kat Panel Kalınlığı*
Ortalama, μ	*6.87*	*10.23*	*6.67*	*3.26*	*0.60*	*3.21*	*0.15*
Std. Sapma, σ	*2.30*	*4.11*	*1.61*	*0.80*	*0.15*	*0.46*	*0.02*

Hatıl mevcut mu? (%)				***Yapı restore edilmiş mi? (%)***			***Yapının gözlenen değiştirilmişlik durumuna göre özgünlük düzeyi (%)*** *(1: Orijinal, 5: Ciddi Yapısal Müdahale)*					
	E	*H*	*X*	*E*	*H*	*X*	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*X*
Örneklem	*%23*	*%51*	*%26*	*%23*	*%51*	*%26*	*%8.9*	*%30.1*	*%17.4*	*%8.4*	*%3.1*	*%31.7*
Antakya	*%4*	*%54*	*%42*	*%54*	*%25*	*%21*	*%8.3*	*%16.6*	*%20.8*	*%20.8*	*%4.1*	*%29.1*

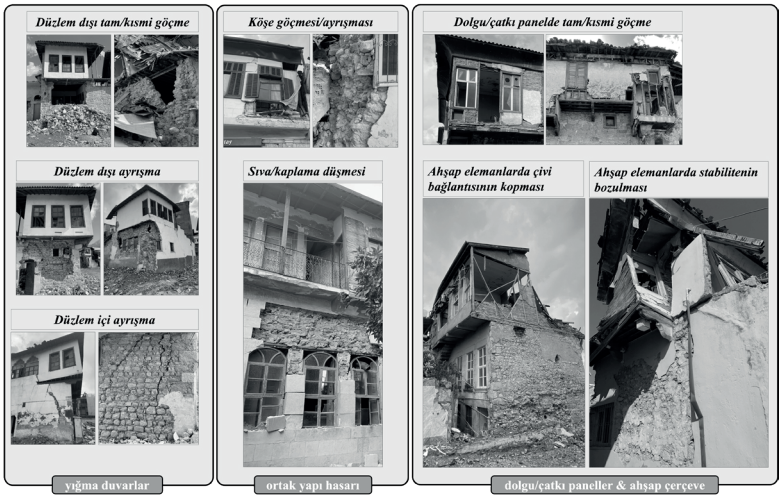
Tüm örneklemin genel niteliklerine ek olarak, Hatay'ın tarihi Antakya bölgesindeki *hımış* yapılar ekseriyetle taş yığma zemin kat ve üst katta ağırlıklı olarak *bağdadi* çatkılı ahşap çerçeveler ile karşımıza çıkar. Pişmiş tuğla ve taş ile dolgu yapılan örnekler de mevcuttur. Kil/toprak, kireç ve çimento baskın bağlayıcı malzeme türleri olarak görülmüştür. İncelenen örneklerin yarısında çimentoya rastlanması, ki genel örneklemdeki eğilimin iki katına tekabül eder, restorasyona bağlanabilir. Yine, genel örneklemdeki eğilimle karşılaştırıldığında Antakya'daki yapıların özgünlüklerinde, elimizdeki örneklem özelinde, bir düşüş gözlemlenmiştir. Bölgede karşılaşılan en yaygın yapısal müdahale betonarme döşemelerin eklenmesi olmuştur.

4. İlksel Sonuçlar & Tartışma

Bu bölümde, bölgedeki *hımış* yapılarda gözlemlenen hasar mekanizmaları toplanan veri seti üzerinden betimlenmektedir. Ayrıca, izlenen veri toplama yönteminin karşılaştırmalı olarak değerlendirmesi yapılmaktadır.

Önceki bölümde bahsedildiği üzere, yığma duvarların değerlendirilmesinde EMS-98 ölçeği referans alınabilecekken, *hımışın* hibrit doğasını temsil edebilecek bir ölçek mevcut değildir. Dolayısıyla bu çalışmada öncelikli olarak Haiti'nin yerel mimarisinin bir parçası olan tek katlı, arası yığma dolgulu ahşap çerçeveli veya destekli sistemler için StEER tarafından geliştirilmiş bir yaklaşım göz önünde bulundurulmuştur. Bu yaklaşımda, ahşap/kagir sistemin deprem sonrası bütünlüğü ve görünen düşey yük taşıma kapasitesi dikkate alınmaktadır [25]. Burada, hem hasarın boyutu hem de farklı panellerdeki yaygınlığı birer kriter olarak öne çıkar. Bu makalede raporladığımız ve Haiti örneğini adapte ederek vardığımız ilksel sonuçlara göre *hımış* için, ahşap çerçevenin taşıma kapasitesini, yani işlevselliğini yitirmesi ve/veya yığma giriş katın birden fazla duvarında ciddi düzlem dışı hasar davranışıyla tezahür eden ve sırasıyla ağır hasar ve yıkım olarak tanımlanabilecek HD4 ve HD5 hasar seviyeleri örneklemin yaklaşık üçte birini oluşturmaktadır (Tablo 2; Şekil 6). Bu bağlamda, orta hasar, HD3, ve altındaki hasar düzeyleri detaylı tetkikler sonrasında onarılabilir hasarlar olarak değerlendirilebilir ve bu bağlamda tipolojinin faydalı bir özelliği olarak ön plana çıkar.

Antakya özelinde ise hasar seviyesinin arttığını görmekteyiz. İncelenen yapıların yarısından çoğu restore edilmiş olsa da hasar düzeylerine bakıldığında (HD4 ve HD5; tüm örneklemde %31, Antakya'da %38) bu durumun deprem performansına pozitif katkısının olmadığı çıkarımı yapılabilmektedir. Bu noktada hasar düzeylerini etkileme potansiyeli bulunun etkenlerden biri bölgedeki özgün yapılarda da, yenilenen tasarımlarında da yaygın şekilde karşılaşılmayan *hatıl*dır (hatıl mevcudiyeti; tüm örneklemde %23, Antakya'da %4), Buna ek olarak, diğer illere kıyasla şiddetli yer hareketi ve zayıf yerel zemin koşulları da burada gözlemlenen daha yüksek seviye hasarda etkili olmuş olmalıdır.

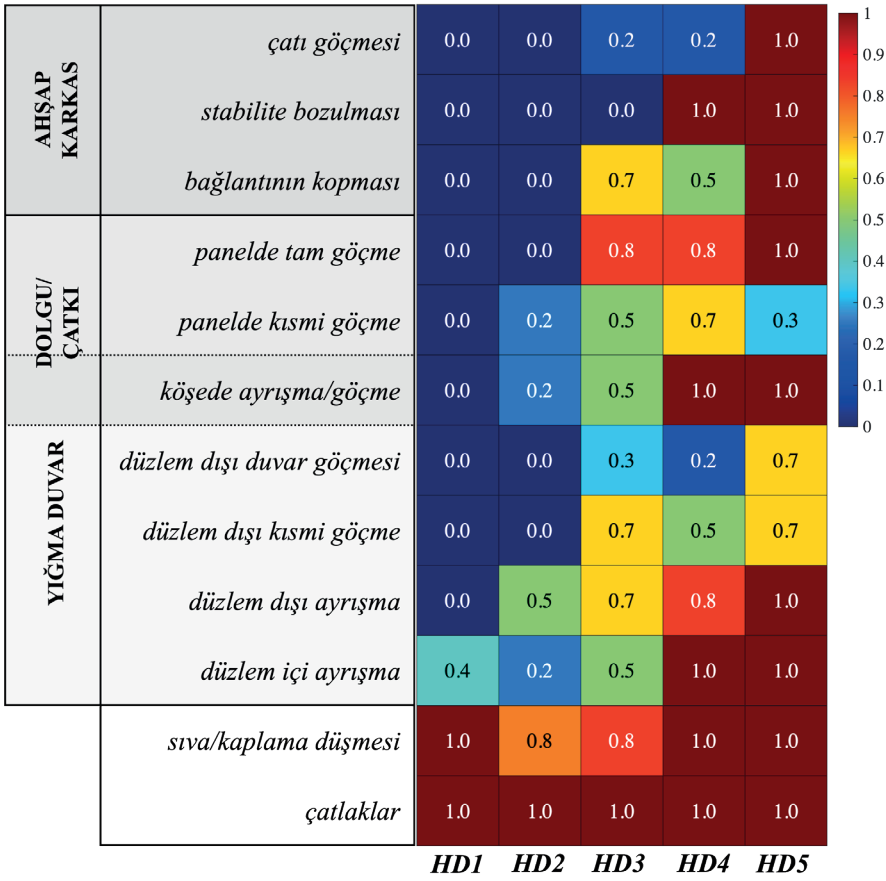


Şekil 5. İlişkilendikleri kat(lar) ile Antakya'da gözlemlenen tipik hasarlar.

Antakya'daki *hımış* yapılarda gözlemlenen hasar mekanizmaları yapılara atfedilen hasar seviyelerine bağlı olarak Şekil 6'da verilmiştir. Hasar düzeylerine ve mekanizmalarına ait örnek görseller ise sırasıyla Tablo 2 ve Şekil 5'te verilmektedir. *Hımış* için tipik hasarlar Şekil 5 ve 6'daki gibi üç gruba ayrılabilir: (1) Yığma zemin katta karşılaşılan duvar katmanlarında düzlem içi/dışı hasar türleri – bunlar duvar işçiliği kalitesi ve de hatıl varlığı ve sürekliliğinden etkilenmektedir; (2) Üst kat(lar)da dolgu/çatkı panellerde kısmi/tam panel göçmesi/hasarı olarak veya ahşap karkas elemanlarda çivi bağlantılarının zayıflaması ve daha ileri mertebelerinde çerçevenin bütünlüğünün bozulması ve/veya buna bağlı kısmi/tam çatı göçmesi ile karşımıza çıkan "dolgu/çatkı panel" ve "ahşap karkas" öğelerindeki hasarlar ; (3) Sıvalı duvarlarda çatlaklar, sıva/kaplama düşmesi, köşedeki yığma/panel/ahşap ögenin göçmesi gibi öğe/kat ayrımı olmaksızın ortaya çıkan hasarlar.

Hasar mekanizmaları yaklaşık olarak şiddetleri bakımından hafiften ağıra sıralandıklarında, görülme sıklıklarıyla da ilişkili aralarındaki hiyerarşik durum da az ya da çok yansıtılmış olunur. HD1'de karşımıza çıkan en ağır hasar türü düzlem içi ayrışan yığma duvarlarken, dolgu/çatkı hasarından başlayarak çatı göçmesine kadar uzanan ahşap elemanlarla ilgili hasar mekanizmaları en çok HD5'e özgüdür. HD2'ye gelindiğinde yığma duvar katmanlarında ayrışmalar ve üst katlardaki kısmi panel hasarları da baş göstermeye başlamaktadır. Giriş katta HD3 ve HD4 benzer şekilde düzlem dışı ayrışma ve kısmi göçme, düzlem içi ayrışma ile öne çıksalar da burada

hasarın farklı duvarlarda görülme sıklığı ve etki alanları farklıdır. Bu durum üst katlardaki panel hasarlarında da geçerlidir: burada, HD4, köşe hasarı ve karkasın stabilitesinin bozulma durumlarının daha sık ortaya çıkması ile farklılaşmaktadır.



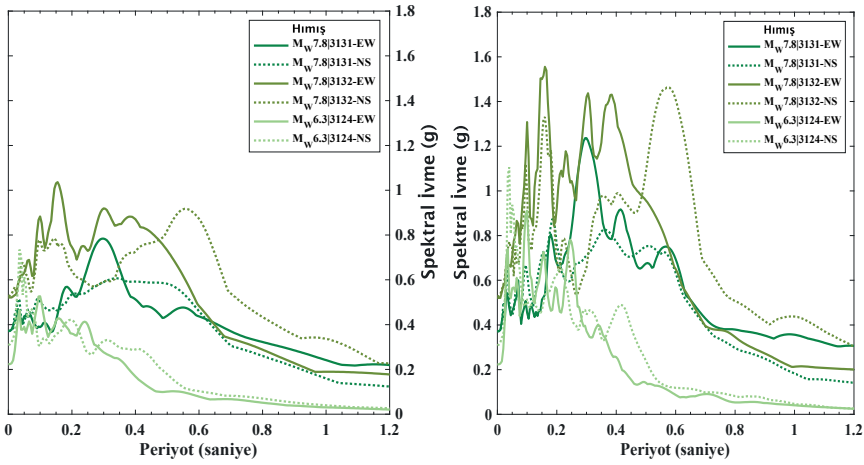
Şekil 6. Antakya'daki hımış yapılarda gözlemlenen hasar düzeyi bazında ağırlıklarıyla, yapısal öğe bazında hasar mekanizmaları (n=24).

Dağılımı ve çeşitliliği ile hiyerarşik bir kalıba giren hasar düzeyleri ve mekanizmalarının nedenselliğinin bir belirleyicisi de kuvvetli yer hareketi özellikleridir. 2023 Türkiye deprem sekansının etkileri değerlendirilirken iller arasında farklı bakış açıları getirmek gerekmektedir. Öncelikle bazı artçıların etkileri yadsınamaz düzeydedir. Merkez üssü ve kırılan fayların yüzey

izdüşümleri Şekil 4'te gösterilmektedir. Örneğin, Kahramanmaraş'taki *hımış* stokunun en fazla 6 Şubat günü gerçekleşen 7.8 ve 7.5 büyüklüğündeki depremlere maruz kaldığı söylenebilecekken, Hatay için, fay kırılmalarına ve merkez üssüne uzaklığı bakımından, aynı 7.8 büyüklüğündeki deprem ve 20 Şubat günü Antakya'ya oldukça yakın bir noktada gerçekleşen 6.3'lük deprem öne çıkmaktadır. Özellikle Antakya stoku için hem yakın fay etkisinin hem de basen etkisiyle zemin büyütmesinin genel hasar boyutunun belirleyicilerinden oldukları ön görülmektedir. Antakya örneklemindeki yapılar 7.8 büyüklüğündeki Pazarcık depreminin merkez üssüne yaklaşık olarak 140 km uzaklıktadırlar. Ancak, Şekil 4'te paylaşılan, deprem esnasında kırılan fayın yüzey izdüşümünün sınırları içerisinde kalmaktadırlar, yani, *Joyner-Boore mesafesi* cinsinden uzaklıkları sıfırdır. Bu şiddetli yakın fay etkisine ek olarak, son derece zayıf zemin koşullarının neden olduğu büyütmenin de etkisiyle, çok yüksek mertebelere erişen yatay ve düşey yer hareketleri kaydedilmiştir. Bu tabloya, 20 Şubat tarihinde, yaklaşık 13 km uzaklıkta gerçekleşen 6.3 moment büyüklüğündeki Samandağ depreminin etkisi de eklenmiştir. Bu depremlerde, *h*ımış kümesindeki yapılara en yakın AFAD [30] istasyonları Pazarcık depremi için ya 3131 (~0.8 km, kayalık zemine kurulu, en büyük yer ivmesi; yatay: 0.37 g; düşey, 0.15 g) ya da 3132 (~0.5 km, en büyük yer ivmesi; yatay: 0.52 g, düşey: 0.34 g) istasyonudur. Samandağ depremini kaydeden en yakın istasyon ise 3124'tür (~4.0 km, en büyük yer ivmesi; yatay: 0.30 g, düşey: 0.14 g).

Literatürdeki çalışmalarda çeşitli karkas sistemleri ve dolgu/çatkı uygulamaları için nümerik ve deneysel çalışmalar ile *hımış* veya *hımış* çerçeveleri için hakim titreşim periyotları ortaya konmuştur. Değerler taş dolgulu çeşitli çerçeve desenlerinden teşkil edilen yapılar için 0.30 ila 0.45 saniye aralığında [29], *bağdadi*/şamdolma çatkılı ya da pişmiş tuğla dolgulu olan yine çeşitli desenlerdeki yalnızca çerçeveler içinse 0.1 saniye ila 0.7 saniye aralığında [9] değişmektedir. İki depremi de dikkate alarak, bahsedilen AFAD kayıtçılarının yatay bileşenleri için ivme spektrumları %5 sönüm oranıyla çizdirildiğinde (Şekil 7), en yakın kayıtların yatay bileşenlerinde 1.55 g'ye erişen ve geniş bir periyot yelpazesinde (0.10-0.55 saniye) pikler yapan spektral ivme çeşitliliği sergilemekte oldukları görülmektedir. Hibrit doğasındaki yığma öğelerin sınırlı kalan elastik davranış kapasitesi ahşap karkasta daha yüksektir. *Hımış özelinde çerçeveler için literatürde yer alan* %12.8 [9] değerinde bir enerji sönümleme kapasitesi dikkate alınarak da ivme spektrumları çizdirilmiştir (Şekil 7). Artan sönüm oranının genlikler-

de yol açabileceği düşüş yaklaşık üçte bir düzeylerinde olsa bile talebinin hala oldukça yüksek olduğu söylenebilir. Böylece, bu sonuçlar yapılardaki malzemeye ve çerçeve tasarımına bağlı üstünlüklerin Antakya için bu depremlerdeki talebi karşılamada yetersiz kaldığının göstergesiyken hasar boyutunun açıklayıcılarından bir tanesi olarak öne çıkan "kuvvetli yer hareketi özellikleri" savı da yinelenmektedir.



Şekil 7. Hatay'da etki gösteren 7.8 ve 6.3 moment büyüklüklerindeki depremlerde yapı kümesine en yakın istasyonlardaki yatay bileşenlere (EW:Doğu-Batı, NS: Kuzey-Güney) ait kayıtların ivme spektrumlar: %5 sönüm oranı (sol) ve Hımış çerçeveler için hesaplanan [9] %12.8 sönüm oranı için (sağ).

Bu deprem sekansının yapılı çevrede oluşturduğu yıkıcı etkinin boyutu göz önüne alındığında, Türkiye'nin geleneksel yapı stokunun da performansını gözlemlemek, yapıları ve hasar mekanizmalarını daha iyi anlamak ve bu bilgiyi mümkün mertebe sistematik ve verimli olarak kullanılabilir nitelikte geleceğe aktarmak büyük önem taşımaktaydı. *Hımış* tipolojilerin 2023 Türkiye deprem sekansındaki performanslarının saha gözlemleri ve kuvvetli yer hareketi özellikleri yardımıyla tartışıldığı bu çalışmayı mümkün kılan temel araçlardan biri de izlenen veri toplama yaklaşımıdır. Bu nedenle, bu makalenin bir diğer hedefi de gelecekteki benzer çalışmalara yardımcı olabilmesi için bu tecrübenin aktarılması olmuştur.

Veri setinin dışa aktarılmasındaki zengin çeşitlilik, saha çalışması için donanım özgürlüğü ve otomatik raporlama gibi özellikler kullanıcılar için hem sahada hasar tespiti sürdürülürken hem de analiz aşamasında önemli

üstünlükler sunmaktadır. Geodatabase formatı, toplanan veri setinin çeşitli Coğrafi Bilgi Sistemleri yazılımları (örneğin, ArcGIS, ArcGIS Pro, QGIS) üzerinde kolayca çalıştırılması ve derli toplu bir veri yapısı biçiminde içe aktarılmasına ve analiz edilmesine olanak tanır. Ayrıca, Survey123 aracı sayesinde, toplanan verinin hızlı ve ilksel analizi otomatik olarak gerçekleştirilebilir. Saha çalışması için sunulan donanım özgürlüğü, kullanıcıların veri toplama işlemlerini hem cep telefonları hem de tabletler aracılığıyla gerçekleştirebilmelerine olanak tanır. Bu süreç, hem Android hem de iOS ortamında sunulan mobil uygulamalar ile desteklenmektedir. İnternet bağlantısı olmadan da veri toplama sürecinin sürdürülebilmesi, kullanıcılar için ek bir üstünlük sunar. Bu özellikler, veri toplama ve analiz süreçlerini daha hızlı, esnek ve verimli hale getirmektedir.

Survey123'ün bazı sakıncaları da tecrübe edilmiştir. İlk olarak, sesli not alma özelliği ile kaydedilen dosyaların sadece tarayıcı üzerinden erişilebilir olması, dışa aktarımda eksikliklerle sonuçlanmaktadır. Bu durum, kullanıcıların dosyalara erişimini kısıtlamaktadır. İkinci olarak, araç derlenen fotoğrafların yüksek çözünürlüklü ve toplu olarak dışa aktarılmasına izin vermemektedir, bunun için geodatabase formatında aktarım yapılması tek yoldur. Son olarak, veri toplama sürecinde ekip, taslak olarak kaydedilen girdilerin kaydedilmesi sırasında nadiren sorunla karşılaşmıştır. Bu, veri kaybına neden olmuş ve kayıp oranı çok düşük seviyede (%1) olsa da dikkate değer bir meseledir. Sonuç olarak, izlenen veri toplama yaklaşımı ve aracı, özellikle özgül tipolojilere odaklanacak ve tasarım aşamasında esnekliğe gereksinim duyan araştırma grupları için, oldukça verimli ve faydalı bulunmuştur.

Son olarak, gelecekte hem *hımış* yapılar hem de diğer geleneksel yapı tipleri için deprem direncini arttırmak adına odaklanılması gereken birkaç önemli nokta söz konusudur. Bunlardan ilki, bu unsurlar için ampirik fiziksel hasar görebilirlik analizlerinin literatüre kazandırılarak deprem risk projeksiyonlarının geçerliliğinin ve çözünürlüğünün yükseltilmesidir. Bu tür analizlerde meydana gelebilecek yanlılığı ve belirsizliği mümkün mertebe azaltmak da önem taşır. Tipolojiler özelinde hasar tipleri ve hiyerarşisinin iyice anlaşılmasıyla geçerliliği yüksek bir hasar ölçeğinin temin edilmesi bunun için önemlidir. *Hımış* için de gözlemsel ve analitik tabanları harmanlayan, yapıların hibrit doğasını dikkate alan böyle bir ölçek geliştirilmelidir. Potansiyel belirsizliklerden bir diğeri de yer hareketi şiddeti parametrelerinin temsiliyetidir. Alt ve üst yer hareketi ekstrem değerlerini çeşitlendirmiş gözlemler içeren bir veri seti daha geçerli hasar görebilirlik fonksiyonlarını üretilebilir

kılacaktır. Bu çalışmada bahsedilen gözlemleri yapabilmek üzere yakın fay etkilerinin görüldüğü bölgelerdeki *hımış* yapılara odaklanılmış olsa da veri setinin zenginleştirilmesi adına kırılan fay segmentlerinden koşulların izin verdiği ölçüde uzaklaşılmıştır. Diğer yandan, ülkemizdeki geleneksel yapı stoklarına ilişkin envanterlerin geliştirilmesinin ve/veya mevcut olanların erişime açılmasının da afetlere hazırlıklı olmadaki rolü büyüktür. Neticede, bütün bu hususlarda atılacak her adım hem afet riskinin azaltımı hem de kültürel mirasın korunması ajandalarına önemli bir katkı sunacaktır.

Teşekkür

Bu makalede ele alınan çalışma EPSRC'nin sponsorluğu altında yürütülen Learning from Earthquakes: Building Resilient Communities Through Earthquake Reconnaissance, Response and Recovery projesi (EP/P025641/1 ve EP/P025951/1) ile Doç. Dr. Felat Dursun ve Doç. Dr. Yasemin D. Aktaş'a verilmiş TÜBİTAK 2221 programı tarafından fonlanmıştır. Survey123 lisansi Kökcan Dönmez'in bir parçası olduğu Tomorrow's Cities (UKRI) projesinin İstanbul Kent Hub'ı (Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Deprem Mühendisliği Departmanı) tarafından sağlanmıştır. Bu imkan için proje yürütücüleri Dr. Emin Yahya Menteşe ve Prof. Dr. Eser Çaktı'ya teşekkür ederiz. Son olarak, saha çalışması boyunca karşılaştığımız dostane yaklaşımları ve nezaketleriyle bizi misafir eden tüm Hatay, Malatya, Kahramanmaraş ve Osmaniye halkına özel bir teşekkürü borç biliriz.

Kaynaklar

[1] USGS, United States Geological Survey, M 7.8 - Pazarcik earthquake, Kahramanmaras earthquake sequence", son erişim: Mart 2023, 2023.

[2] USGS, United States Geological Survey, M 7.5 – Elbistan earthquake, Kahramanmaras earthquake sequence, son erişim: Mart 2023, 2023.

[3] Aktas, Y.D., Dönmez, K., So, E., Johnson, C., Özden, A.T., Parammal Vatteri, A., & Novelli, V., 2023 Türkiye Deprem Sekansı Deprem Mühendisliği Saha Çalışmaları Ekibi (EEFIT) Raporu Türkçe Genişletilmiş Özet, 2024.

[4] Aktaş, Y. D., So, E., Johnson, C., Dönmez, K., Özden, A. T., Parammal Vatteri, A., & Rossetto, T., The Türkiye Earthquake Sequence of February 2023: A Longitudinal Study Report by EEFIT. Earthquake Engineering Field Investigation Team (EEFIT), Institution of Structural Engineers (IStructE), 2024.

[5] Aktaş, Y.D., So, E., Parammal Vatteri, A., Johnson, C., Cabuk, E., Malcioglu, F.S., & Efeoglu, T, Hybrid EEFIT Mission to February 2023Kahramanmaraş Earthquake Sequence, Society for Earthquake and Civil Engineering Dynamics, SECED 2023, 14-15 Eylül, Cambridge, Birleşik Krallık, 2023.

[6] Bozyigit, B., Ozdemir, A., Donmez, K., Dalgic, K. D., Durgut, E., Yesilyurt, C., & Acikgoz, S., Damage to Monumental Masonry Buildings in Hatay and Osmaniye following the 2023 Turkey Earthquake Sequence: the Role of Wall Geometry, Construction Quality, and Material Properties. Earthquake Spectra, 2024.

[7] Güçhan, N. Ş., Observations on earthquake resistance of traditional timber-framed houses in turkey. Building and Environment, 42(2), 840-851, 2007.

[8] Aktas, Y.D, Seismic Assessment of Traditional Hımış Timber Frame Houses, Doktora tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, 2011.

[9] Aktaş, Y.D., Akyüz, U., Türer, A., Erdil, B., Şahin Güçhan, N., Seismic Resistance Evaluation of Traditional Ottoman Timber-Frame Hımış Houses: Frame Loadings and Material Tests, Earthquake Spectra 30 (4), 1711-1732, 2014.

[10] Aktaş, Y.D., Türer, A., Seismic Performance Evaluation of Traditional Timber Hımış Frames: Capacity Spectrum Method Based Assessment, Bulletin of Earthquake Engineering 14 (11), 3175-3194, 2016.

[11] Aktaş, Y. D., Seismic Resistance of Traditional Timber-frame Hımış Structures in Turkey: A Brief Overview, International Wood Products Journal, 8, 21-28, 2017.

[12] Uzsoy SZ. Çelebi M. 28 Mart 1970 Gediz (Kütahya) depremi ve yapılarda meydana getirdiği hasarlar. ODTÜ, p. 57, 58, 62, 65–8, 1970.

[13] Gülhan, D., Güney, I.Ö., The behaviour of traditional building systems against earthquake and its comparison to reinforced concrete frame systems; experiences of Marmara Earthquake damage assessment studies in Kocaeli and Sakarya. In: Proceedings for earthquake-safe: lessons to be learned from traditional construction Istanbul, Turkey; 2000.

[14] Doğangün, A., Tuluk, Ö., Livaoğlu, R., & Acar, R., Traditional wooden buildings and their damages during earthquakes in turkey. Engineering Failure Analysis, 13(6), 981-996, 2006.

[15] Langenbach, R., Understanding what works: Learning from earthquake resistant traditional construction. Heritage at Risk, 87-98, 2008.

[16] Spence, R. & Coburn, A., Strengthening Buildings of Stone Masonry to Resist Earthquakes, Meccanica 27: 213-221, 1992.

[17] Vintzileou, E., Effect of Timber Ties on the Behavior of Historic Masonry, Journal of Structural Engineering, 134(6), 2008.

[18] Diri, F., Construction Techniques of Traditional Birgi Houses, Yüksek Lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 2010.

[19] Diri Akyıldız, F., Şahin Güçhan, N., & Aktaş, Y. D., Construction processes and techniques in traditional Birgi houses: a typical Ottoman settlement. Journal of Architectural Conservation, 30(1), 77–102, 2024.

[20] Tobriner, S, Wooden Architecture and Earthquakes in Turkey: A Reconnaissance Report and Commentary on the Performance of Wooden Structures in the Turkish Earthquakes of 17 August and 12 November 1999. Earthquake-Safe: Lessons to be Learned from Traditional Buildings. Istanbul: ICOMOS, 2000.

[21] Aktaş, Y. D., Ioannou, I., Malcıoğlu, F. S., Kontoe, M., Vatteri, A. P., Baiguera, M., & D'Ayala, D, Hybrid Reconnaissance Mission to the 30 October 2020 Aegean Sea Earthquake and Tsunami (İzmir, Turkey & Samos, Greece): Description of Data Collection Methods and Damage. Frontiers in Built Environment, 8, 2022.

[22] Aktaş, Y. D., Ioannou, I., Malcıoğlu, F. S., Vatteri, A. P., Kontoe, M., Dönmez, K., & Diri□Akyildiz, F., Traditional Structures in Turkey and Greece in 30 October 2020 Aegean Sea Earthquake: Field Observations and Empirical Fragility Assessment. Frontiers in Built Environment, 8, 2022.

[23] Whitworth, M. R. Z., Giardina, G., Penney, C., Sarno, L. D., Adams, K., Kijewski-Correa, T., & Macabuag, J, Lessons for Remote Post-earthquake Reconnaissance from the 14 August 2021 Haiti Earthquake, Frontiers in Built Environment, 8, 2022.

[24] Dönmez, K. & Aktaş, Y. D., Impact of Moisture Decay on Seismic Vulnerability: Haiti's Wood-Framed Vernacular Buildings, 2nd International Conference on Moisture in Buildings 2023 (ICMB23), 3-4 July, Londra, Birleşik Krallık, 2023.

[25] Kijewski-Correa, T., Canales, E., Hamburger, R., Lochhead, M., Mbabazi, A., & Presuma, L., A Hybrid Model for Post-earthquake Performance Assessments in Challenging Contexts, Bulletin of Earthquake Engineering, 2024.

[26] Ersoz, A. B., Pekcan, O., Altun, M., Teke, T., & Aydogmus, O., Utilizing Digital Technologies for Rapid Damage Assessment and Reconnaissance: the February 6, 2023 Kahramanmaraş-Türkiye Earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6). Bulletin of Earthquake Engineering, 2024.

[27] Paköz, A. E., Geleneksel Maraş evlerinin mimari özellikleri. Artium, 1(1), 65-81, 2013.

[28] Özger, Y., Geleneksel Maraş Evlerinde Yeniden İşlevlendirme: Kocabaş Konağı Örneği, Yüksek Lisans tezi, Hasan Kalyoncu Üniversitesi, 2021.

[29] Usta, P. & Bozdağ, Ö., Seismic fragility analysis of traditional himis structures in Turkey. Structures, 43, 28-39, 2022.

[30] TADAS-AFAD (2023). Türkiye Cumhuriyeti İç İşleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. tadas.afad.gov.tr.

RAPID POST-EARTHQUAKE ESTIMATION OF VIBRATION FREQUENCIES OF HISTORICAL MASONRY STRUCTURES USING LASER DOPPLER VIBROMETRY

Baran BOZYIGIT[1], Sinan AÇIKGÖZ[2]

[1]Assoc. Prof., Dokuz Eylul University, baran.bozyigit@deu.edu.tr
[2]Assoc. Prof., University of Oxford, sinan.acikgoz@eng.ox.ac.uk

Abstract

It is challenging to conduct operational modal analysis of structures using contact sensors (e.g. accelerometers) in post-earthquake reconnaissance studies due to safety concerns. This paper presents the use of Laser Doppler Vibrometry as a safe and practical non-contact alternative to detect vibration frequencies of historical masonry structures. A single point Laser Doppler Vibrometer (LDV) was used to collect ambient vibration data from historical masonry structures after the 2023 Kahramanmaras earthquakes. The velocity measurements for a single-span arch bridge and a historic church are analysed in the frequency domain to identify the vibration modes of the examined structures. The vibration frequencies are used to evaluate, and where necessary update, the 3D finite element models created from point cloud data and non-destructive material tests. The results highlight the potential of LDV to provide practically useful data for conducting forensic post-earthquake investigations.

Keywords: Historic masonry, laser Doppler Vibrometry, Model calibration, Natural frequency.

1. Introduction

Historical masonry structures such as churches, mosques, towers, and bridges constitute an important part of our built environment and cultural heritage. Their free vibration properties play an important role in the response of these structures to seismic excitations. Since material properties of historical masonry structures are generally unknown, natural frequencies and mode shapes are useful for linear elastic model calibration, which is an important pre-cursor for non-linear analyses. The most common approach to obtain dynamic properties of historic masonry structures is operational modal analysis (OMA); this approach relies on data from multiple accelerometers [1-4]. While this approach is well known and reliable, the placement of accelerometers and processing acceleration data from different locations require access to the structure and are time consuming. Non-contact vibration sensing presents a desirable alternative approach to collect ambient vibration data from multiple structures in limited time without direct access to the structure. In previous studies, LDV was used to obtain velocity measurements from various structural typologies including RC beam bridges [5], steel railway bridges [6] and steel wind turbine towers [7]. Limited studies have been performed thus far to detect free vibration properties of masonry structures using LDV [8-10].

A single point LDV was used to collect ambient vibration data from several historical masonry structures during field reconnaissance studies after the 2023 Turkey earthquakes. Measurements from a single-span arch bridge and a church building will be examined in this paper. The paper aims to show the potential of LDV to detect vibration frequencies of historical masonry buildings in a rapid manner in a post-earthquake context. First, the measurement principles and the technical characteristics of the measurement device are presented. Then, case study structures are introduced, and finite element models are developed. The measured and simulated vibration frequencies are compared and conclusions are drawn.

2. Laser Doppler Vibrometry

LDV is a non-contact and mobile vibration measurement tool based on the Doppler shift principle of the laser beam. Doppler shift refers to the frequency shift of the beam reflected from the vibrating object to the source. An object moving away from the sensor head reflects the laser beam with a higher wavelength (lower frequency). Similarly, an object approaching the sensor

head reflects the laser beam with a lower wavelength (higher frequency). The measured frequency shift of the wave is calculated with the formula $f_d = 2v/\lambda$, where f_d is the shear frequency, v is the speed of the object, and λ is the wavelength of the reflected laser beam. In the Doppler frequency shift calculation, an optical interferometer is used to compare the frequency and phase angle of the reflected laser beam with the frequency and phase angle of the output laser beam (reference beam). The speed and displacement of the vibrating object can be calculated by processing the data with the help of a beam splitter and Bragg cell [5].

The LDV device used in this work (Polytec PDV 100) is compact in size (30x64x12.9 cm) and lightweight (2.6 kg), making it suitable for field measurements. PDV can measure a wide range of frequencies in the range 0.05 Hz to 22 kHz. It has three measurement ranges, which cover a velocity range of 0.05 μm/s to 0.5 m/s.

A photo of the PDV mounted on a tripod during field measurements is presented in Figure 1a. Figure 1b and c shows the schematic view of the device.

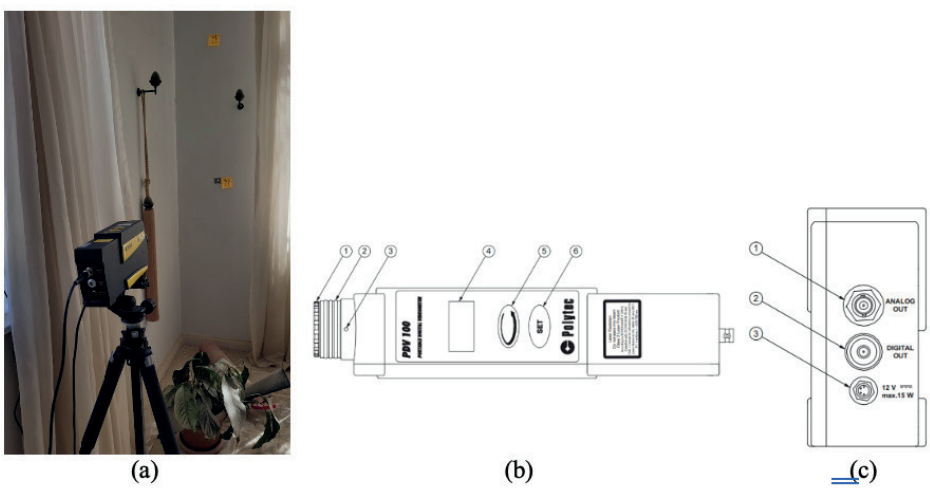


Figure 1: a) General view of PDV mounted on tripod b) view from above of the PDV c) view from rear of the PDV (Polytec, n.d.)

From the experiments performed in the laboratory, it was observed that using reflective tape on the measurement locations improves signal-to-noise ratios. However, it is still possible to detect natural frequencies from the velocity time-histories obtained without using reflective tapes. Reflective tapes

were used whenever possible on site. As the PDV is a single point laser Doppler vibrometer, the ambient vibration tests can be performed for only one point. Therefore, the location of measurements should be selected carefully with engineering judgement to ensure that various vibration frequencies (for instance torsional frequencies) can be captured.

3. Field Work

A post-earthquake field study was performed in Hatay and Osmaniye to examine the historical masonry structures affected by the 2023 Kahramanmaraş earthquakes. In total, 29 historical masonry buildings including mosques, churches, public and residential buildings were investigated. Alongside LDV, non-destructive material characterisation tests and 3D laser scanning and photography measurements were conducted. Non-destructive material tests included Schmidt Rebound Hammer (SRH), ultrasonic pulse velocity (UPV), mortar penetrometer (MP) tests. The details of non-destructive tests are presented in [11].

3.1. Arch bridge

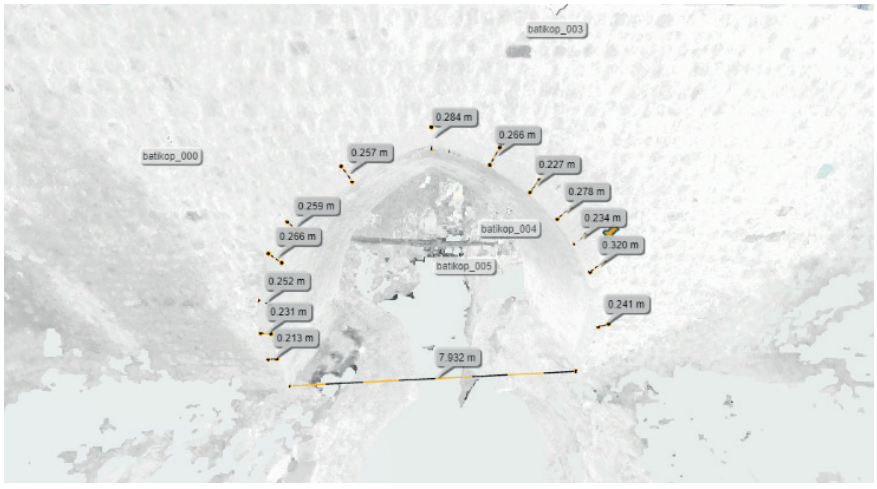
PDV was used on site to collect vibration data from an existing single-span masonry arch bridge (see Figure 2a) located in Hatay (Batıayaz). 3D laser scans were also performed to collect geometric data (see Figure 2b). Due to site topography, it was not possible to place the PDV under the bridge or to use reflective tapes. The PDV was placed at the closest possible suitable location near the bridge which was 4 m away.

Figure 3a shows a view of the bridge from where the PDV was positioned. Out-of-plane vibration data was collected from two different points, O1 and O2 (see Figure 3a). By processing the velocity time-histories, the natural frequencies can be identified and compared to the finite element simulation results for model calibration purposes. The 3D finite element model, shown in Figure 3b, uses eight-noded solid elements in SAP2000. The bridge's width in the Y direction is 3.65 m, and the fill extends to the ends of the arch in the X direction, assuming fixed supports in that direction. The arch is considered fully fixed, supported by rocky foundations on either side. The density of the arch and fill material is assumed to be 2000 kg/m^3, with an elastic modulus of 3500 MPa for the masonry. This elastic modulus value is

derived from non-destructive tests performed on site using ultrasonic pulse velocity (UPV) and Schmidt hammer (SRH) tests [11].

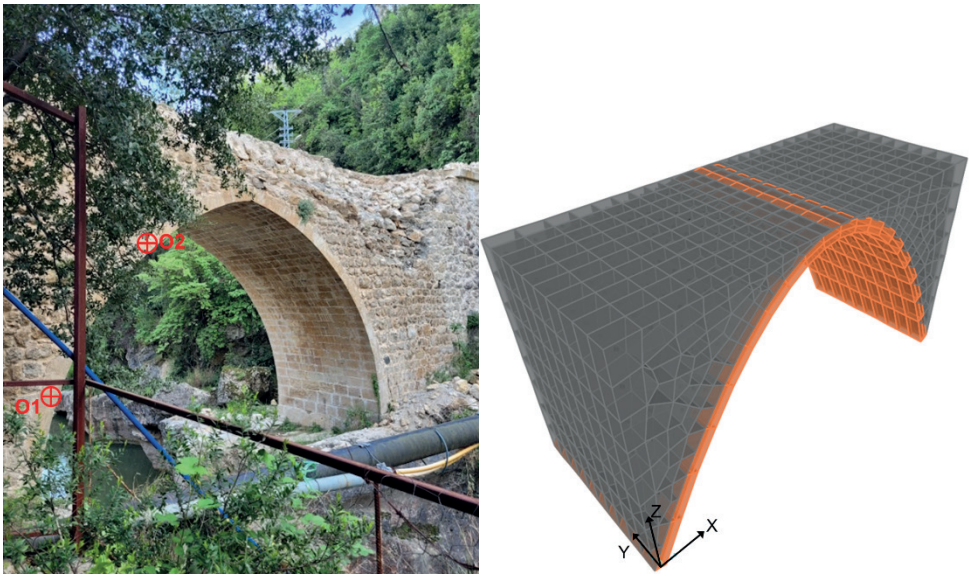


(a)



(b)

Figure 2: a) General view and b) a laser scanning measurement of Batıayaz bridge



(a) (b)

Figure 3: a) Measurement points and b) 3D finite element model of Batıayaz bridge

The velocity time-histories from LDV measurements are shown in Figures 4a and 4b for locations O1 and O2, respectively. The frequency content of these signals was calculated using fast Fourier frequency transforms (FFTs) in Matlab. Figures 4c and 4d shows the single-sided periodograms obtained from the velocity time-histories for O1 and O2, respectively. According to these figures, an out-of-plane mode with an average frequency of 11.2 Hz is detected for both locations. A modal analysis was conducted in SAP2000 to verify the detected natural frequency. The first mode frequency of the bridge obtained from finite element simulations is 11.6 Hz without any material data calibration. The relative error between the LDV measurements and the 3D finite element model is less than 5%, indicating a very good agreement. This relative error can be further minimized by calibrating the material data. Figure 5a presents the mode shape of the fundamental mode of the bridge (the first mode with pure out-of-plane movement), where the contour component corresponds to displacements normal to the surface of solid elements. Figure 5b provides a top view of the mode shape for clarity. Overall, the results indicate that LDV measurements can be used as quick and effective tool for detecting the natural frequencies of historic masonry arch bridges to inform further forensic studies.

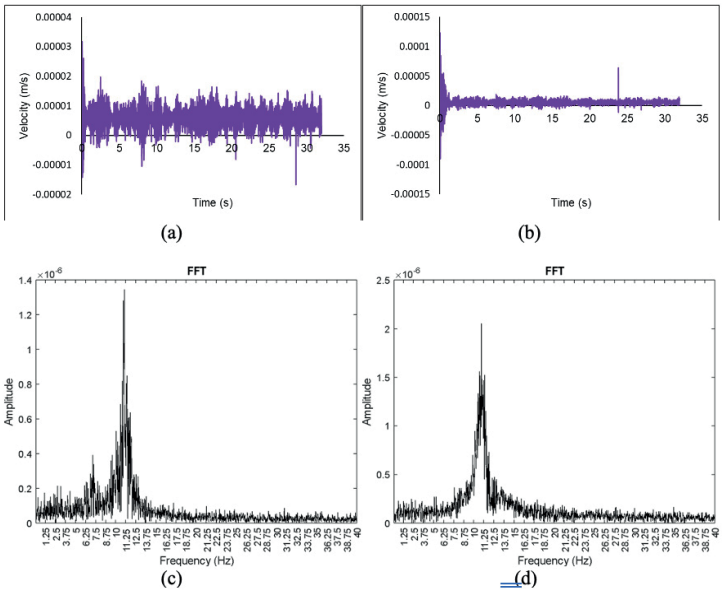


Figure 4. a) Velocity time-history obtained from O1 b) velocity time-history obtained from O2 c) FFT amplitude of velocity time-history of O1 d) FFT amplitude of velocity time-history of O2

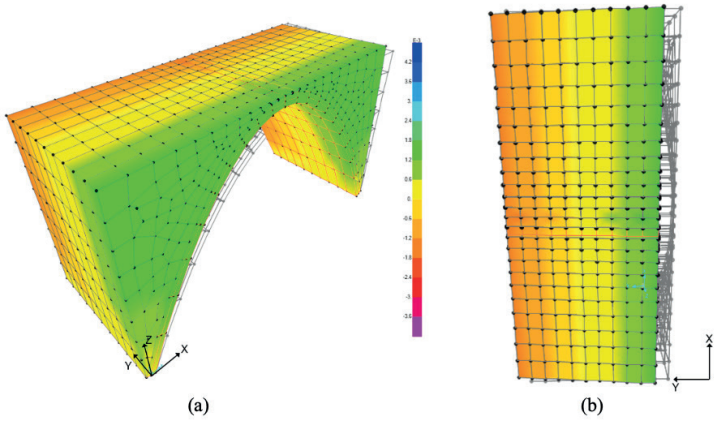


Figure 5. a) General view and b) top view of first mode shape of the bridge according to FEM simulation (natural frequency: 11.6 Hz)

3.2. Church

The PDV was employed to collect ambient vibration data from the Syriac Catholic Church in Iskenderun, which experienced a partial collapse during the 2023 Kahramanmaraş earthquake sequence. Figure 6a shows the exterior front view of the masonry church, while Figure 6b depicts the collapsed

façade, which featured a reinforced concrete frame with an infill wall, after the earthquakes. The partial collapse was due to poor connections between the collapsed façade and the rest of the building and the building was safe to enter.

A finite element model of the church was created in SAP2000 (see Figure 7a) using the geometric information from laser scanning (Figure 6c). Thick-shell elements were used to model the structure and a finer mesh was used around window and door openings. As the building only has three main walls and lacks a rigid diaphragm, simple sway modes were not expected. Consequently, vibration data were collected from various locations on the existing walls in the X and Y directions (see Figure 7a). Figure 7b shows the vibration measurement points, and Figure 7c shows the vibration measurement inside the building. All measurements were taken using reflective tapes to enhance the signal-to-noise ratio.

The initial global mechanical parameters of the masonry were derived from non-destructive material testing results [11]. Model calibration was performed by adjusting material properties and wall boundary conditions to achieve good agreement between the FEM results and the LDV measurements.



Figure 6. a) Front view of the church b) general view from inside the church and c) geometric data of a wall of Syrian Catholic Church from laser scanning

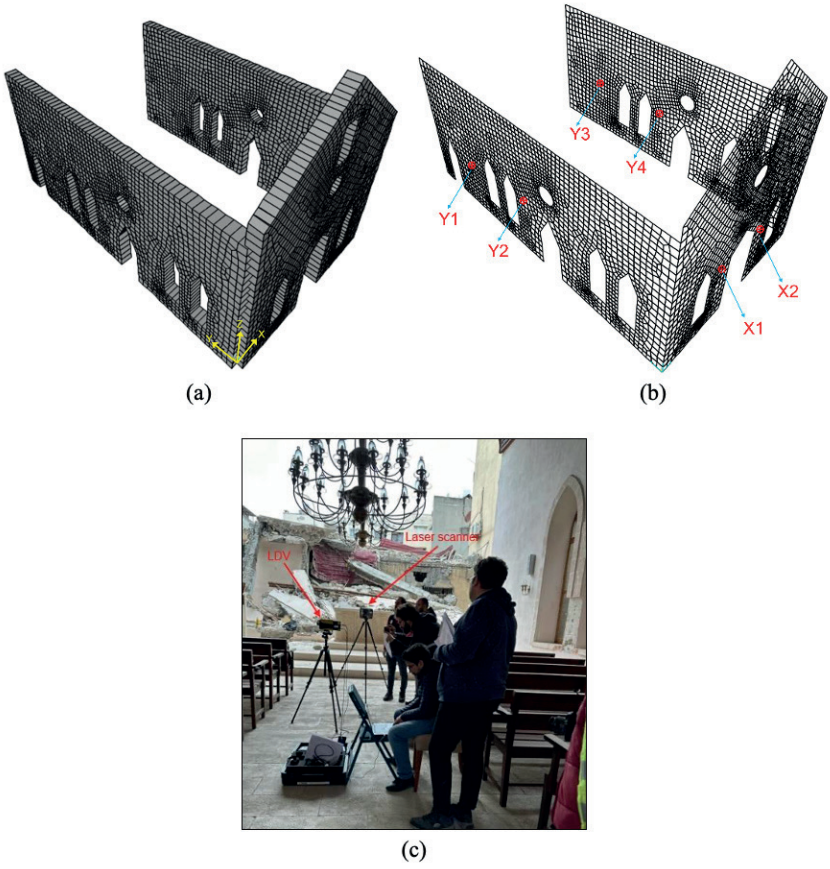
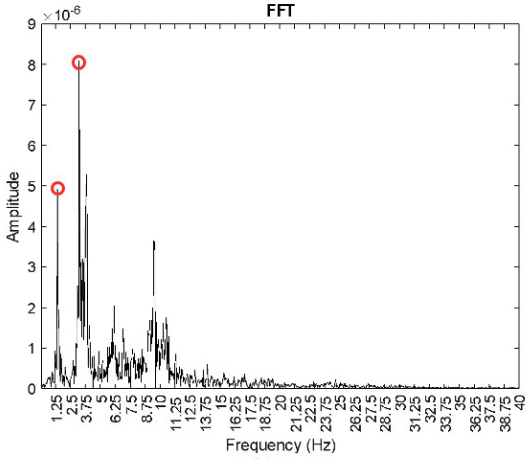
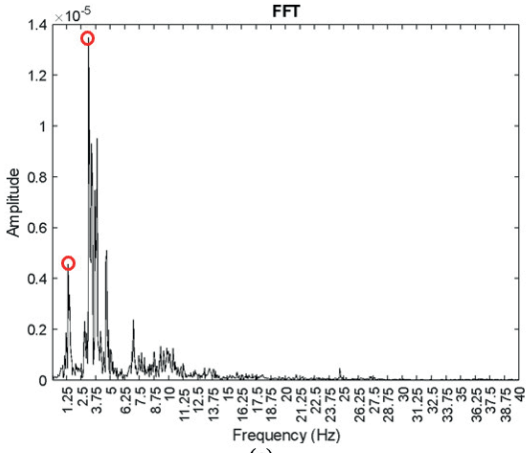


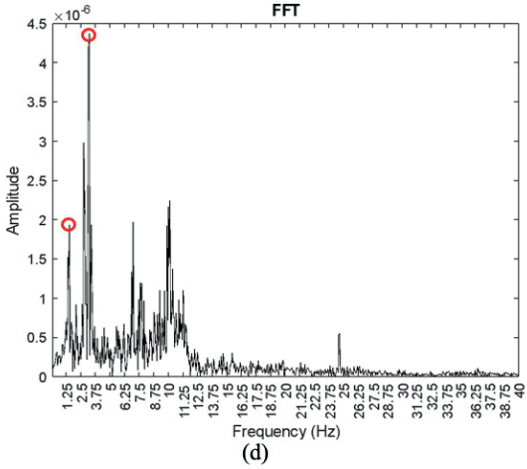
Figure 7. a) General view of finite element model created on SAP2000 b) measurement points on the walls (e.g. Y1,…, Y4, X1 and X2) and c) operation of LDV and laser scanner inside the building


FFT
×10^-6
Amplitude
Frequency (Hz)

(b)


FFT
×10^-5
Amplitude
Frequency (Hz)

(c)


FFT
×10^-6
Amplitude
Frequency (Hz)

(d)

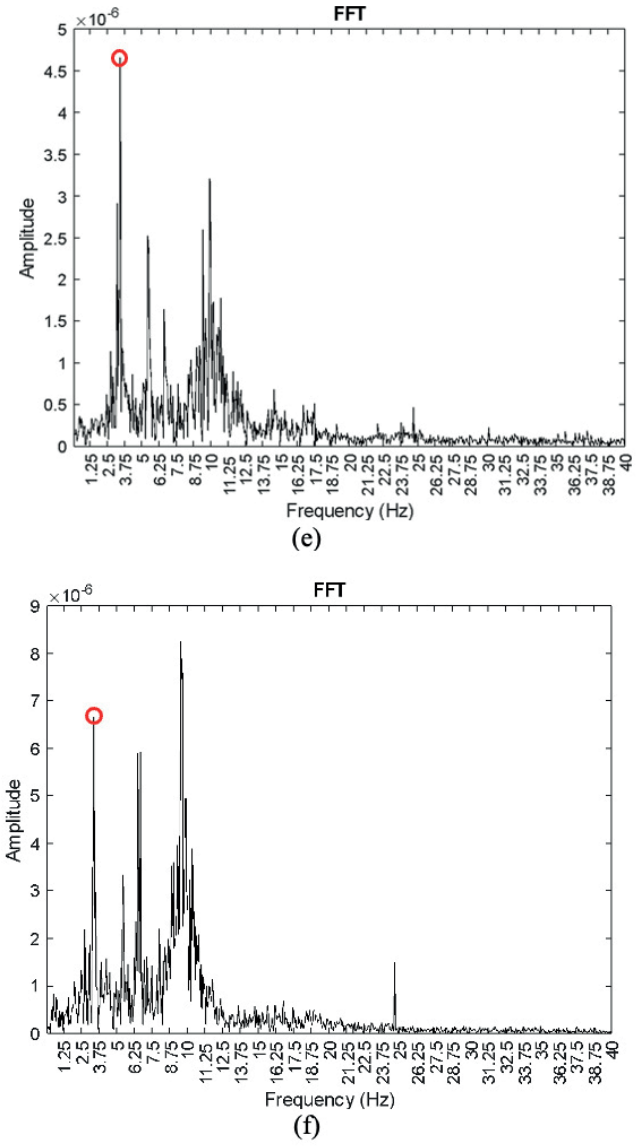
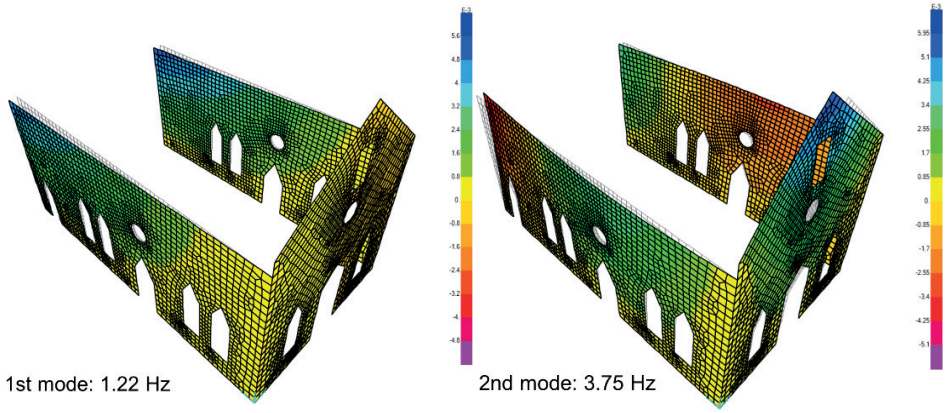


Figure 8. FFTs of velocity time-histories collected from measurement a) Y1 b) Y2 c) Y3 d) Y4 e) X1 and f) X2

Figures 8a-d present the FFTs of velocity time-histories obtained from measurements Y1, Y2, Y3, and Y4, respectively. The FFTs for measurements conducted on the wall in the X direction are shown in Figures 8e-f. According to Figures 8a-d, the average natural frequencies of the first two modes are 1.32 Hz and 3.5 Hz, respectively. Figures 8e-f indicate that the

first detected mode frequency is 3.5 Hz when measurements are taken from the wall in the X direction (see Figure 7b). This implies that there should be no modal displacement at locations X1 and X2 for the mode with a 1.32 Hz frequency detected from the side walls. To verify this, the modal analysis results of the finite element model (see Figure 7a) were used. The first (f = 1.22 Hz) and second (f = 3.75 Hz) mode shapes of the building model are shown in Figures 9a-b, respectively. These mode shapes confirm that there are modal displacements at the measurement locations (see Figure 7b) Y1, Y2, Y3, and Y4 for both the first two modes. For measurements at X1 and X2, it was observed that there is negligible modal displacement in the first mode, while there are displacements in the second mode (see Figure 7b and Figures 9a-b), explaining the results. The relative error between the detected natural frequencies and those obtained from finite element simulations is less than 10%, even for the initial material properties of the masonry (density: 1900 kg/m³ and modulus of elasticity: 3700 MPa) based on on-site material testing [11]. Calibrating the material properties would further improve the agreement between the results, which is crucial for future dynamic response analyses.



(a) *(b)*

Figure 9. a) First mode and b) second mode shape of the building model according to 3D finite element simulation

4. Conclusions

The laser Doppler vibrometer was effectively used to detect natural frequency of a masonry arch bridge and a monumental masonry building. LDV allowed rapid measurements from distance; in the case of the bridge, measurements were entirely non-contact since reflective targets were not used. The natural frequencies obtained from ambient vibration tests were compared to the results of 3D finite element simulations where a good agreement is observed. The paper shows how LDV provides an alternative to common operational modal analysis approaches in a post-earthquake field reconnaissance context, where access is challenging and there is a need for investigating multiple structures in limited time.

Acknowledgements

The authors thank building owners and custodians for allowing them access. The post-earthquake field work conducted as a part of this study was supported by EPSRC (grant nos. EP/P025641/1 and EP/V048082/1) and TUBITAK (2221- Fellowships for Visiting Scientists and Scientists on Sabbatical Leave Support Programme). Earthquake Engineering Field Investigation Team (EEFIT) organized the first field mission. Baran Bozyigit acknowledges the financial support of TUBITAK 2219-International Postdoctoral Research Fellowship Programme.

References

[1] Ramos, L. F., Marques, L., Lourenço, P. B., De Roeck, G., Campos-Costa, A., Roque, J. Monitoring historical masonry structures with operational modal analysis: Two case studies. Mech. Syst. Signal Pr., 24(5), 1291-1305, 2010.

[2] Calayır, Y., Yetkin, M., Erkek, H. Finite element model updating of masonry minarets by using operational modal analysis method. Structures, 34, 3501-3507, 2021.

[3] Aloisio, A., Di Pasquale, A., Alaggio, R., Fragiacomo, M. Assessment of seismic retrofitting interventions of a masonry palace using operational modal analysis. Int. J. Archit. Herit., 16(5), 692-704, 2022.

[4] Bayraktar, A., Türker, T., Altunişik, A. C. Experimental frequencies and damping ratios for historical masonry arch bridges. Constr. Build. Mater., 75, 234-241, 2015.

[5] Nassif, H. H., Gindy, M., Davis, J. Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration. Ndt & E International 38(3), 213-218, 2005.

[6] Yu, T., Tang, Q., Vinayaka, S. Identifying structural properties of a steel railway bridge for structural health monitoring using laser Doppler vibrometry. Automat. Constr., 160, 105320, 2024.

[7] Yang, S., Allen, M. S. Output-only modal analysis using continuous-scan laser Doppler vibrometry and application to a 20 kW wind turbine. Mech. Sist. Signal Process., 31, 228-245, 2012.

[8] Pepi, C., Gioffrè, M., Comanducci, G., Cavalagli, N., Bonaca, A., Ubertini, F. Dynamic characterization of a severely damaged historic masonry bridge. Procedia Eng., 199, 3398-3403, 2017.

[9] Providakis, C. P., Mousteraki, M. G., Providaki, G. C. Operational Modal Analysis of Historical Buildings and Finite Element Model Updating Using α Laser Scanning Vibrometer. Infrastructures, 8(2), 37, 2023.

[10] Gioffre, M., Cavalagli, N., Pepi, C., Trequattrini, M. Laser doppler and radar interferometer for contactless measurements on unaccessible tie-rods on monumental buildings: Santa Maria della Consolazione Temple in Todi. J. Phys. Conf. Ser., 778(1), 012008, 2017.

[11] Bozyigit, B., Ozdemir, A., Donmez, K., Dalgic, K. D., Durgut, E., Yesilyurt, C., Dizgin, Y., Yildeniz, C., Ispir, M., Bedirhanoglu, I., Aktas, Y.D., Acikgoz, S. Damage to monumental masonry buildings in Hatay and Osmaniye following the 2023 Turkey earthquake sequence: The role of wall geometry, construction quality, and material properties. Earthquake Spectra, 87552930241247031, 2024.

KAHRAMANMARAŞ VE HATAY MERKEZLİ DEPREMLERDEN ETKİLENEN TARİHİ KÖPRÜLER

Dr. Ayşe AVŞİN[1]

Tarihi Köprüler Şubesi Müdürü, Karayolları Genel Müdürlüğü,
aavsin@kgm.gov.tr

Özet

Yüzyıllar boyunca birçok medeniyetin gelişimine tanıklık eden Anadolu topraklarında; haberleşme, askeri, ticari vb. gereksinimlerin karşılanması amacıyla yol ağları oluşturulmuştur. Bu yol ağları üzerinde de su, vadi vb. engelleri aşmak için köprüler inşa edilmiştir. 2024 yılı Karayolları Genel Müdürlüğü envanter verilerine göre; 1.Derece deprem kuşağı üzerinde yer alan ülkemizde korunması gerekli kültür varlığı olarak tescil edilmiş olan Roma, Doğu Roma, Selçuklu, Osmanlı ve Cumhuriyet dönemlerinden günümüze ulaşabilmiş 2509 adet tarihi köprü bulunmaktadır. Bildiri kapsamında; 2023 yılında Kahramanmaraş ile Hatay illerinde meydana gelen depremlerden etkilenen bölgedeki Tarihi Köprülerin hasar durumları ve koruma yaklaşımları ele alınmıştır. İlk olarak; köprülerin deprem öncesi ve sonrası hasar durumlarına göre karşılaştırma yapılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda deprem nedeniyle hasar almış olan köprüler belirlenmiş olup, bu köprülerde yapılan restorasyon ve konservasyon çalışmaları anlatılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Tarihi Köprü, Restorasyon, Deprem, Koruma

Abstract

In the Anatolian lands which have witnessed the development of many civilizations over the centuries; Road networks have been created to meet needs such as communication, military and trade. Bridges were also built on these road networks to overcome obstacles such as water and valleys. According to the 2024 inventory data of the General Directorate of Highways; in our country, most of which is located in the 1st Degree earthquake zone, there are 2509 historical bridges that have survived from the Roman, Eastern Roman, Seljuk, Ottoman and Republican periods to the present day and are accepted as cultural assets.

Within the scope of this article, the damage conditions and conservation approaches of the Historical Bridges in the region that were affected by the earthquakes that occurred in Kahramanmaraş and Hatay provinces in 2023 are explained. Firstly; a comparison was made according to the damage status of the bridges before and after the earthquake. As a result of this comparison, bridges damaged due to the earthquake were identified. The restoration and conservation works carried out on these bridges are explained.

Keywords: Historical Bridge, Restoration, Earthquake, Protection

1. Giriş

Günümüzde 2863 Sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu kapsamında yer alan ve korunması gerekli kültür varlığı olarak tescil edilmiş olan Tarihi Köprülerin korunmasına yönelik envanter, restorasyon proje ve uygulama çalışmaları 6001 Sayılı Karayolları Genel Müdürlüğünün Hizmetleri Hakkında Kanun gereği Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yürütülmektedir. Ayrıca Kültür ve Turizm Bakanlığı, Kültür Varlıklarını Koruma Yüksek Kurulu'nun 716 sayılı ilke kararında; Kültür varlığı niteliğindeki köprülerin tadilat, tamirat ve esaslı onarımı yapılırken mimari karakterlerini bozmadan orijinal durumlarının araştırılarak buna uygun rölöve, restitüsyon ve restorasyon projelerinin hazırlanıp ilgili koruma bölge kurullarından izin alınarak onarımlarının Karayolları Genel Müdürlüğünce yapılmasının ve onarım uygulamalarına ilişkin diğer kamu kurum ve kuruluşlarının taleplerinin de Karayolları Genel Müdürlüğü aracılığı ile koruma bölge kurulu müdürlüklerine iletilmesinin sağlanması gerektiği hükmü de yer almaktadır.

Karayolları Genel Müdürlüğünce yapılan arazi ve arşiv çalışmaları ile literatür taramaları sonucunda; ülkemizde tespit edilen ve koruma bölge kurullarınca da tescil edilmiş olan 2509 adet tarihi köprü bulunmaktadır. 2509 adet tarihi köprünün; 212 adeti ise Roma Döneminde, 48 adeti Doğu Roma Döneminde, 168 adeti Selçuklu Döneminde, 1909 adeti Osmanlı Döneminde, 172 adeti Cumhuriyet Döneminde inşa edilmiştir. Yurt dışında ise çoğunluğu Bosna-Hersek'te olmak üzere Osmanlı Dönemine ait 316 adet köprü bulunduğu tespit edilmiştir. [1]

2. Bölgenin Tarihsel Gelişimi ve Depremlerden Etkilenen Tarihi Köprüler

2.1. Tarihsel Süreç İçinde Kahramanmaraş ve Hatay İllerindeki Deprem Aktiviteleri

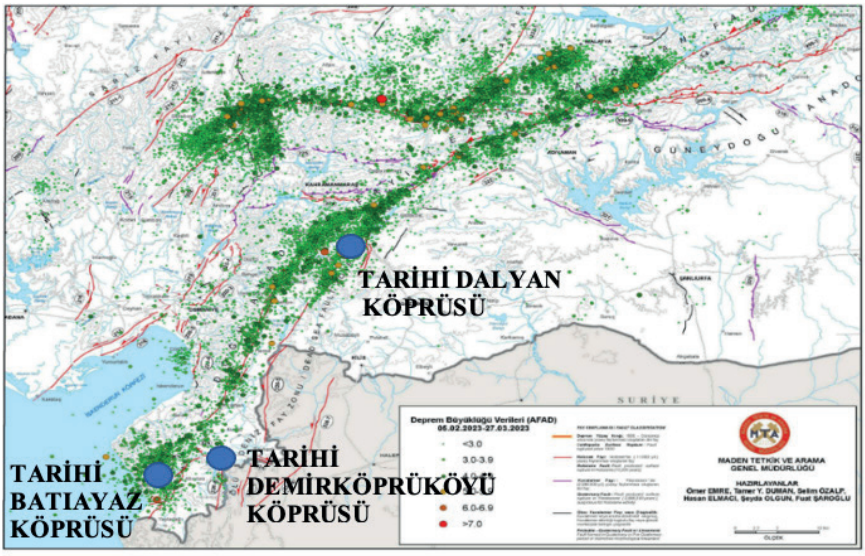
Roma ve Osmanlı Dönemine ait yazılı kaynaklardan geçmişte bölgede ağır hasarlara ve can kaybına neden olan depremlerin yaşandığı anlaşılmaktadır. Ayrıca bu depremlerden etkilenen yapıların ve insanların sayısı ile yapıların hasar durumlarına göre depremlerin şiddeti ve etki alanları hakkında da bilgilere ulaşılmaktadır. Tarihsel deprem verilerine göre; bölgede M.Ö.184, 69, 37, M.S. 52, 115, 340, 342, 396, 447, 458, 525, 526, 528, 557, 588, 713, 835, 844, 847, 859, 972, 1091, 1106, 1109, 1138, 1170, 1179, 1303, 1408, 1759, 1796, 1822, 1872 ve 1951 yıllarında büyük hasarlara ve can kaybına

yol açan depremler yaşanmıştır. [2] Bu depremlerde birçok konut ve anıtsal yapı yıkılmış ve kullanılamaz duruma gelmiştir. Bu yapılardan bazıları kapsamlı onarımlarla, bazıları ise kısmi onarımlarla günümüze ulaşabilmiştir.

Günümüzde bölgede 6 Şubat 2023 tarihinde saat 04.17'de Kahramanmaraş'ın Pazarcık ilçesinde 7,7 büyüklüğünde, saat 13.24'te ise Kahramanmaraş'ın Elbistan ilçesinde 7,6 büyüklüğünde iki ayrı deprem ve sonrasında ise büyüklüğü 4-6.6 arasında değişen artçı sarsıntılar olmuştur. Bu depremler çok geniş bir alanda hissedilmiş olup, can kaybına, yaralanmalara, binlerce binanın yıkılmasına ve hasar görmesine neden olmuştur. Kahramanmaraş ve Hatay illerinde meydana gelen bu depremlerden ve artçı sarsıntılardan etkilenen 11 adet il afet bölgesi ilan edilmiştir. Daha sonra AFAD tarafından yapılan tespitler sonucu 6 il daha afet bölgesi kapsamına alınmıştır. [3]

Hatay ve Kahramanmaraş çevresinin; yapılan yüzey araştırmaları ve kazılar sonucu elde edilen buluntular doğrultusunda Prehistorik dönemden başlayarak birçok medeniyete ev sahipliği yapmış olduğu bilinmektedir. [4] Arkeolojik kazılarda Neolitik, Kalkolitik ve Tunç Çağı'na ait kalıntılar bulunan Antakya ve çevresi; Asur, Hitit, Pers, Makedon, Mısır, Roma, Selçuklu, Memluk Medeniyetleri ile Osmanlı Dönemlerinde de önemli bir yerleşim merkezi olmuştur. [5] Yavuz Sultan Selim'in Mısır Seferi sırasında Osmanlı hâkimiyetine geçen Antakya'da birçok deprem meydana gelmiş ve şehir surları kısmen yıkılmış, köprülerde hasarlar oluşmuş ve çok sayıda insan ölmüştür. 3 Nisan 1872 tarihinde yaşanan deprem halk üzerinde derin izler bırakmıştır.

Birçok medeniyete ve dine ev sahipliği yapan Hatay ve Kahramanmaraş bölgesi önemli ticaret ve askeri yolların yanı sıra, hac yollarının da üzerinde yer almaktadır. Hititler, Persler, tarafından oluşturulan Anadolu'daki yol güzergahları; Roma, Doğu Roma, Selçuklu ve Osmanlı Döneminde de kullanılmaya devam edilmiş ve ana yollara ilave tali yollarla genişletilmiştir. [6] Bu yollar üzerinde derin vadiler ve su gibi engelleri geçmek ve ulaşımı sağlamak amacı ile çok sayıda köprü inşa edilmiştir. Karayolları Genel Müdürlüğü envanterinde yer alan 2509 adet tarihi köprünün 243 adeti 2023 yılında meydana gelen depremlerden etkilenen Kahramanmaraş, Gaziantep, Hatay, Kilis, Diyarbakır, Adana, Osmaniye, Şanlıurfa, Adıyaman, Malatya ve Elazığ illerinde bulunmaktadır. Fay hatlarına yakın ve yaşanan depremlerden etkilenmesi muhtemel olan 139 adet tarihi köprü yerinde incelenmiştir.



Şekil 1- 06.02.2023 Kahramanmaraş ile 20.02.2023 Hatay depremlerine ait ana ve artçı sarsıntıların dağılımı haritası üzerinde ağır hasar gören ve bildiri kapsamında incelenen tarihi köprüler

Hasar durumu tespitinde köprülerin deprem öncesi durumuna göre karşılaştırma yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda sadece depremlerden etkilenen tarihi köprüler belirlenmiştir. Deprem öncesi hasarlı olmasına rağmen, deprem etkisiyle hasar durumunda bir değişim yaşanmamış olan köprüler bu çalışma kapsamında ele alınmamıştır. İncelenen 139 adet köprüden 3 adetinin depremde ağır hasar aldığı, 3 adetinin orta derecede, 4 adetinin ise az hasar aldığı tespit edilmiştir.

Çalışma kapsamında incelenen köprüler; kemerlerinde ciddi strüktürel çatlaklar ve kemerler ile tempan duvarlarında yıkılma olması durumunda ağır hasarlı olarak, kemerlerinde, tempan duvar ve korkuluklarda kısmi yok olmalar, çatlaklar olması durumunda orta hasarlı, korkulukları ve tempan duvarlarında az miktarda taş kayıpları bulunması durumunda ise az hasarlı olarak nitelendirilmiştir. Depremler dışında bölgede (AFAD tarafından afet bölgesi ilan edilen şehirlerde) 2023 yılında yaşanan sellerden kaynaklı bazı köprülerde de hasarlar oluşmuştur. Aşağıdaki tabloda sadece deprem kaynaklı hasar alan tarihi köprüler gösterilmiştir.

Gaziantep İlinde bulunan, Osmanlı Dönemi eseri 20m uzunluğunda ve 3m genişliğindeki Tarihi Yakacık Köprüsünde; 2022 yılında yapılan incelemelerde tempan duvar ve döşemesinde kısmi yok olmalar tespit edilmiş ve kor-

kuluklarının da tamamen betonarme olarak yenilenmiş olduğu belirlenmiştir. Depremlerden sonra yapılan incelemelerde ise yok olmaların bir miktar daha ilerlediği tespit edilmiştir. Hatay İlinde bulunan, Osmanlı Dönemi eseri 65m uzunluğunda ve 5,4m genişliğindeki Tarihi Danaahmetli Köprüsünde; 2022 yılında yapılan incelemelerde tempan duvar ve döşemesinde kısmi yok olmalar ve korkuluklarının da olmadığı belirlenmiştir. Depremlerden sonra yapılan incelemelerde ise yok olmaların bir miktar daha ilerlediği tespit edilmiştir.

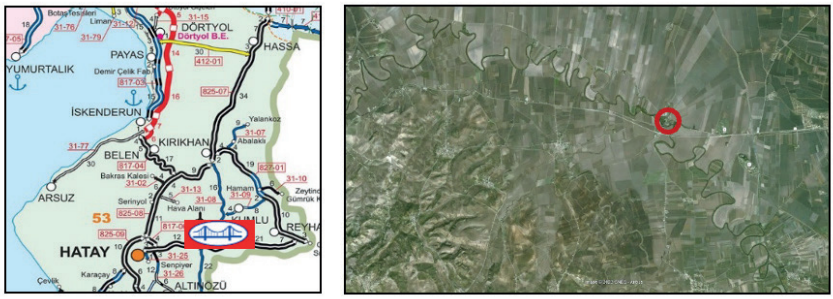
Tablo 1- Depremden Etkilenen Tarihi Köprüler

DEPREMDEN ETKİLENEN TARİHİ KÖPRÜLER								
SIRA NO	KÖPRÜ ADI	İL	İLÇE	UZUNLUK (M)	GENİŞLİK (M)	KEMER SAYISI	DEPREM KAYNAKLI HASAR DURUMU	DEPREM ÖNCESİ HASAR DURUMU
1	DEMİRKÖPRÜ KÖYÜ (HİTİT)	HATAY	ANTAKYA	110	7,1	8	AĞIR HASARLI	HASARSIZ
2	BATIAYAZ (TEKNEPINARI)	HATAY	SAMANDAĞ	30	3,75	1	AĞIR HASARLI	HASARSIZ
3	DALYAN (BALIKÇI-DANİŞMENT)	KAHRAMANMARAŞ	TÜRKOĞLU	80	4	4	AĞIR HASARLI	ORTA HASARLI
1	YAKACIK	GAZİANTEP	OĞUZELİ	20	3	2	ORTA HASARLI	AZ HASARLI
2	CEYHAN (GÖKSU)	KAHRAMANMARAŞ	ONİKİŞUBAT	160	3,3	6	ORTA HASARLI	AZ HASARLI
3	DANAAHMETLİ	HATAY	KIRIKHAN	65	5,4	6	ORTA HASARLI	AZ HASARLI
4	TOSUNFAKI	OSMANİYE	MERKEZ	14	4	1	AZ HASARLI	HASARSIZ
5	SÜLEYMANLI (KANLI KÖPRÜ)	KAHRAMANMARAŞ	MERKEZ	20	3,8	1	AZ HASARLI	HASARSIZ
6	KANLIDERE	KAHRAMANMARAŞ	DULKADİROĞLU	35	5,85	3	AZ HASARLI	HASARSIZ
7	CENDERE	ADIYAMAN	KAHTA	135	7	2	AZ HASARLI	HASARSIZ

Kahramanmaraş İlinde bulunan, Osmanlı Dönemi eseri 160m uzunluğunda ve 3,3m genişliğindeki Tarihi Ceyhan Köprüsünde; 2022 yılında yapılan incelemelerde tempan duvarlarda şişmeler ve kısmi çatlaklar olduğu, döşemesinin asfalt ile kaplandığı, korkuluklarının çimento harçlı moloz taş malzeme ile yenilendiği, kemerlerinin ise sağlam olduğu belirlenmiştir. Ancak depremlerden sonra yapılan incelemelerde ise köprünün ana kemeri sağlam olmakla birlikte, kilit taşı çevresinde strüktürel çatlaklar ve ayrışmalar tespit edilmiştir. Hasarsız olan Tarihi Tosunfakı, Kanlıdere, Süleymanlı Köprülerinde ise korkuluk taşlarında az miktarda yıkılmalar meydana geldiği tespit edilmiştir. Adıyaman ilinde bulunan, 120 m. uzunluğunda, 7 m. genişliğindeki Roma Dönemi eseri ve deprem öncesinde hasarı bulunmayan Tarihi Cendere (Septimius Severus) Köprüsünde ise deprem sonrasında yapılan

incelemelerde köprünün giriş ve çıkışında yer alan sütunlarda çatlaklar belirlenmiştir.

2.2. Tarihi Demirköprü Köyü (Hitit) Köprüsü



Şekil 2,3- Köprünün Hatay İlindeki Konumu ve 2004 yılı Google görüntüsü

Tarihi Demirköprü Köyü (Hitit) Köprüsü; Hatay İli, Antakya İlçesinde, Asi Nehri üzerinde bulunmaktadır. Roma Döneminde 9 kemerli olarak inşa edilmiş olan köprünün kalıntıları üzerine, köprü Osmanlı döneminde 8 kemerli olarak yeniden inşa edilmiştir. Tarihi Demirköprü Köyü (Hitit) Köprüsü; günümüzde 110m uzunluğunda, 7,1m genişliğinde olup, 8 adet basık sivri formda (çift merkezli) taş kemere sahiptir. Gayrimenkul Eski Eserler ve Anıtlar Yüksek Kurulu'nun 14.03.1980 gün ve 11789 sayılı kararı ile korunması gerekli kültür varlığı olarak tescil edilmiştir.

Geçmişte Pontisfer ve Cisr-i Hadid olarak adlandırılan köprünün; giriş ve çıkışında altında tonozlu bir geçişi ve demir kapısı olan iki kulesinin var olduğu ve kulenin girişindeki demir kapılar nedeni ile de köprüye demirköprü de denildiği bölgeyi gezen seyyahlardan ve çeşitli yazılı kaynaklardan edinilmektedir. [7] İstanbul'dan başlayan hac yolu güzergahı üzerinde ve Hristiyanlar için kutsal kabul edilen Hatay İlinde inşa edilmiş olan Tarihi Demirköprü; Osmanlı ve Selçuklu Döneminde de Posta teşkilatının yanı sıra askeri ve dini amaçlı kullanılan yol güzergahının önemli bir menzil noktası olmuştur.

1738 yılında bölgeyi gezen seyyah ve yazar Richard Pococke'nin yazılarından ve 1752 yılına ait Osmanlı Dönemi belgelerinden köprü ve kulelerin kullanıldığı anlaşılmaktadır. Ancak; 1757 yılından 1763 yılına kadar Osmanlı

Devleti'nde sadrazamlık görevinde bulunan ve bir dönem Halep Valiliği de yapmış olan Koca Mehmet Ragıp Paşa'nın 18. yy. ortalarında Demirköprü Köyüne Derbent Teşkilatının menzil noktası olarak yeni bir köprü ve kule yaptırdığı da bilinmektedir. [8]



Şekil 4- 2011 yılı Google görüntüsü



Şekil 5- 2022 yılı Google görüntüsü

1752 yılında halk tarafından kullanıldığı bilinen Tarihi Demirköprü Köyü Köprüsünün ve kule yapılarının 1763 yılına kadar geçen süre içinde kapsamlı onarım görmesi, köprünün ve kulelerinin bölgede 7 Aralık 1759 tarihinde yaşanan VIII şiddetindeki depremde yıkıldığını, 1829 yılında tekrar onarım görmüş olması da 13 Ağustos 1822 tarihinde yaşanan ve son beş yüzyılın en büyük depremi olarak kayıtlara geçen X şiddetindeki depremde de ciddi hasar aldığını göstermektedir.

1842 yılında bölgeyi gezen yer bilimci ve coğrafyacı Ainsworth yazılarında köprü ve kulelerden bahsederek, köprünün antik köprü kalıntısı üzerinde yeniden inşa edilmiş olduğunu ifade etmiştir. [7] Ayrıca 1842 yılında var olduğu bilinen ancak günümüze ulaşamamış olan kuleler ile giriş kapısının da Antakya ve Samandağ yerleşimlerinin tamamen yıkılmasına ve bölgede tsunami gibi doğal afetlere neden olan, 3 Nisan 1872 tarihinde yaşanan X şiddetindeki depremde yıkılmış olduğu anlaşılmaktadır.

19. Yy içinde köprüye değirmen yapısı da ilave edilmiştir. Ayrıca Fransız işgali döneminde de 2 adet tahliye gözü eklenmiştir. 20. Yy. sonlarında ise köprü giriş ve çıkışları genişletilmiş ve köprünün döşemesi asfalt kaplanmıştır. 2015 yılına kadar çeşitli onarımlar görerek ulaşan köprünün 2015-2016 yılları arasında Karayolları Genel Müdürlüğünce restorasyonu yapılmış ve köprü kullanıma açılmıştır.



Şekil 6,7- Köprünün 2012 yılında yapılmış olan restorasyon öncesi görünümü



Şekil 8,9- Köprünün 2015 yılında tamamlanan restorasyon sonrası görünümü

Bölgede yaşanan deprem felaketlerinden sonra tarihi köprüde yapılan incelemelerde; korkuluklarının bir kısmının yıkıldığı ve dere yatağına düştüğü, köprünün girişinde yer alan ve 2015 yılında restore edilen Osmanlı Dönemi eklentisi 2 katlı değirmen yapısının da tamamen yıkıldığı, kemerlerinde strüktürel çatlaklar ve döşemesi ile tempan duvarında da ayrışmalar olduğu tespit edilmiştir. Ancak yöre halkı ve depremden sonra bölgede çalışan görevlilerden elde edilen sözlü bilgiler doğrultusunda; yukarıda bahsedilen hasarların tamamen deprem kaynaklı olmadığı anlaşılmıştır.

Asi Nehri üzerindeki Antakya, Cilvegözü ve Kırıkhan arasındaki ulaşımı sağlayan betonarme köprünün deprem nedeniyle yıkılmış olması, bölgeye yardım taşıyan ağır tonajlı araçlar ile askeri araçların tarihi köprü üzerinden geçirilmesini zorunlu hale getirmiş ve bu durum tarihi köprünün ağır hasar almasına yol açmıştır. Deprem kaynaklı hafif hasar almasına rağmen ağır taşıt trafiği nedeniyle tarihi köprünün 3 adet kemerinde strüktürel çatlaklar ve döşemesinde ayrışmalar, tempan duvar düzleminde de kaymalar meydana gelmiştir. Köprüde deprem sonrasında yıkılma tehlikesi oluşmuştur. Köprünün temelinin taş ampatman üzerine yapıldığı, kenet ve zıvana kullanılmadığı belirlenmiştir.

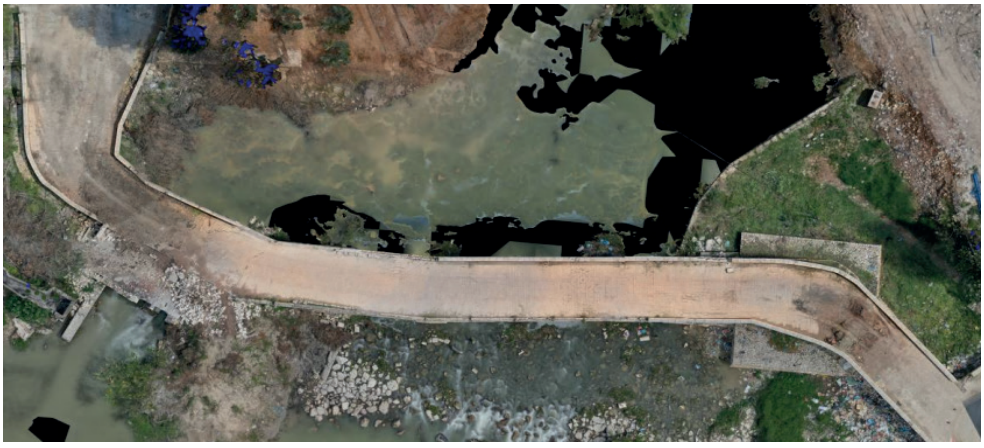


Şekil 10- Köprünün depremlerden sonraki görünümü





Şekil 11,12 -Köprü girişindeki değirmen yapısının yıkılmadan önceki ve sonraki görünümü



Şekil 13- Köprünün deprem sonrasına ait ortophoto görünümü (2023) [9]




Şekil 14,15- Köprünün deprem sonrası görünümü (2023)



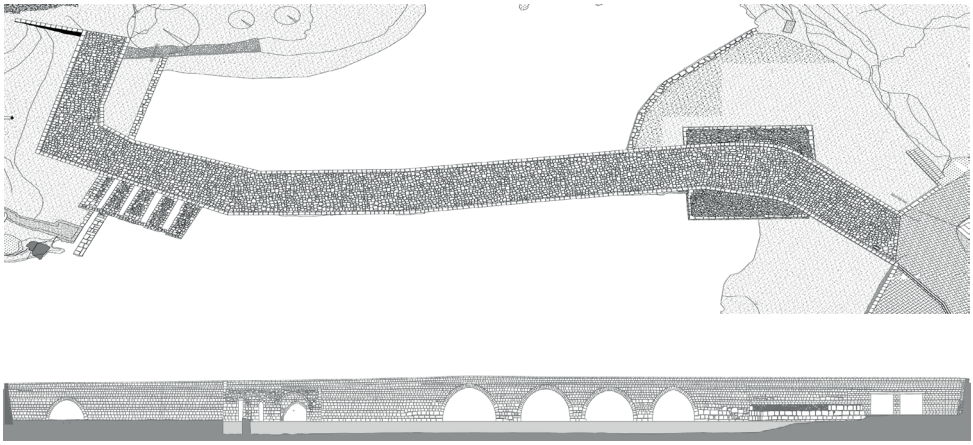

Şekil 16,17- Köprünün deprem sonrası görünümü (2023)

2023 yılı içinde köprünün deprem sonrası durumuna yönelik kot okumaları yapılarak, ölçüler alınmış ve rölöve çizimleri, restitüsyon projesi ile yapısal analiz çalışmaları ve teknik araştırma çalışmaları sonucunda elde edilen bulgulara göre restorasyon uygulama projeleri hazırlanmıştır. Projeler; Hatay Kültür Varlıkları Koruma Bölge Kurulu'nun 03.04.2024 tarih ve 3850 sayılı kararı ile de onaylanmıştır.

Yapısal Analiz çalışmaları kapsamında; köprünün restorasyon sonrası durumu modellenmiş ve köprü; zati ve hareketli yükler ile deprem yüklerinin ortak etkisinden oluşan yük birleşimleri altında analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre; köprünün orta bölümünde gerilme değerlerinin yüksek olduğu görülmüş, ancak köprünün hasar alan bölümlerinin özgün yapım tekniğine uygun olarak sökülüp yeniden yapılması ve köprünün sökülmeyen bölümlerinde enjeksiyon uygulaması yapılması halinde; taşıyıcı sisteminin gelebilecek yatay ve düşey yükleri taşıyabileceği öngörülmüştür.



Şekil 18,19- Köprünün Deprem Sonrasına ait rölöve çizimleri (2023)[9]



Şekil 20,21- Köprünün restorasyon projesi (2023) [9]

Köprüde yapılan incelemeler ve yapısal analizler sonucu hazırlanan köprünün restorasyon projesi doğrultusunda yürütülecek olan restorasyon uygulama çalışmaları kapsamında; kemerlerdeki deformasyonlar ve ciddi strüktürel çatlaklar nedeni ile ağır hasarı bulunan köprünün kemer taşlarının numaralandırılarak itinalı bir şekilde sökülmesi ve kenet zıvana kullanılarak özgün formuna göre kemer ve tempan duvarlarının yeniden örülmesi, sökülmesi öngörülmeyen bölümlerde ise bünyesel boşlukların doldurulması amacıyla enjeksiyon yapılması ve büyük parça kaybı bulunan taşların çürütülerek, sağlamlaştırılması, yıkılmış olan değirmen yapısının da yeniden projesine uygun (kenet ve zıvana kullanılarak) yapılması yönünde müdahale kararları alınmıştır. Ayrıca köprünün restorasyonunun tamamlanması sonrasında yaya geçişine hizmet vermesi sağlanacaktır.

2.3. Tarihi Batıayaz Köprüsü

Hatay İlindeki, Tarihi Batıayaz (Teknepınar) Köprüsü; geçmişi M.Ö 300 yıllarına dayanan eski adı Seleucia Pierra olan Samandağ İlçesinde, Büyükkaraçay Deresi üzerinde bulunmaktadır. Büyükkara Çayı'nın açtığı dar ve derin kanyon üzerine Osmanlı Döneminde 19. yy'da inşa edilmiş olan Tarihi

Batıayaz Köprüsü; 21 m uzunluğunda ve 4 m genişliğinde olup, basık sivri formda (çift merkezli) bir kemere sahiptir. Tarihi Batıayaz (Teknepınar) Köprüsü, Adana Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu'nun 31.10.2006 tarih 2143 sayılı kararı ile korunması gerekli kültür varlığı olarak tescil edilmiştir.



Şekil 22,23- Köprünün Hatay İlindeki Konumu ve 2004 yılı Google görüntüsü

Köprünün tempan duvarının, döşemesinin ve korkuluklarının; Antakya ve Samandağ yerleşimlerinin tamamen yıkılmasına ve bölgede tsunami gibi doğal afetlere neden olan 3 Nisan 1872 tarihinde yaşanan X şiddetindeki depremde yıkılmış olduğu anlaşılmaktadır. Bu tarihten sonraki onarımlarda köprünün tempan duvar ve döşemesinde malzeme değişikliği, döşeme kotlarında özgününe uymayan müdahaleler yapılmıştır. Köprünün döşemesi yaklaşık 2 m. kadar yükseltilmiş ve kemere daha fazla ağırlık yüklenmiştir.



Şekil-24,25 Köprünün 2020 yılında yapılmış olan kısmi onarım öncesi görünümü (2019)



Şekil-26,27 Köprünün 2020 yılındaki onarım sonrası görünümü (2020)

Tarihi köprüde kısmi bakım çalışmaları; 2019-2020 yılları arasında yerel yönetim tarafından yapılmıştır. Tarihi Batıayaz Köprüsü'nün onarım öncesine ait (2018 yılı) tempan duvar dokusu incelendiğinde tempan duvarın alt bölümlerinde (ayak çevresi) büyük boyutlu kaba yonu taşların kullanıldığı, üst bölümlerinde ise küçük boyutlu kaba yonu taşlar ile moloz taşların karışık kullanıldığı görülmüştür.



Şekil-28,29 Köprünün deprem sonrası görünümü (2023)



Şekil-30,31 Köprünün deprem sonrası görünümü (2023)



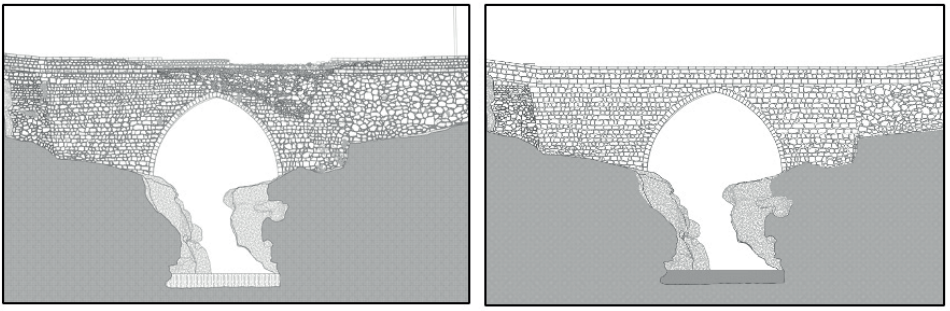
Şekil-32,33 Köprünün deprem sonrası görünümü (2023)

2023 yılında yaşanan depremler sonrasında köprüde yapılan incelemelerde, köprünün tempan duvarının bir bölümü ile korniş ve korkuluklarının, döşemesinin bir bölümünün yıkıldığı, kemer karnında taş kayıplarının olduğu tespit edilmiştir. Ancak, köprünün yıkılmış olan tempan duvar örgüsü incelendiğinde, depremden önce yapılmış olan onarımlarda köprünün yapım tekniğine uygun olmayan müdahalelerde bulunulduğu görülmüştür. Köprünün tempan duvarlarının küçük parça taşlarla örüldüğü ve tempan duvar örgüsünün arkasına tempan duvar ile grift olarak örülmesi gereken sıralı moloz taş duvar imalatının yapılmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca harçlı moloz taş dolguda kullanılan taşların uygun boyutta olmadığı ve gerekli miktarda harç kullanılmadığı da belirlenmiştir. Tarihi köprüdeki hasarların, son dönem yapılan onarımlardaki bölümlerde olması; hasarların tamamen depremin etkisinden olmadığını, malzeme ve işçilik kaynaklı onarım hatalarından da oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 36,37- Köprünün deprem sonrasına ait vaziyet planı ve restorasyon projesi [10]

Tarihi köprünün kaya zemin üzerine inşa edildiği, kenet ve zıvana kullanılmadığı belirlenmiştir. 2023 yılı içinde köprünün deprem sonrası durumuna yönelik kot okumaları yapılarak, ölçüler alınmış ve rölöve çizimleri, restitüsyon projesi ile yapısal analiz çalışmaları ve teknik araştırma çalışmaları sonucunda elde edilen bulgulara göre restorasyon uygulama projeleri hazırlanmıştır. Projeler; Hatay Kültür Varlıkları Koruma Bölge Kurulu'nun 13.02.2024 tarih ve 3615 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Şekil 38,39- Köprünün deprem sonrasına ait cephe rölöve çizimi ile restorasyon projesi [10]

Yapısal Analiz çalışmaları kapsamında; köprünün restorasyon sonrası durumu modellenmiş ve köprü; zati ve hareketli yükler ile deprem yüklerinin ortak etkisinden oluşan yük birleşimleri altında analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre; köprünün kemerinde gerilme değerlerinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Köprünün yıkılan tempan duvarların özgün yapım sitemine uygun olarak yeniden örülmesi ve sökülmeyen, sağlam bölümlerinde bünyesel boşlukların doldurulması amacıyla enjeksiyon uygulaması yapılması halinde; taşıyıcı sisteminin gelebilecek yatay ve düşey yükleri taşıyabileceği öngörülmüştür.



Şekil-34,35 Köprünün 2024 yılında tamamlanan restorasyon sonrası görünümü

Köprüde yapılan incelemeler ve yapısal analizler sonucu hazırlanan köprünün restorasyon projesi doğrultusunda yürütülen restorasyon uygulama çalışmaları kapsamında; tempan duvarının ve döşemesinin bir bölümü yıkılan köprünün özgün köprü yapım tekniğine uygun olarak tempan duvarı yeniden örülmüş, döşemesi yapılmış ve korkuluklar eklenmiş, sökülmesi öngörülmeyen bölümlerde ise bünyesel boşlukların doldurulması amacıyla enjeksiyon yapılmıştır. Ayrıca tempan duvarda büyük parça kaybı bulunan taşlar çürütülerek, sağlamlaştırılmıştır. Ayrıca köprünün döşemesi de özgün kotuna getirilmiş ve giriş ve çıkışına eklenen basamaklar ile çevre bağlantısı sağlanmış ve basamaklar sayesinde köprüden araç geçişi engellenerek, sadece yaya geçişine hizmet verir hale getirilmiştir.

2.4. Tarihi Dalyan (Balıkçı-Danişment) Köprüsü

Tarihi Dalyan Köprüsü; Kahramanmaraş İli, Türkoğlu İlçesinde, Aksu Çayına dökülen İmalı Deresi üzerinde bulunmaktadır. Osmanlı Döneminde inşa edilmiş olan köprü 80m uzunluğunda, 4m genişliğinde olup, 2 si kısmen toprak altında kalmış olan tek merkezli dairesel formda ve diğer 2 adet kemeri de basık sivri formda (çift merkezli) olmak üzere 4 adet kemere sahiptir. Yakınındaki Danişment Höyük nedeniyle köprü Danişment Köprüsü olarak da adlandırılmaktadır. Adana Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu'nun 25.11.2010 tarih ve 6555 sayılı kararı ile korunması gerekli kültür varlığı olarak tescil edilmiştir.



Şekil-40,41 Köprünün Kahramanmaraş İlindeki Konumu ve 2004 yılı Google görüntüsü

Tarihi Dalyan (Balıkçı-Danişment) Köprüsünde deprem sonrası yapılan incelemede, dere yatağı üzerinde bulunan 2 büyük kemerinin tamamen yıkıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca diğer 2 adet kemeri ile köprünün tempan duvarlarının bir kısmı da toprak dolgu altında kalmıştır. Köprünün deprem öncesine ait fotoğrafları incelendiğinde, köprüye betonarme döşeme ve korkuluk eklendiği, köprünün ana kemerindeki kilit taşının da düşmüş olduğu ve kemer formunda da ciddi deformasyon bulunduğu görülmüştür. Bu nedenle, tarihi köprünün 2 adet kemerinin depremde yıkılmasına; ana kemerdeki deprem öncesi oluşmuş deformasyonun neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 42- 2014 yılı Google görüntüsü



Şekil 43- 2023 yılı Google görüntüsü

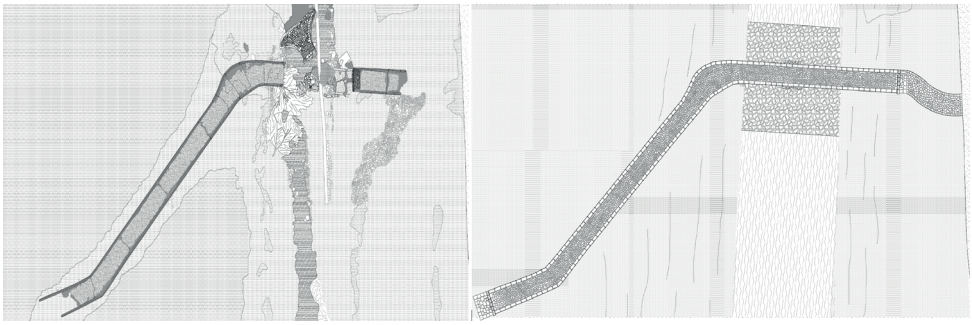


Şekil 44- Köprünün yıkılmadan önceki görüntüsü (2018)

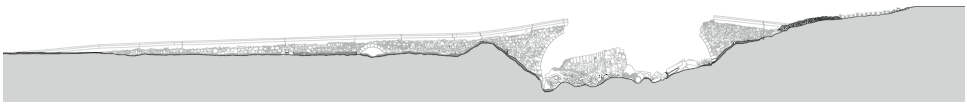


Şekil 45,46- Köprünün deprem sonrası görünümü (2023)

2023 yılı içinde köprünün deprem sonrasındaki son durumuna yönelik kot okumaları yapılarak, ölçüler alınmış ve rölöve çizimleri, restitüsyon projesi ile yapısal analiz çalışmaları ve teknik araştırma çalışmaları sonucunda elde edilen bulgulara göre restorasyon uygulama projeleri hazırlanmıştır. Projeler; Gaziantep Kültür Varlıkları Koruma Bölge Kurulu'nun 20.02.2024 tarih ve 5934 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Şekil 47,48- Köprünün deprem sonrasına ait planı (rölöve çizimi ile restorasyon projesi) [11]



Şekil 49- Köprünün cephe rölöve çizimleri [11]



Şekil 50- Köprünün cephe restorasyon projesi [11]

Yapısal Analiz çalışmaları kapsamında; köprünün restorasyon sonrası durumu modellenmiş ve köprü; zati ve hareketli yükler ile deprem yüklerinin ortak etkisinden oluşan yük birleşimleri altında analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre; köprünün yıkılan bölümlerinin özgün yapım sitemine uygun olarak yeniden örülmesi ve yeni yapılan bölüm ile ayakta kalan bölümlerin birlikte çalışmasının sağlayacak şekilde kısmen sökülüp yeniden yapılması durumunda taşıyıcı sisteminin gelebilecek yatay ve düşey yükleri taşıyabileceği öngörülmüştür.

Tarihi Dalyan Köprüsünde yapılan incelemeler ve yapısal analizler sonucu hazırlanan köprünün restorasyon projesi doğrultusunda yürütülecek olan restorasyon uygulama çalışmaları kapsamında; yıkılan kemerlerin kenet zıvana kullanılarak ve özgün kemer tipine göre örülmesi ve tempan duvarlarının tamamlanması, sökülmesi öngörülmeyen bölümlerde ise bünyesel boşlukların doldurulması amacıyla enjeksiyon yapılması, toprak altında kalan kemer ve tempan duvar bölümlerinin de açığa çıkarılarak sağlamlaştırılması yönünde müdahale kararları alınmıştır.

3. Sonuç

Ana görevi; ulaşımı sağlamak olan köprülerin emniyetli bir geçişe imkan vermesi için öncelikle taşıyıcı sisteminin sağlam olması gerekmektedir. Bu nedenle; köprünün konumu, oturduğu zemin, yapı malzemesi, hasar durumu belirlenerek, hasar nedenlerine göre müdahale yöntemleri oluşturulmaktadır. Tarihi köprülerin statik ve dinamik yükler karşısındaki yapısal davranışlarının anlaşılabilmesi için taşıyıcı sistemleri ile zemin-temel ve akarsu-yapı ilişkilerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Büyük bir bölümünün deprem kuşağında yer aldığı ülkemizde; Tarihi Köprünün mevcut durumunun irdelenmesi ve farklı disiplinlerin bir arada çalışması ile oluşturulacak olan restorasyon uygulama projeleri doğrultusunda restorasyonunun yapılması da önem arz etmektedir.

Çoğunlukla tek açıklıklı tarihi köprülerin tasarımında öncelikle köprü temellerinin sağlam kayalar üzerine oturtulması hedeflenmiştir. Çok kemerli köprülerde de temellerin kayalık zemin üzerine oturtulabilmesi için düz bir plan tipi yerine kırıklı plan tipinde inşa edildiği görülmektedir. Topografyanın imkan verdiği durumlarda çok açıklıklı köprülerin ana kemerlerinin

kaya zeminler üzerine oturtulduğu, taşıma gücü zayıf bataklık zeminlerde temellerin ahşap kazıklar üzerine, sağlam zeminlerde ise ahşap ızgaralar üzerine inşa edildiği görülmüştür. Tarihi köprülerin tasarımını inşa edildiği dönemin estetik, teknolojik ve kültürel özellikleri de etkilemiştir.

Ayrıca suyu yönlendirmek için memba ve mansap cephelerinde farklı formlarda şekillendirilen selyaran bölümleri ile kemerlerden gelen yükleri karşılayan ayaklar; aynı zamanda köprü boyuna dik doğrultuda oluşabilecek kuvvetlerin karşılanmasında payanda görevi görerek köprünün depreme dayanıklılığını da artırmaktadır.

2863 Sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu gereği korunması gerekli kültür varlığı olarak tescil edilmiş olan kültür, mimari, sanat ve teknoloji tarihi açısından büyük önem arz eden Tarihi Köprülerin belgelenmesi, korunarak yaşatılması ve gelecek kuşaklara aktarılması amacıyla öncelikli olarak restorasyon uygulamasına esas olacak restorasyon uygulama projelerinin (rölöve, restitüsyon, restorasyon projeleri ve mühendislik hizmetlerine ait projeler) hazırlanması gerekmektedir.

Restorasyon uygulama projeleri hazırlanırken, köprüden sondaj yoluyla karot numuneleri alınarak orijinal malzemelerin fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri tespit edilmekte ve yapının üzerinde bulunduğu zemin jeolojik ve geoteknik olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca uygulamada kullanılması düşünülen yeni yapı malzemelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin tespit edilmesinin yanı sıra akarsuyun yapıya olan etkisinin araştırılması için köprü ve yakın civarındaki dere tabanının topoğrafik haritasının çıkarılarak akarsu rejimine etki eden taban profilinin köprü temeli ile ilişkisi belirlenmektedir. Tüm bu çalışmalar sonucunda köprü yerinin depremselliği de göz önünde bulundurularak köprünün yapısal analizi yapılmaktadır.

Ayrıca analitik modellemesi yapılan köprünün statik ve dinamik yükler karşısında gösterdiği davranışlara göre deplasman, basınç, çekme ve kayma gerilmeleri ile basınçtan ve çekmeden meydana gelen şekil değiştirmelerin maksimum değerleri elde edilerek yapıda kritik gerilme değerlerinin yığıldığı bölgelerin tespiti ile hesap yükleri (Taşıt yükü) bulunmaktadır. Bu çalışmalar; yapı malzemelerinin dayanımlarının karşılaştırılabilmesi olası hasarlara karşı gerekli koruma önlemlerinin alınabilmesi ve taşıyıcı sistemin yeterliliğinin belirlenebilmesi amacıyla yapılmaktadır. [12]

Depremler, barajlar, değişken su akışları, yoğun taşıt trafiği gibi etkiler karşısında taş kemer köprülerin; dayanımını sürdürmesi ve gelecek kuşaklara özgün ve sağlam bir şekilde ulaşabilmeleri için en az müdahale ilkesine bağlı kalınarak, onaylı projeler doğrultusunda restorasyon uygulamalarının yapılması gerekmektedir. Köprüde restorasyon çalışmaları kapsamında; taşıyıcı özelliğini yitirecek derecede bozulmuş kemer formunun özgün hale getirilmesi birinci sırada yapılması gereken bir uygulamadır. Ayrıca köprünün özgün malzemesi ile uyumlu malzeme kullanılarak sağlamlaştırma yapılması, özgün temel sisteminin iyi etüd edilerek, özellikle esnek temel bağlantı sistemleri aynen korunarak temellerin onarılması da önem arz etmektedir.

Ayrıca yığma yapılarda yapı üzerine etki eden yüklerin üniform olarak dağılımını sağlayan harçların; deprem gibi yanal yükler etkisinde kalan taş bloklarının harç boyunca kaymasını sağlaması ile de büyük hasarların oluşmasına engel olduğu bilinmektedir. Bu nedenle; taş kemer köprülerde sıfır derz uygulaması yapılmaması, taşların arasında 5-8mm aralığında derz yapılması gerekmektedir. [13]

Taş köprülerin taşıyıcı sistemlerini oluşturan temeller, ayaklar ve kemerlerin, elastomer mesnet görevi gören enerji sönümleyici esnek bağlantı sistemleri (ahşap ızgara ve ahşap kazık) üzerine oturtulduğu ve bu sayede zeminden yapıya aktarılan deprem kuvvetlerinin azaltılmış olduğu görülmüştür. [14] Ancak özgün çevresel koşulları (dere yatağı, talveg kotu vb.) değiştirilmiş ve stabilitesi bozulmuş olan tarihi köprülerde birdenbire ve çok kısa aralıklarla büyük değişimler gösteren depremlerin yarattığı dinamik etkilerin, çok daha büyük boyutlu hasarlara neden olabileceği anlaşılmıştır. Bu nedenle; restorasyon uygulamalarına başlamadan önce, teknik araştırmalar kapsamında köprü ve yakın çevresine ait sorunlar iyi analiz edilmeli, restorasyon projeleri bu doğrultuda hazırlanmalıdır.

KGM arşivinde yer alan Tarihi Demirköprü Köyü ve Batıayaz Köprülerinin restorasyon uygulama projeleri ve raporları ANB Mimarlık tarafından hazırlanmıştır.

Kaynaklar

[1] Karayolları Genel Müdürlüğü, Sanat Yapıları Dairesi Başkanlığı, Tarihi Köprüler Şubesi Müdürlüğü Envanteri, Ankara, Türkiye.

[2] Beyen K., Erdik M., Mazmanoğlu C., Ekmekçioğlu Z., Antakya'nın Geçmişten Günümüze Sismik Aktivitesi ve Yapılması Gerekenlerin Bir Uluslararası Konferansın Işığında Değerlendirilmesi, Türkiye Mühendislik Haberleri, 423, 51-53, 2003.

[3] 06 Şubat 2023 Pazarcık (Kahramanmaraş),06 Şubat 2023 Ekinözü (Kahramanmaraş) Ve 20 Şubat 2023 Yayladağı (Hatay) Depremleri Bilgi Notu, MTA Genel Müdürlüğü, Ankara, 2023

[4] Koç K., Tarih Boyunca Maraş Şehri'nin Gelişmesini Etkileyen Faktörler, Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, Sayı 21, ss. 311-326, 2009.

[5] Kaypak, Ş., Antakya'nın Kent Kimliği Açısından İrdelenmesi, Mustafa Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 7, 14, 373-392, 2010.

[6] İlter F., Osmanlılara Kadar Anadolu Türk Köprüleri, Ankara, 1978.

[7] Demir A., Through the Ages Antakya, İstanbul, 1996.

[8] Tekin M., Hatay Tarihi, Ankara, 2000.

[9] KGM, Tarihi Demirköprü Köyü Köprüsü Teknik Raporu, Ankara, 2023.

[10] KGM, Tarihi Batıayaz Köprüsü Teknik Raporu, Ankara, 2023.

[11] KGM, Tarihi Dalyan Köyü Köprüsü Teknik Raporu, Ankara, 2023.

[12] Sert H., Partal E. M., Tarihi Köprülerde Yapısal Analiz Çalışmaları, Tarihi Eser. Güç. ve Gel. Güv. Dev. Semp.-I, İMO, Ankara, 2009.

[13] Sert H. vd., Tarihi Köprülerin Özgün Yapım Sistemlerinin Tespiti İle Malzeme Analizlerine İlişkin Yürütülen Teknik Araştırmalar Ve Sonuçları, 6. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi, TMMOB Mimarlar Odası, İstanbul, 2012

[14] Sert,H.vd., Depremler ve Taş Kemer Köprüler Sekizinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 11 Mayıs-14 Mayıs, İstanbul, 2015

TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI ANKARA ŞUBESİ
TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI DİYARBAKIR ŞUBESİ
ODEYA ENDAZYARÊN AVAHÎYÊ

NİRXANDİNA ENDAZYARÎ YA AVAHİYÊN ERDHÊJA 2023 TIRKÎYE-SURÎ DE HİLWEŞAYÎ

Idrîs BEDIRHANOGLU[1]

1 Zaningeha Oxford Beşa Zanîsta Endazyarîyê,

Zankoya Dicle yê Beşa Endazyarî ya Avahîya

idris.bedirhanoglu@eng.ox.ac.uk, ibedirhanoglu@dicle.edu.tr

KURTASÎ

Livê nivîsêde encamên liser lêkolîna avahîyên dîrokî yên hilveşayî li mintika Antakya yê piştî erdhêjên gelek mezin yê Tirkîye-Surî 2023. Li meha Sibatê de sê erdhêjên mezin pêk hatin ku ya ewil 7.8 pile ya diduyan 7.5 pile bu û piştî du heftîyan erdhêjâ sêyemîn 6.3 pile çêbibu. Serdan li gelek avahîyên xirabe hatin dayin lê belê pîvanên endazyarî li 29 avahîyan hatin çêkirin. Hezaran avahî li vê erdhêjê de hilveşîyan û sedhezaran avahî jî xetereyêrên mezin ditin. Gelek avahî yên dirokî yê ji kuç û berâ hatî çêkirin han hilveşîyâne han jî xeterên mezin li sîstema barhilgirtina wân de çêbûye. Jibonâ fêmkirina sebebên wan hilweşandin û xetereyân nêzikî sih avahî bi taybetî hâtin lêkolînkirin. Dîvarên wan hâtin pîvandin û başçêkirina wân hâtin kontrol kirinç. Bi vî şeklî jureyên hilweşandin û xetereyân hâtin bi nâv kirin. Encamên lêkolînê dâ nîşândân kû sebebên sereke yê hilweşândinê kêmasîyan dîwaran li taybeti alîyekê de û nebaşî ya çekirina dîwârâ û xercên zeyifin.

Peyvên Sereke: (10 Pûnto) Avahîyên dîrokî, erdhêj, dîwar, xerc, indexa saxlembunê, testa bê zerer.

ABSTRACT

This study presents the results of an investigation into historical structures located in the Antakya area following the 2023 Turkey-Syria earthquakes. A sequence of three big earthquakes with magnitudes 7.8, 7.5, and 6.3 occurred in February 2023. Many historical masonry buildings were visited; however, technical measurements were taken from 29 buildings. Thousands of buildings were destroyed, and hundreds of thousands of buildings were heavily damaged. Many historical stone masonry buildings were either heavily damaged or destroyed. To trace the reasons behind the damage or totally destroying about 30 historical masonry stone buildings were investigated through carrying out some technical measure-

ments. All the walls were checked in terms of quality. Failure modes and damage types had been identified. The result of this work indicated that most of the buildings were destroyed due to an insufficient amount of wall, particularly in one direction. Poor quality layering and low-strength binding material are other main reasons that cause failure of those structures.

Keywords: (10 Punto) Historical structures, earthquake, wall, mortar, index.

1.TÊKETIN

Li roja 6 Sibat 2023 kathijmar 04.17 didu erdhêjên mezin (Mw=7.8, Mw=7.5) li bajarê Mereşê pêkhat. Piştî didu heftîye din erdhêjek (Mw=6.3) mezin li Samandaxê pêk hat. Di wan erdhêjan de herêma herî zêtedir xirabûn çêbû herema Antakyayê bu. Zêdetirî 50 hezar kes jîyânâ xwe ji dest dân û deh hezârân âvâhî jî hilveşîyan û sed hezârân avahîjî xeterên mezin dîtin. Vêne 1'de bajarên xeterên mezin dîtine hatîye dîyarkirin. Divê vênêde avahîyên hatî lêkolinkirin jî hatîye nîşankirin. Divê mintikê de gelek avahîyên dîrokî yê behampa jî han tevahî hilveşîyane hanjî hinek dîvarên wan xwehr bûne û kelişîne. Piranî avahîyên derdorê Antak yayê hatin lêkolînkirin. Vekîdin jî mezinahiya kelşa erdhêjêjî bi zelalî dîyare.



Vêne 1. Navendên erdhêjan, cihê kelşa erdê û xanîyên hatî lêkolînkirin

2. Lêkolîna Xetereyân

Li gel civatek mezin yâ lêkolînerâ du heftîyâ gelek avahî hatîn kontrol kirin û 29 ji wân pîvanên teknîki hatin standin. Bi vê pîvânân geometriyâ âvâhîyâ, sağlembûna kuç û berân û xercê âvâhîyâ hâtin tespîtkirin. Tevâhî 10 kîlîse, heşt mizgeft, şeş avahîyên gîştî û pênç avahîyên nişteciha hâtine kontrol kirin û pîvanên teknîkî hatine çêkirin. Hemû avahîyên

hatî kontrol kirin bê çîmento û hêsinin. Ev avahîyên he gelek jê avahîyên bijartene jibo temsîlîyeta herêma xwene. Gelek ji wan avahîyê ji bo serdemên erdhêjan gelek caran hâtine nûvekirin û serbanê hinek avahîyân jî bi betonarmeye hâtine guhartin.

Jibona nirxandina xetereyan EMS-98 cetvela xeterâ hatiye bi kar anin û ev cetvel jî ji alîyê Mavroulis û yên din ve hatîye çêkirin. Ev cetvelahe ji xeterên gelik sivik û tevahî hilveşandinê didi ber çawa û di Şeklê 2 yanda dikari bê dîtin. Jibona tevlîhevî ne çêbin ev cetvela EMS-98 tinê jibona dîwarên esasî bi hatiye kar anîn. EMS-98 sevîya xeterê didi nişandan jiber vêkasê jibo nirxandina cureyên xeterê sîstemek din ya nirxandinê pêwîste. Borri û yên din 2020 'mekanizma hîyerarşîyê' pêşnîyar kirine û ev mekanizma sê cureyên xeteran dide berçav: - belavbuna dîwar, - tepkî ya lokal, - tepkîya global. Mekanizma evil ya blavbuna dîwar demakû xerc gelek zeyivbe çêdibi û dîwar bilav dibe. Şeklê kuçan bêmerêzbin jî ev mekanizma çêdibe. Mekanizma diduya, ya lokal, taybetî dema dîwar dukulube pêktê û dereke hanjî du sê deran çêdibe. Hatîye ditîn kû taybetî dema dîwar rêzên wê başbin lê bele egiduwe baş ne hatibin girêdan ew mekanizma he çêdibi. Mekanizma sêyemîn mekanizma globale û dema kû qualitya çêkirinê baş bi û bikari barê xwe transfer biki we carê xeterên kelşa çêdibin din ava dîwarande. Zanînên derhekê avahîyande di Tabloya 1 de hatîye nivîsin.

Tablo 1. Zanînên derhekê avahîyên hatîn lêkolînkirin.

Avahî		**Taybetmendîyê Dîwar**			**Tevahî zânîn**		
Nav	**Bajar**	**Bilindayî (m)**	**Firehî (m)**	**Hijmara tewşikâ**	**Mezinahî (m^2)**	**Tîpa Serbanî**	**Tîpa Rofê**
Kîlîsâ Surp Karasun Manuk	Îskenderun	6.45	0.5	Dimilî	168	n.d.	Girşê dar
Kîlîsâ St Nicholas yâ Ortodox	Îskenderun	9	1	Dimilî	415	n.d.	Girşê dar
Kîlîsâ Katolîk yâ Latînî	Îskenderun	5.6	0.75	Dimilî	375	n.d.	Girşê dar
Kîlîsâ Katolîk yâ Suryanî	Îskenderun	9	0.55	Dimilî	166	n.d.	Çolê dar
Kîlîsâ Ermenî yâ Batiayazê	Samandag	7	0.7	Dimilî	312	n.d.	Qentera kûç
Kîlîsâ Vîrjîn Merrî yâ Ortodoks yâ Sâmadag	Samandag	6.2	0.65	Dimilî	265	n.d.	Girşê dar
Kîlîsâ St. Ilyas yâ Ortodoks	Samandag	6	0.5	Dimilî	204	n.d.	Girşê dar

Kîlîsâ St George Sarilar yâ Ortodoks	Altinozu	6.5	0.6	Dimilî	133	n.d.	Qentera kûç
Kîlîsâ Vîrjîn Merrî yâ Ortodoks yâ Tokaçli	Altinozu	6.2	0.7	Dimilî	187	n.d.	Qentera kûç
Kîlîsâ St George yâ Ortodoks yâ Îskenderun	Îskenderun	6.5	0.65	n.d.	234	n.d.	Girşê dar
Mizgeftâ Habîbî Necar	Antakya	8.5	1.1	Sêmilî	374	n.d.	Qentera û kubê kûç
Mizgefta Sarimîye	Antakya	4.85	0.55	n.d.	99	n.d.	Girşê dar
Mizgefta Şêx Alî	Antakya	7.8	1	Dimilî	363	n.d.	Qentera û kubê kûç
Mizgeftâ Kurşunlu Xan	Antakya	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Qentera û kubê kûç
Mizgeftâ Enverûl Hamit	Merkez	8.2	1	Yekmilî	645	Betonarme girş û ban	Betonarme qelas û ban
Mizgeftâ Axcabey	Bahce	4.6	0.9	Yekmilî	551	n.d.	Girşê dar
Mizgeftâ Ala	Kadirli	7.4	1	Dimilî	640	n.d.	Qentera kûç
Mizgeftâ Hamîdîye	Kadirli	6.75	1	n.d.	121.5	n.d.	Qentera û kubê kûç
Avahiya Şaredariya Bajarê Mezin a Hatayê	Antakya	9.5	0.6	Dimilî	325	Betonarme qelas û ban	Betonarme qelas û ban
Dibistana Seretayî yâ Mithatpaşa	Îskenderun	4.2	0.4	Dimilî	200	Qentere	Girşê dar
Dibistana Seretayî yâ Yedî Ocakê	Merkez	4.6	0.8	Yekmilî	858	Betonarme qelas û ban	Betonarme qelas û ban
Lîseya Antakyayê	Antakya	n.d.	n.d.	Dimilî	n.d.	Betonarme qelas û ban	Betonarme qelas û ban
Lîseya Îskenderunê	Îskenderun	n.d.	n.d.	Dimilî	n.d.	n.d.	Qelâsa dar û hêsin
Mûzexanâ Olîvê	Altinozu	5.25	0.6	Dimilî	88	n.d.	Qentera kûç
Galî Mansion-I	Antakya	4.35	0.3	Dimilî	82	n.d.	Girşê dar

Galî Mansion-II	Antakya	4.35	0.6	Yekmilî	70	Girşê dar	Girşê dar
Malâ Gastronomî yâ Xidirbey	Samandag	n.d.	n.d.	Dimilî	n.d.	Girşê dar	Girşê dar
Malâ Rekem 2 yâ Vakifli	Samandag	5.5	0.5	Sêmilî	123.5	Girşê dar	Girşê dar
Dibistana Kevnâre yâ Îngîlîzî	Samandag	11.5	0.4	Dimilî	150	Girşê dar	Girşê dar

XETEREYÊN JIBER ENCAMA RUNIŞTINA ERDÊ

Kîlîsa Ermenî Ya Surp Karasun Manuk

Jiber encema runiştinên zemînêde didu kelş xuya kirine û ev kelşan paralelê dîwarin. Li dîwar xwede jî hinek kelşên biçuk çêbune. Vekî vênêyêde xûyaye kenterekek hatîye resore kirin û ev kentere li erdhêjêde kelş ketinê. Em difikirinkû ev rûniştina he ji berê de heye û buye sebabe kelşên li dîwar de çêbu.



Vêne 2. Diwarê mezin yê kîlîsê

RESTORASYONA NE Lİ GORÎ ÂVÂHÎYÊ

Şaredarîya kevin ya Antakya yê

Vekê vêneyêde jî diyare sê alîyên avahîyê hatiye restorekirin u çerçevekê ya betonarme hatiyê lê zêdekirin ku dîwara bigiri. Lê belê erhêjê de vekî dîyare kû ev çerçeva he li dîwarî ketî u dîwar jî xirakirîye. Dibe ku bingehek baş ji vê çerçeva he re nehatibi çêkirin. Wekî me dîtî giradana çerçeveyê bi avahîre jî gelek zeyife. Jibona restorasyonek bi kuvet divê ku ev çerçeveyên biavahîe baş hatibûna girêdan û esasek baş jêre hatibuna çêkirin.

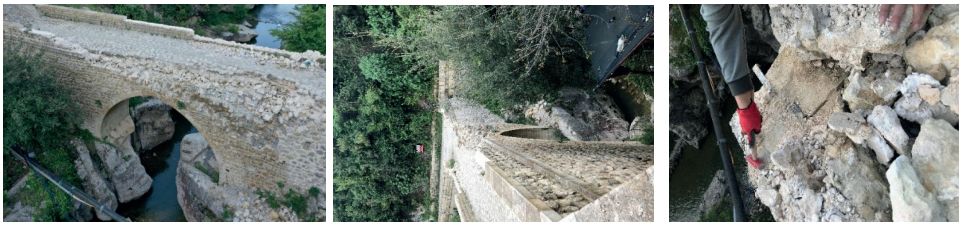


Vêne 3. Şaredarîya kevin ya Antakya yê

Pirâ Batiayaz

Ev pirahejî sala 2015 yande hatîye restorekirin. Lê belê erdhêjê de ev dera hatî restorekirin û dîwarên nûçêkirî xwe jî avahîya kevin berdaye. Dîyarekû malzemên hatin şixulandin ne wek malzemên pirê yê orijinalin.





Vêne 4. Pira Batiayaz

Kîlîsa Sûryani Katolik

Jibo vê kîlîsa asan bikin çerçeveyekê betonarme jêre hatîye çêkirin. Vekê tê dîtin ev çerçeve tevahî hilveşîyaye û hinek kuç û ber ji xweve birine.

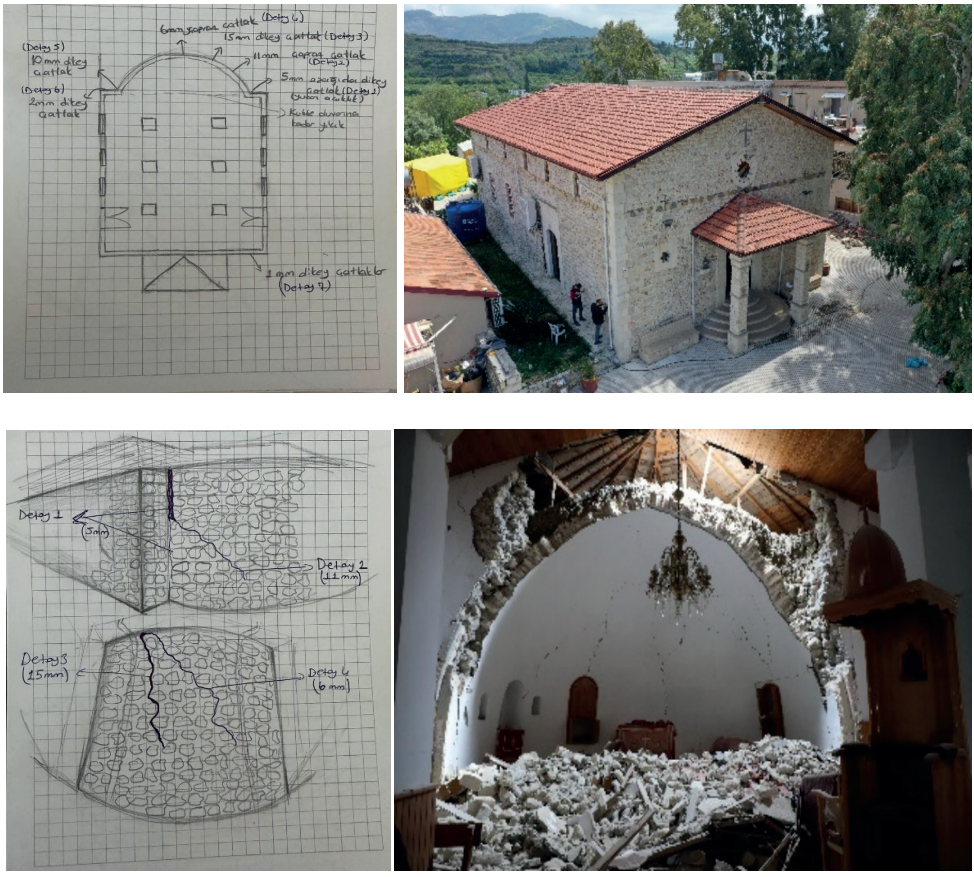


Vêne 5. Kilîsa Sûryanî Katolîk (Kedîm)

XETEREYÊN JIBER SERBANÊ ZEYÎF Û HEWGIRÊDANA ZEYÎF

Kîlîsa St. İlyas

Kubbeya li pêşîya kîlîsêde hilweîyayê lê belê xetereyek mezin ya gelenperî ne çêbûye, Vêne 5. Sedemî mezin ya hilweşîna vê beşê ewe kû serbaneken dîwarên vê beşê êkiduve girêbidi nîne, Vêne 6.

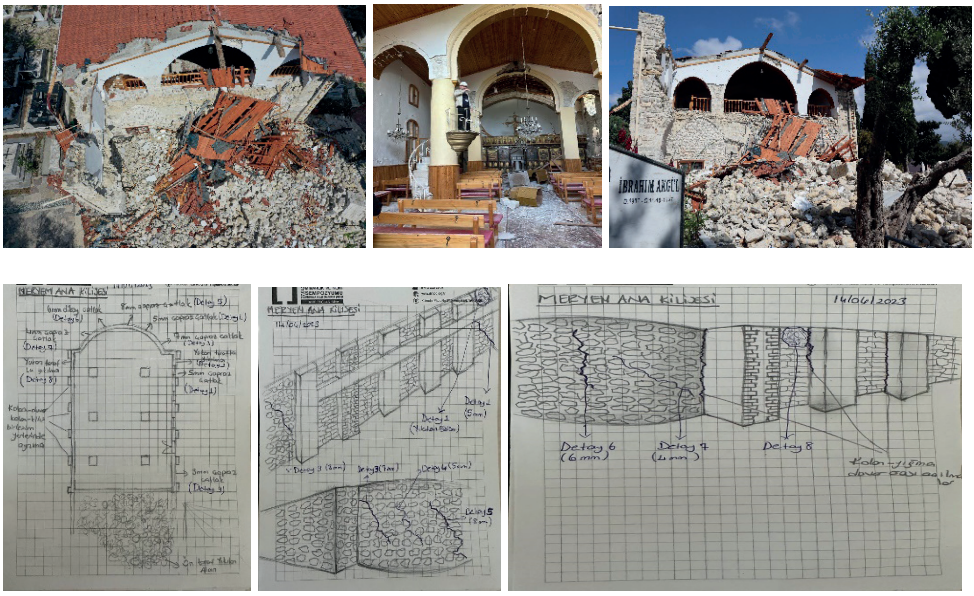


Vêne 6. Kîlîsa St. İlyas

NEBAŞ LÊKİRİNA DÎWARAN Û SERBANÊN NE ÂSÂN

Kîlîsa Dayîka Meryem

Rojavayê kîlîsê bi tevahî hilveşîyaye. Hatîye xuyakirin ku ev beşa hatîye restorekirin. Li seba hilweşandina dîwaren ne asanîyâ serbanîye. Serban bi asanî dîwaran we nehatîye girêdan, Vêne 7.



Vêne 7. Kilîsa Dayîka Meryem-Samandax

Xanîyê Vakifli 2

Xanîyên Gundê li Vakifli û Kapisuyu (40-50 Xanîyên mînak), dîwarên lêkirina wan ne başbune piranî qulubandine. Serban ne asanin û xercên wan jî teqezin kû ev rewşê xiraptir dike. Wekî tê ditin dîwara dirêj werimîye li jiber ku jûr û jir ve qerîsîye ne hilweşîyâye. Dîwarên herdu alîyen kurt hilweşîyane. Xuyaye kû ew dîwar di jur ve nehatîye girêdan, Vêne 8.



Vêne 8. Vakifli 2

XETEREYÊN Dİ ENCAMÂ DÎWARÊN DİRÊJ

Kîlîsa Latîn Katolik

Wekû wêavahî de jî xuyaye dîwarên dirêj erdhêjêre zeyif û hinek duvar pêwistin ku alîkarî ji wan dîwaranre bikin, Vêne 9.



Vêne 9. Kîlîsa Latîn Katolik-İskenderun

Dibistanâ Mîthet Paşa

Lê zêdekirina çerçeveyên betonarme bûne sebebê hilweşandina dîwarên dirêj yên zemînê de, Vêne 10.



Vêne 10. Dibîstana Mithat Paşa-Îskenderûn

Kîlîsa St. Nikola

Dîwarên dirêj, stûnên bilind, û walehîyên mezin yêli sîstema avahîyê de dibe sedema tolazbîna avahîyê dijberî barên erdhêjê û dibin sedêmin hilweşandina avahîyê, Vêne 11.



Vêne 11. Kîlîsa St. Nikola

BANDORA XERCÊ AX Û HERÎ

Dibistânâ Yedîocak

Vê dibistanê xercê herî û ax hatîye bikaranîn û jiber vê kasê jî kûç û berên vên xwe berdane, Vêne 12.



Vêne 12. Dibîstana Yedîocak

AVAHÎYÊN METRUKE Û KELŞÊN VALEBÎYİ

Qesrâ Katonî

Ev qesr demekek dirêje nayê bikaranîn, her çikas dîwar zêdejî bin, qelşên mezin ketine dîwaran. Walabîna avahî buye sebep kû bimine bin bandora şartên gîran yê hewayê de. Ev tişt jî bîye sedêmên zeyifbuna xercên wê kû dîwar jî pêve zeyif dibin, Vêne 13.



Vêne 13. Qesra Katonî

Bedirhangolu

XETEREYÊN JİBER HİLWEŞANDİNA MÎNARA

Hinek mizgeft hilweşandina mînareyên wan bune sebeba xetereyan. Me behsâ hinek ji wan li vê nivîsê de kirîye.

Mizgefta Envarül Hamîd

Wekî tê dîtin jî mînara vê mizgeftê hilweşîyaye li ser sebane mizgeftê yê betonarme û xetereyek mezin daye serban lî tevahî ne hilveşîyaye û serban mizgeft parastîye, Vêne 14.



Vêne 14. Mizgefta Enverûl Hamîd

Mizgefta Ağcabey

Vê mizgeftê jî weku tê dîtin hinek ber ji ji jûra mizgeftê ketîye xarî û sebanê mizgeftê şkênandîye. Ji berku serban ji dara hatîye çêkirin nekarî xwe li ber kûçên ji mînarê ketî ye xarê bigire, Vêne 15.



Vêne 15. Mizgefta Agcabey

5. Encam

Di encamên lêkolînên li ser avahîyên erdhêja 2023 yân de hilveşayî hân jî xeterên mezin dîtîn li jêr xal bi xal hatîye nivîsandin:

- Kêmasîya herî mezin ku buye sebeba hilweşandinê kêmasîya serbanên ne qerrisî ne.
- Xetereyâ herî mezin li dîwarande hatîye dîtin lêkirina ne diruste.
- Xerca zeyîf kels ya diwarên karpîç û hinek dîwar jî pê xercên herî hatine çêkirin.
- Hat dîtin ku lêkirina diwarên kuç û berde taybetî xerca çikane gelek hindike û ev yek buye sebaba hilweşandina wan dîwaran.
- Yek sedêmin hilwaşindinê jî kêmasîya dîwaran taybeti yek aliyêkêde. Ev yek dibi sebeba zeyifbuna avahîyê li yek alide.
- Çêkirina gelek avahîyande bandora erdhêjê ne danîne berçawân û ji ber vêkasêji avahî di her du alîyande ne wek êkidûna û em dibînî ku alîyêkê de gelek zeyîf hatine çêkirin.

Di encamde jibo avahîyên erdhêjêre sağlem em dikarin wa pêşnîyara bikin:

- Avahîyên masonî hatî çêkirin lazime serbanên qerrisî ji wanre bên çêkirin.
- Xercên van avahîya divê xercên sağlemtirre bên gihortin.
- Hijmarâ dîwarân divê bên zêdekirin.
- Sağlambuna avahîyê dijberî erdhêjêde di her du alîyâve divê vek êkidube.
- Jibo avahîyên gunda bên çikirinre qaîdeyên âsan divê bê âmedekirin.
- Divê ku dîwar ne qulubin heta kû erdhêj xilas dibe û jiber vêkasêjî dîwar pêşberî qulubandinê re bên sağlemkirin.

Çavkanî (10 Pûnto)

Bedirhanoğlu, İ. (2023). Nirxnandina pêşîn ya depremên Kahramanmaraş pazarcık û Elbistanê. Zanîngeha Dicleyê, Beşa Endazyarîya Avahîyan, Tebbax.

Bozyiğit, B., Özdemir, A., Kokcan, D., Dalgiç, K.D., Durgut, E., Yeşilyurt, C., Dizgin, Y., Yıldeniz, C., İspir, M., Bedirhanoglu, İ., Aktaş, Y.D. û Açıkgöz, S. 2024, bend: 40, hijmar: 3.

SEISMIC EVALUATION OF HISTORICAL STONE MASONRY MOSQUE IN SOUTHEAST TURKEY

AROVA KONAK[1], IDRIS BEDIRHANOGLU[2], SINAN ACIKGOZ[3]

[1]PHD'STUDENT, DICLE UNIVERSITY, ARWA.GALOU@GMAIL.COM
[2]PROF.DR., IDRIS BEDIRHANOGLU, DICLE UNIVERSITY (VISTING ACADAMIC AT UNIVERSITY OF OXFORD), IDRIS.BEDIRHANOGLU@ENG.OX.AC.UK
[3]Assoc. Prof., University of Oxford, sinan.acikgoz@eng.ox.ac.uk

ABSTRACT

Turkey is a country with a rich historical built environment. However, much of Turkey is located in areas of high seismic activity, which poses a significant threat to its cultural heritage structures. Preserving these structures and safeguarding them for future generations must be a top priority. Recent earthquakes in eastern Turkey have caused substantial damage to many historical buildings. Therefore, research focused on understanding the behavior, structural performance, material characteristics, and retrofitting techniques for these buildings is crucial for safeguarding these buildings. This study evaluates the structural behavior of the Alaüddevle Mosque, located in the Gaziantep province of southeast Turkey, following the Kahramanmaraş earthquake sequence on February 6th, 2023. Overall geometry of the mosque and the damage it sustained is examined using point cloud data while non-destructive tests are conducted on cored stone samples from the mosque to characterise its materials. The mosque's performance was then analyzed under both vertical loads and lateral earthquake loads using linear analysis. The material tests revealed that the stones have low compressive strength, while the analysis indicate that the shear strength capacity of the material was likely reached in certain areas during the earthquakes.

KEYWORDS: Alaüddevle Mosque, Historical Mosque, Kahramanmaraş earthquake, Seismic Evaluation, Stone Masonry.

1. INTRODUCTION

Earthquakes are one of, if not the main, factor threat to historical heritage in Turkey. The risks are particularly significant for 19th century structures in seismic regions. These structures may have vulnerabilities which have not yet been exposed by major earthquakes, which occur once every hundred or two hundred years. The 2023 Kahramanmaraş earthquakes revealed the vulnerability of our historical 19th century building stock in the southeast of Turkey. Given this situation, studies on the seismic behavior and retrofitting of historical structures are essential. However, research on historical buildings in the region remains limited. Amongst the studies identified, Ural and Çelik (2021) [1] examined the damage and faulty restoration practices at the Tahtani Mosque in Nizip, Gaziantep province. A finite element model of the mosque was developed, incorporating the observed damage, and recommendations were made for its restoration based on the analysis results. In the present study, the Alaüddevle Mosque, is investigated. This iconic mosque, located in the Gaziantep province, sustained damage during the 2023 Kahramanmaraş earthquakes. The mosque is notable for its high walls and large dome. Its material properties had not been investigated before and are assessed using non-destructive (via ultrasonic pulse velocity) and destructive (e.g. compressive strength) tests on cored samples. Seismic analysis was performed using a linear finite element model, in accordance with the Earthquake Risk Management Guide for Historic Buildings (ERMGHB 2018) [2] regulations.

2. HISTORY OF ALAÜDDEVLE MOSQUE

According to the foundation charter dated 1500, the mosque was originally built by Alaüddevle (1479-1515), son of Süleyman Bey from the Dulkadiroğulları Principality. Since the endowment was issued after the mosque's construction, it is likely that the building was completed in 1499, just before 1500. As the original mosque had become too small for the growing community and deteriorated, it was demolished in 1898, and construction of the current mosque commenced (Altın, 2016, p. 652). The mosque's architecture was designed by the Armenian master architect Ermenak, with the foreman was Kirkor, who also constructed the Great Church in Gaziantep. The mosque was built up to the dome level but construction had to be stopped due to financial issues. Assistance was then sought from Abdulhamid II, and with his support, the dome was completed. According to an inscription, the

mosque was finished and opened for worship in 1903. The only remaining part of the original mosque is the minaret located at the northeast corner of the current structure [3]. Figure 1 shows images of the mosque in the past and present.



(a) An old image, date uncertain[3]



(b) A contemporary image

Figure 1: Alaüddevle Mosque

3. STRUCTURAL FEATURES

The external walls of the Alaüddevle Mosque reach approximately 10 meters in height. The prayer hall has a total height of approximately 20 meters to the top of the 14.55m diameter lead covered dome. The building has an almost square plan, 17.85m wide in the x-direction (aligned approximately to the East) and 18.10m in the y-direction (aligned approximately to the north). A plan view of the prayer hall is provided in Figure 2, where the entrance door can be located on the north façade.

The mosque features complex transitional elements between the dome and the square base. The dome rests on a drum visible from the exterior (see Figure 1b). Half of the windows on the drum are blind. The drum transmits the loads onto an intermediate hexagonal base, composed of eight pointed arches, via pendentives. Then, along the central x and y axes, the arches extend towards downwards and towards the exterior walls as pointed barrel vaults, while along the diagonal, the arches transmit the loads onto semi-domes, which transmit the loads onto two orthogonal pointed barrel vaults. Pillars support the vaults and transmit the loads to the foundations.

It is noteworthy that, the pillars divide the wall space into three sections internally, with each section in the form of large and deep niches shaped like iwans. The exterior walls visible inside the niches feature round arched windows. The central niches are wider and taller than those on the sides. Due to the presence of the mihrab on the northern facade and the entrance doors on the southern facade, the central niches on these sides are less pronounced. Additionally, there are small doors on both sides of the main entrance door (see Figure 3b), leading up to an internal balcony space.

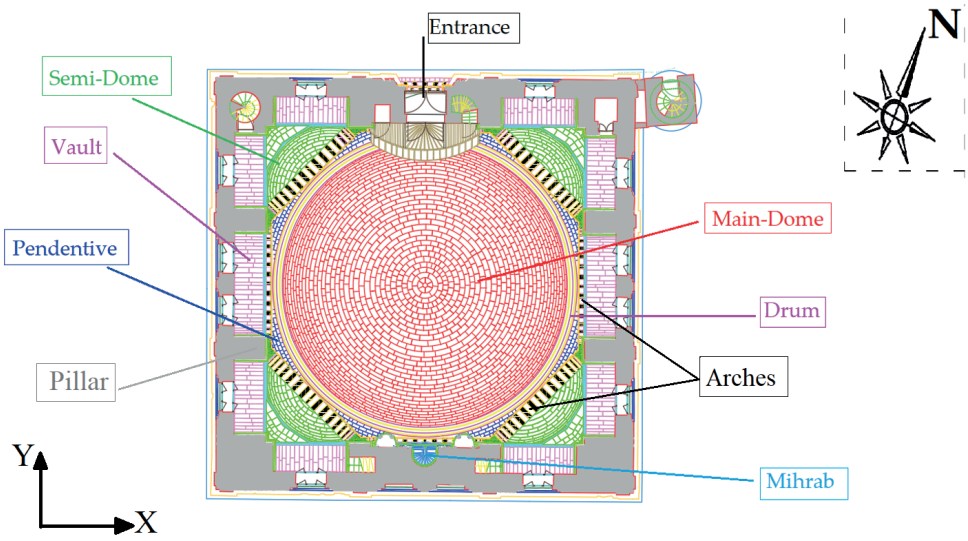


Figure 2: Plan view of the main structural sections of the Mosque

4. EXISTING DAMAGE

The damage to the mosque complex was assessed after the earthquakes. The finial (alem) of the minaret had fallen, and vertical cracks were observed along the main body of the minaret (Figure 3a). To prevent further movement between the voussoirs, the minaret walls were laterally confined with metal rings. Additionally, meriodinal cracks were observed in the dome and semi-domes as result of accessive radial stress. The observed damage is highligted in the photographs presented in Figure 3.



(a) In the minaret

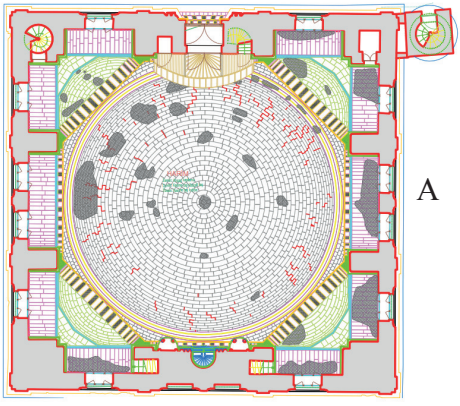


(b) In the dome

Figure 3: Photographs of damage

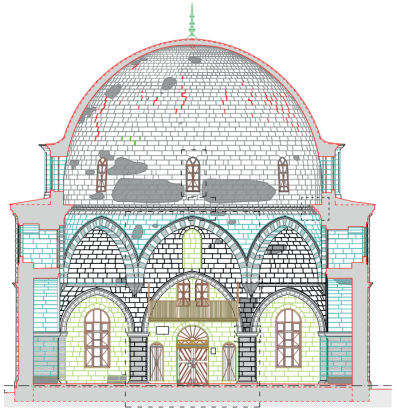
The 3D geometry of the mosque was documented with point cloud data using terrestrial laser scanning. 2D cross section drawings in Figure 4 were generated using this data. Figure 4 also marks the location of the observed damage on the drawings. Here, red lines represent cracks while the grey patched indicate discolouration in the stone.

A



A

(a) Plan view at 1.80m elevation

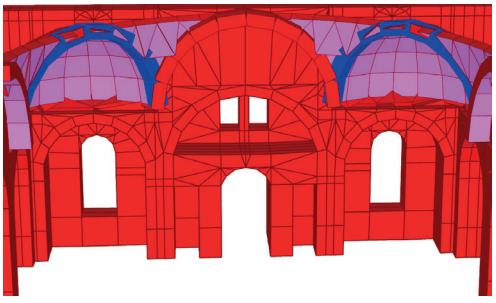


(b) Elevation view across section A-A

Figure 4: Cross-section drawings of the Mosque

5. FINITE ELEMENT MODELING AND MATERIAL PROPERTIES

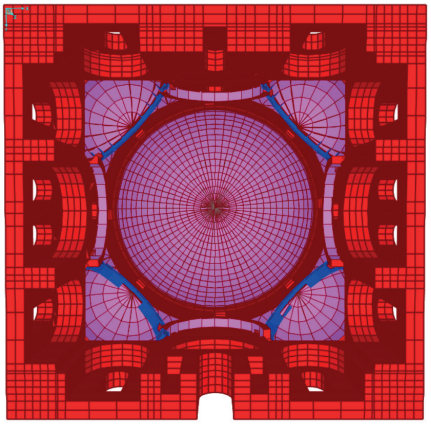
A finite element (FE) model of the structure was created using SAP2000 v24 [4] software. A macro modeling approach was followed in the analysis. In this approach, the masonry units and mortar are treated as a homogenous continuous solid. The structural geometry was modeled using a combination of shell, solid, and frame (the edges of semi domes considered as frame blue line in figure 5 elements. The walls, vaults and drum were modeled using solid elements. The dome, the semi-domes and the pendentives have been modeled by using shell elements placed at cross-section centrelines. The final mesh (shown from different views in Figures 5a, c and e) featured a total of 9556 solid and 1638 shell elements. The spaces above the pointed barrel vaults and the semi-domes are left empty, although granular infill material may have been present in this area.



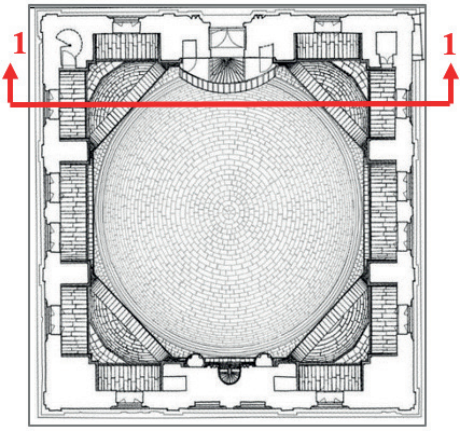
(a) Elevation view of the FE model north façade section 1-1



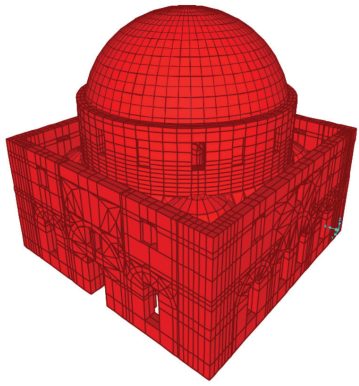
(b) Photograph of the north facade



(c) Plan view of the FE model from ground level



(d) plan view of the drawing from ground level



(e) Perspective view of the model exterior

Figure 5: Finite element model

6. MATERIAL CHARACTERIZATION

Visual examination suggests that three types of stones were used in the construction of the mosque: limestone, marble and basalt. The majority of the structural components (including the domes, drum, vaults, and the largest part of the walls) appear to be constructed of limestone. Internal pillars appear to be constructed of basalt, while alternating basalt and marble are used in the mosque. Marble is also present in decorative elements (such as column capitals). Non-destructive ultrasonic pulse velocity measurements were used to characterise the elastic properties of stones sampled from different parts of the building.

Table 1 presents the measurements conducted on the exterior faces of the four façades and Table 2 on the interior faces. For each measurement, the type of stone (visually identified) and the measured velocity is reported. Where v_s is the Poisson's ratio for the stone Density (ρ_s) is estimated from velocity using Equlation 1 (following [5,6]) whilst dynamic (E_{dyn}) and Static (E_{sta}) elastic moduli are calculated using Equations 2 [7] and 3 [8-9].

$$\rho_s = 230 V_P^{0.25} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1)$$

$$E_{dyn} = \frac{V_P^2 \rho_S \, (1+v_s)\,(1-2v_s)}{(1-v_s)10^6} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

$$E_{sta} = 0.74 E_{dyn} - 820 \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

Table 1: Measurements taken from outside and inside the mosque

Measurements taken from outside the mosque						
NO	Name	UPV(V_P) (m/s)	Stone type	ρ_s (kg/m^3)	E_{dyn} (MPa)	E_{sta} (MPa)
1	A UPV1	2188	Limestone	1573	6778	4195
2	A UPV2	4651	Basalt	1899	36979	26544
3	A UPV3	5882	Marble	2014	62719	45592
4	A UPV4	3745	Basalt	1799	22711	15986
5	A UPV5	4926	Basalt	1927	40281	30320
6	A UPV6	4255	Limestone	1858	30269	21579

Table 2 : Measurements taken from inside the mosque

Measurements taken from inside the mosque						
NO	Name	UPV (V_P) (m/s)	Stone type	ρ_s (kg/m^3)	E_{dyn} (Mpa)	E_{sta} (Mpa)
7	A UPV7	2618	limestone	1645	10149	6690
8	A UPV8	6289	basalt	2048	72909	53132
9	A UPV10	4831	basalt	1918	40277	28985
10	A UPV11	4831	basalt	1918	40277	28985
11	A UPV12	3236	limestone	1735	16349	11278
12	A UPV13	4902	basalt	1925	41621	29979
13	A UPV14	2174	limestone	1571	6680	4124

Generally, smaller velocities were measured for limestones when compared to basalt and marble. A noteworthy variation was observed in limestone moduli; values ranged from 4124 to 21579 MPa. Although deterioration due to water ingress was observed for some stones on the façade exterior, the low elastic moduli are also observed in the interior. Therefore, the variance in elastic moduli cannot be entirely attributed to deterioration.

The mechanical properties of the homogenized masonry material, such as elasticity modulus, compression, tensile, and shear strength, are required for structural analyses and assessments. These properties were estimated by considering recommended properties for cut stone masonry in the regulation ERMGHB 2018 (Earthquake Risk Management Guide for Historic Buildings). Accordingly, the elastic modulus is considered as 1650 MPa, the compressive strength is taken 1.5 MPa, and the cohesion is 0.066 MPa. The range of recommended material strengths are given in Table 3. However, The main point of carrying out nondestructive tests is to understand the general quality of stones used in different locations in the mosque.

Table 3 : Recommended mechanical properties for the homogenized masonrywall according to ERMGBH 2018 guidelines

Wall Type	Compressive Strength f_m(MPa)	Cohesion τ_0 (kPa)	Elasticity modulus, E (MPa)	Shear modulus, G (MPa)	Unit volume weight (kN/m^3)
Cut stone wall with good connections	1.5~2.0	56~74	1500~1980	250~330	21

The shear strength is calculated by using equation (4). Where is shear strength, is initial shear strength and is axial stress.

$$\tau = \tau_0 - 0.4\sigma \tag{4}$$

7. SOIL CLASSIFICATION

The results of the borehole investigations and ground wave propagation measurements characterise the local soil class as “Zc” according to the Turkish Earthquake code[11]. The soil type of Zc refers to very dense layers of sand, gravel, and hard clay or weathered, highly fractured weak rocks. The idealized soil profile was determined from drilling logs, field tests, and laboratory tests, and indicates a limestone foundation. On the basis of these observations, it has been judged that the compressive strengths at the base of the structure should not exceed 0.4 MPa in loading situations involving static and earthquake effects, and this value has been accepted as the foundation-bearing capacity design strength to be used in static calculations.[10]

8. PERFORMANCE TARGETS:

ERMGHB 2018 guidance was followed to set performance targets. The building was classified as a "historical building of national importance". This sets the required performance level as Performance Level 1 " Near Collapse " under the influence of an "earthquake with a return period of 2475 years", Performance Level 2 " Significant Damage " for a 475 years earthquake and Performance Level 3 "Damage Limitation" for a 72 year earthquake.

Accordingly, for the (Performance Level 1), the structure was evaluated under vertical loads and reduced earthquake effects (by factor of R which recommended as 2), and it was checked whether the calculated stresses exceed 1.5 times the adopted material strength . Additionally, a check was conducted to see if the maximum drift ratio exceeds 1%. For the (Performance Level 2), the structure was evaluated under vertical load and reduced earthquake effects (by factor of R which recommended as 2) and it was checked whether the stresses exceeded the strength. For this damage level, the allowable drift is set as 0.7%. For (Performance Level 3), the structure was evaluated under vertical and unfactored earthquake loads and stresses were compared to strengths. For this damage level, the drift ratio limit was set to 0.3%. In the calculations, the load-bearing system behavior coefficient R taken as 2 as reccomended by code. Wher performance Prevention of Collapse

9. EARTHQUAKE LOAD

The earthquake load combination given by guidelines [11] is used in the analyses. Results of the following load combination Equ(5) will be presented in this study.DD is dead load, LL is live load, while EX and EY are earthquake loads in the X and Y directions respectively.

COMBO: 1.0 DD + 1.0 L± 0.3 EX ± 1.0 EY (5)

Where the effect of the earthquake is taken entirely from the X direction and 30% from the Y direction. Figure 6 shows the relevant elastic design spectra obtained for Zc soil class for earthquakes with return periods of 72 years(DD3), 475 years(DD2), and 2475(DD1) years.

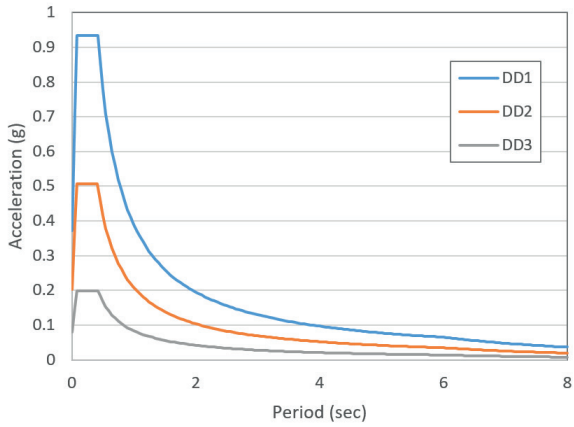
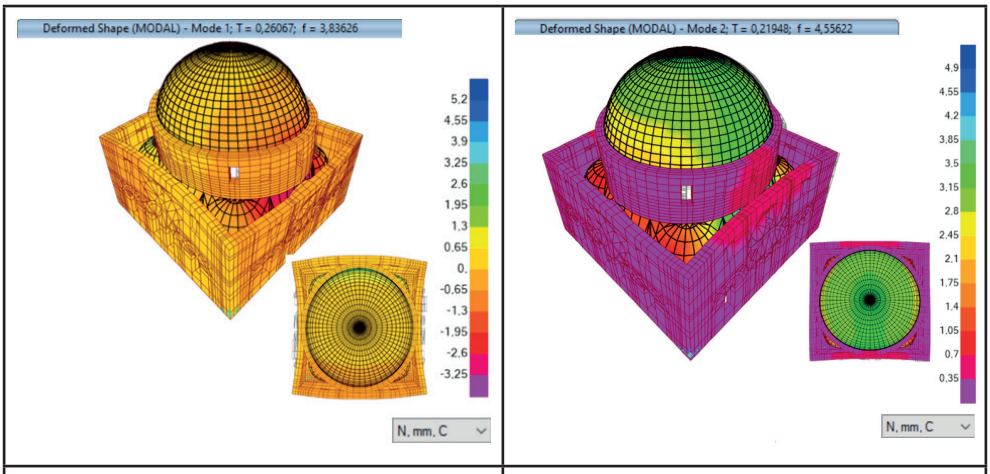


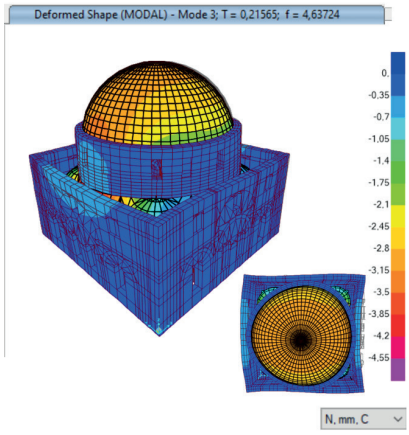
Figure 6: Earthquake data (Horizontal Elastic Acceleration Spectrum)

10. RESULTS

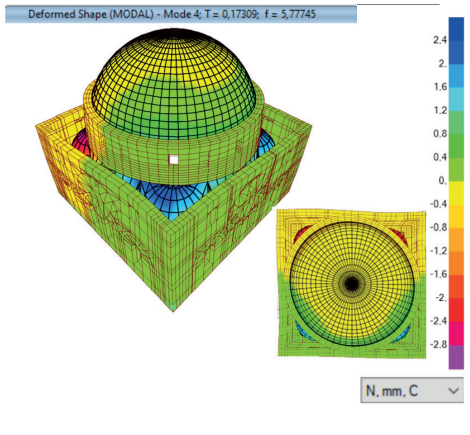
Modal analysis was performed and a mass participation ratio 95% was achieved with 385 modes. First four mode shapes of the structure are presented in Figure 7, showing the movement of the exterior walls of the mosque. The first, second , third, and fourth periods are 0.26, 0.219, 0.216, and 0.173 seconds respectively.



(a) 1st Mode period at *0.261* s	*(b) 2 .Mod period =0.219 S*



(c)3 .Mod period =0.216 S

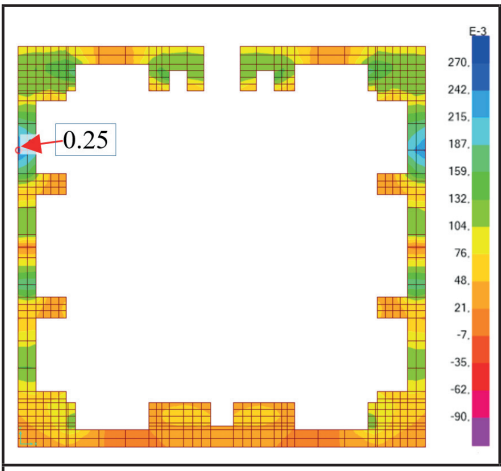


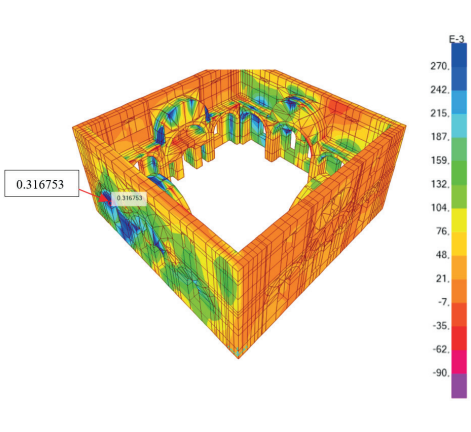
(d) 4 .Mod period =0.173 S

Figure 7: Mod shapes of mosque

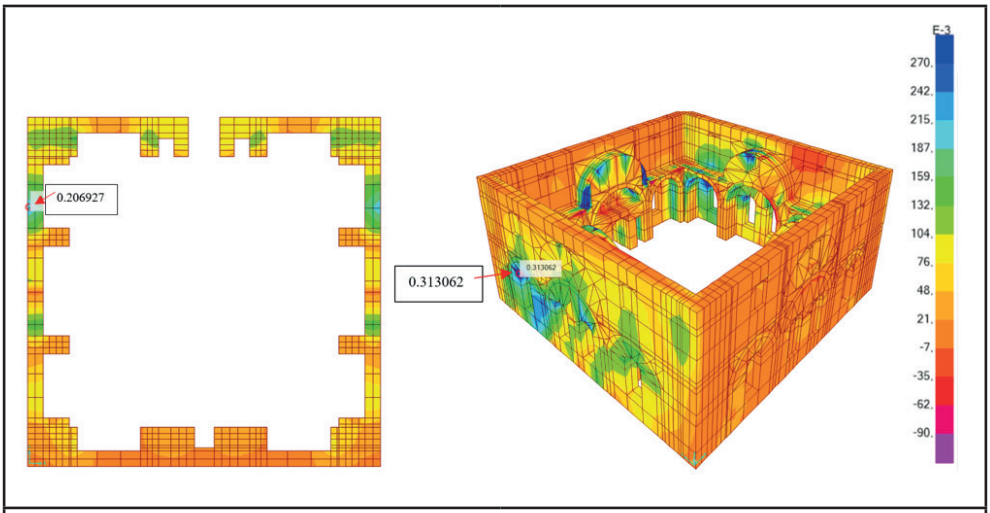
10.1. Shear Stress Distribution

Shear stress distribution calculated from finite element analysis is presented in Figures 8 and 9. Shear capacity values are also given in these figures. Blue values show the area where shear force capacity is reached. Most of the shear stress exceedances are occurred at door and window openings, while there is no exceedance in the dome.



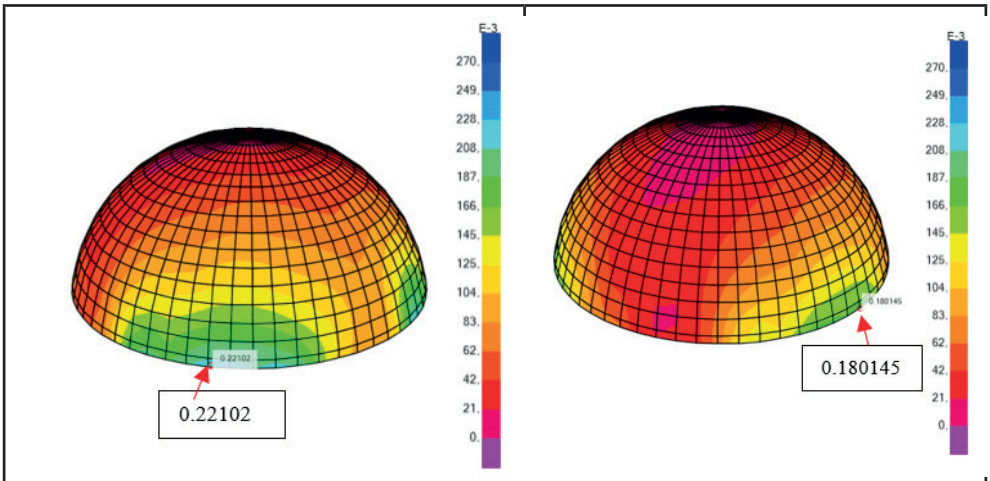


(a). Reduced earthquake loads (DD2) - Performance Level2: "Significant Damage"



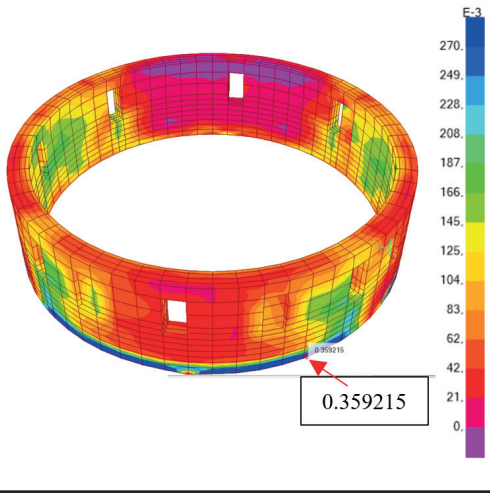
(b). Unreduced earthquake loads (DD3) - Performance Level3: "Damage Limitation"

Figure 8: Shear stress distribution for walls and arches under vertical and earthquake loads (Shear stress capacity =0.27 MPa)

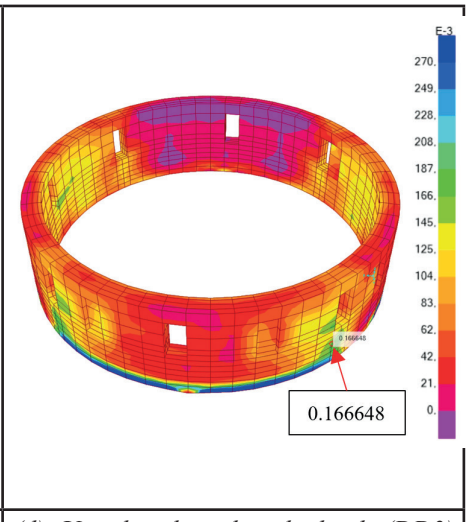


(a). Reduced earthquake loads (DD2) - Performance Level2: "Significant Damage"

(b). Unreduced earthquake loads (DD3) – Performance Level3 "Damage Limitation"



(c). Reduced earthquake loads (DD2) - Performance Level2: "Significant Damage"



(d). Unreduced earthquake loads (DD3) - Performance Level3 "Damage Limitation"

Figure 9: Shear stress distribution for dome and drum under vertical and earthquake loads (Shear stress capacity =0.27 MPa)

10.2. Tensile Stress Distribution on The Dome

In maraaş earthquakes, the meridional cracks were observed in the dome as a result of accessive radial stress. Figure 10 presents cracks observed on the dome. However, The tensile stresses appear in analysis on the dom. Figure 11 shows the tensile stress on the dom in combination earthquake loads DD2. The blue color shows values of tensile stress. However, the other colors show compression stresses.

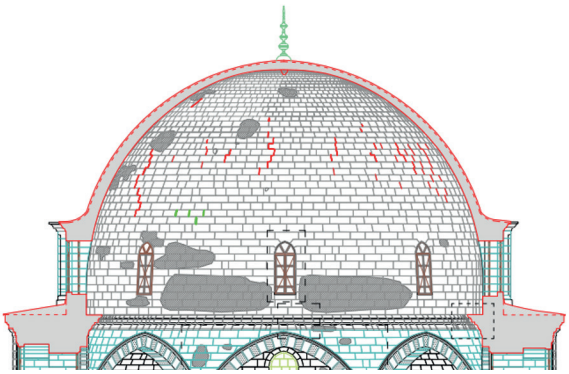


Figure 10: cracks in the dome

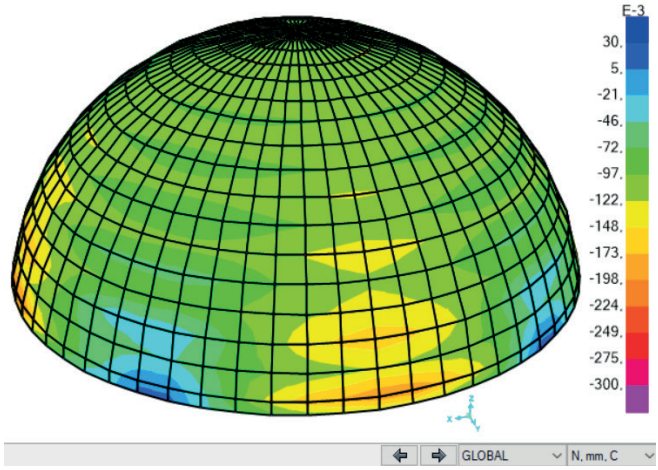
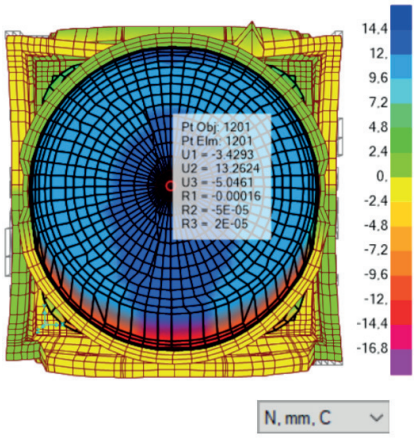


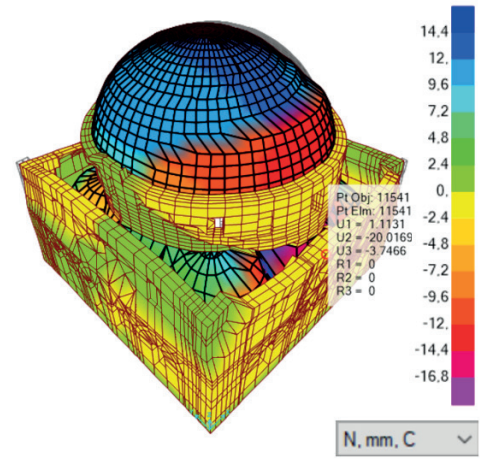
Figure 11: Tensile stress distribution for dome for cases reduced earthquake loads (DD2)

10.3. Drift Evaluation

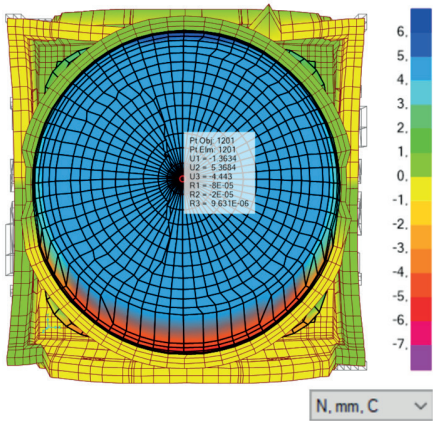
The drift rate limit value under unreduced earthquake effects is 0.7% for DD2 (earthquake load) and 0.3% for DD3(earthquake load). Figure 12 shows displacements in the top of the dome and wall under DD2 and DD3 earthquakes. The height of the mosque is 19,67 m and the height of the wall is 9.95 m. Drift values are also given in Figure 12.



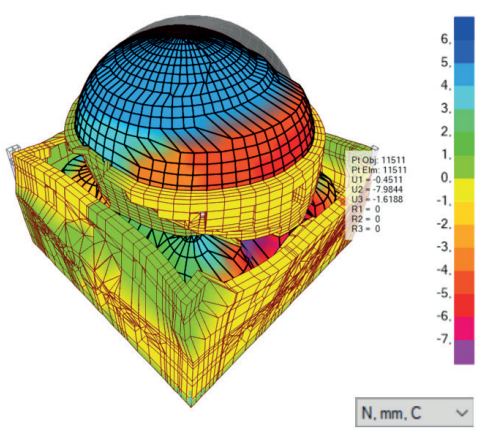
(a) Maximum drift at the top of the dome for DD2 is 0,067%



(b) Maximum drift at the top of the wall for DD2 is 0,2%



(c) Maximum drift at the top of the dome for DD3 is 0.027%.



(d) Maximum drift at the top of the wall for DD3 is 0.08%.

Figure 12: Drift under the influence of earthquakes DD2 and DD3

11. CONCLUSIONS

In this study, the seismic behavior of the Alaüddevle Mosque, one of the most important historical buildings of Gaziantep province in southeast Turkey, is evaluated using linear finite element analysis.

The drift ratio of the walls and dome in cases of DD2 and DD3 design earthquakes did not exceed the limit. However, the following two facts make the structure vulnerable in earthquakes: 1- shear stresses in some critical points are high. 2- Although there are no observed compression failures, the strength of some stones in local points is low and near to critical value particularly at the lower elevations of the main load-bearing walls. We can state that considering the exceedance of strength some strengthening interventions may be necessary around façade openings.

Excessive tensile stress caused fine crakes in the main dom in the recent devastating Kahraman Maraaş earthquake. So the dome needs to be supported in circumference to limit radial crack.

References

[1] Ural, A., Çelik,T (2021). Gaziantep Nizip Tahtani (Leylek) Cami Yapisal Analiz Ve Değerlendirmesi ,Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 26, Sayı 1, 2021. DOI:10.17482/uumfd.821991

[2]General Directorate of Foundations. (2017). (ERMGHB) "Earthquake Risk Management Guide for Historical Buildings".

[3] Demir İnş. Alt Yapı San. Tic. Ltd. Şti. (2023). Alaüddevle Mosque Surveying Report. Ministry of Culture and Tourism, General Directorate Of Foundations.

[4] SAP2000 (Version 22.2.0) [Computer Software]. Integrated software for structural analysis and design program, Computers and Structures Inc., Berkeley, California.

[5]Gardner G, Gardner L and Gregory A (1974) Formation velocity and density—The diagnostic basics for stratigraphic traps. Geophysics 39(6): 770–780.

[6] Günaydin M, Genç AF, Altunışık AC, Haciefendioğlu K, Okur FY, Okur E and Adanur S (2022)Structural condition assessment of a historical masonry school building using experimental and numerical methods. Journal of Civil Structural Health Monitoring 12(5): 1083–1113

[7] Marazzani J, Cavalagli N and Gusella V (2021) Elastic properties estimation of masonry walls through the propagation of elastic waves: An experimental investigation. Applied Sciences 11(19): 9091.

[8] Eissa EA and Kazi A (1988) Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 25(6): 479–482.

[9] Gonen S and Soyoz S (2021) Investigations on the elasticity modulus of stone masonry. Structures 30: 378–389.

[10] Keskin, M.S. (2024) Geotechnical Report of Alaüddevle Mosque. Dicle University Faculty of Engineering. Civil Eng.

[11] Turkish Building Earthquake Code (TBEC2018). Disaster and Emergency Management Presidency; T.C. Resmi Gazete; TBEC: Ankara, Turkey, 2018.

EXPLORING THE COLLAPSE MECHANISM OF UNREINFORCED MASONRY BUILDINGS VIA DISCONTINUUM-BASED ANALYSIS

Andrei FARCASIU[1], Peter GRIESBACH[2], Rhea WILSON[3], Sinan ACIKGOZ[4], Bora PULATSU[5]

[1]Research Assistant, Carleton University, andreifarcasiu@cmail.carleton.ca
[2]Research Assistant, Carleton University, petergriesbach@cmail.carleton.ca
[3]Research Assistant, Carleton University, rheaswilson@cmail.carleton.ca
[4]Associate Professor, University of Oxford, sinan.acikgoz@eng.ox.ac.uk
[5]Assistant Professor, Carleton University, bora.pulatsu@carleton.ca

Abstract

Post-earthquake investigations show that unreinforced masonry (URM) buildings may exhibit diverse failure mechanisms depending on overall building dimensions, opening sizes and locations, material quality and construction techniques. Advanced computational models are necessary to consider the influence of these aspects and are utilized to estimate the *as-is* seismic capacity of existing URM buildings. However, realistically reproducing the post-collapse state of an existing URM building is a more challenging task, especially when there is limited available data on the building's geometrical features and material properties. To address this challenge, an innovative framework for exploring the seismic behaviour of URM buildings is presented, integrating post-collapse data into discontinuum-based structural analyses. To demonstrate the potential of the proposed framework, the current investigation presents two case study buildings located in Türkiye's Hatay province: the Mithat Paşa Primary School in Iskenderun and the Liwan Boutique Hotel in Antakya, both of which suffered partial collapses during the recent Kahramanmaraş Earthquakes in 2023. Discrete block models of the two case study buildings are generated based on geometrical information obtained from various pre- and post-collapse vision-based data sources. An automatic block generation algorithm is then applied to create the masonry texture, simulating both periodic and nonperiodic masonry patterns.

Next, the generated models are analyzed using discontinuum-based structural analysis to simulate the seismic response of the structures. Comparisons between the preliminary pushover analysis results and collapse observations inform further analyses, which include further details and explore how aspects like construction quality and structural deficits may have contributed to the partial collapse of buildings. It is demonstrated that this iterative approach, supported by forensic site evidence and reverse engineering analysis, provides new insight into the influence of key factors that contribute to collapse. This information can help safeguard similar structures and inform the development of effective retrofitting solutions.

Keywords: Masonry, Computational Modelling, Structural Analysis, Discrete Element Method, Collapse Mechanism

1. Introduction

Predicting the seismic behaviour of unreinforced masonry (URM) buildings is a complex task. Ideally, the adopted numerical models should predict the maximum lateral load carrying capacity of the structure, as well as the associated progressive damage and collapse mechanisms. Typically, structural analysis of URM buildings is performed via computational models based on finite and/or discrete element methods [1]. Continuum-based models typically treat the masonry as a homogenous medium without distinguishing between masonry units or mortar joints (*e.g.*, [2–5]). On the other hand, discontinuum-based models explicitly represent masonry constituents with different levels of complexity (*e.g.*, [6–10]).

In the last two decades, discontinuum-based analysis of URM structures has become increasingly popular [11]. In particular, the discrete element method (DEM), has been extensively used to explore the mechanics of URM walls, arches, and buildings. DEM is ideally suited for high-fidelity post-earthquake forensic examination of URM buildings as it facilitates the consideration of the following key aspects: (i) wall morphology, (ii) existing cracks/material losses/gaps (if applicable) and (iii) partial and total loss of contact and recontact between masonry units during dynamic loading.

It is worth highlighting that the explicit representation of wall morphologies is necessary to obtain a better understanding of URM collapse mechanisms. For instance, aspects such as the interaction between orthogonal walls and wall-floor connection types strongly influence the collapse mechanisms and require closer investigation. Since the accuracy of discontinuum-based analyses specifically depends on how accurately the geometrical and morphological features are implemented in the computational model, special attention should be given to the idealization of block geometries in the computational models. 3D models of URM buildings from LIDAR scans or photogrammetry often serve as the basis of block definition [12–15]. Often, the real block geometry is simplified via manual or semi-automatic procedures when developing DEM models to minimize computational model run times.

While DEM-based computational modelling offers promising features regarding collapse simulations, its potential use in testing various structural configurations to reproduce different collapse mechanisms has not been systematically investigated in the literature. This is especially the case in the context of post-earthquake forensic investigations. To this end, the present

research aims to demonstrate an innovative application of discontinuum-based analysis of two masonry buildings which suffered partial collapses after the recent Kahramanmaras Earthquakes (2023). The discrete element model geometry is generated using vision-based data collected during field studies. The collapse mechanisms of the buildings are then reproduced using a series of DEM-based simulations of increasing complexity. This 'reverse engineering approach' highlights how discontinuum-based analyses may be used to better understand the factors that lead to collapse. Within this context, different what-if scenarios are examined to understand the impact of various structural configurations and construction quality metrics on the response of the buildings. The analyzed URM buildings are shown in Figure 1: the Mithat Paşa Primary School in Iskenderun (denoted as Building 1) and the Liwan Boutique Hotel in Antakya (denoted as Building 2).



(a) **(b)**

Figure 1. Post-earthquake conditions of analyzed URM buildings: (a) Building 1: Mithat Paşa Primary School, Iskenderun (b) Building 2: Liwan Boutique Hotel, Antakya.

The paper is organized as follows. Section 2 presents the adopted DEM modelling strategy. The proposed discrete block representation of the analyzed URM buildings is discussed in Section 3, and the results of the discontinuum-based analysis following the nonlinear quasi-static procedure are provided in Section 4. Finally, important inferences are discussed, and conclusions are drawn in Section 5.

2. Adopted Discontinuum-Based Computational Modelling Strategy

The seismic response of two URM buildings is investigated via DEM, pioneered by Cundall [16]. This approach captures the nonlinear behaviour of masonry by representing it as a system of discrete blocks interacting with each other at contact points [17, 18]. We adopt a simplified micro-modelling approach where the masonry units are expanded up to the half-thickness of the mortar joints, as shown in Figure 2. In this idealization, the masonry units can be modelled as rigid or deformable blocks, while the unit-mortar interface (bond) is considered at the zero-thickness interface [19, 20].

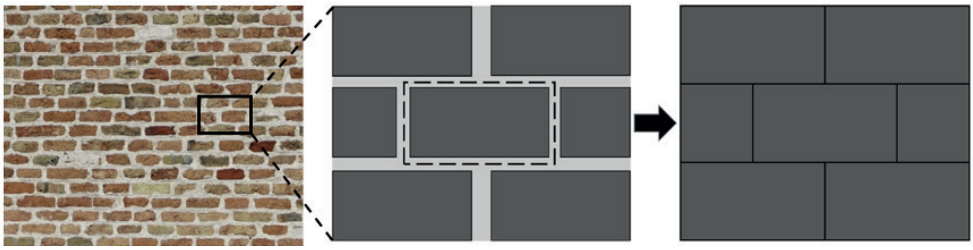


Figure 2. Illustration of generated discrete block medium based on the simplified micro-modelling approach.

The present study relies on the strong unit weak mortar assumption; hence, rigid blocks are used to model the full-scale URM buildings in 3DEC (a discrete element software developed by Itasca Consulting Group [21]). The rigid block movements are calculated by solving the governing equations of motion using the central difference method to predict translational and rotational velocities, presented in Equations (1) and (2), respectively.

$$\dot{u}_i^{t+} = \dot{u}_i^{t-} + \frac{\Delta t}{m}(\Sigma F_i^t - \lambda|\Sigma F_i^t|sgn(\dot{u}_i^{t-})) \tag{1}$$

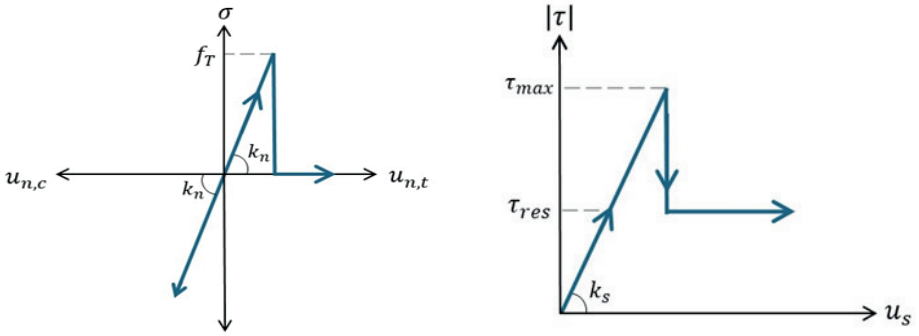
$$\omega_i^{t+} = \omega_i^{t-} + \frac{\Delta t}{I}(\Sigma M_i^t - \lambda|M_i^t|sgn(\omega_i^{t-})) \tag{2}$$

where $\dot{u}_i$ and ω_i are the translational and rotational velocities of the block centroid, respectively. The sum of forces and moments acting on a block is obtained via ΣF_i^t and ΣM_i^t, denoted as unbalanced force and moment. Additionally, m, I, Δt indicate the block mass, the moment of inertia, and the time step. Note that the formulation calculates block velocity at the mid-time step ($i.e., t^+ = t + \Delta t/2; t^- = t - \Delta t/2$). To prevent numerical instability, the critical time step (Δt_c) is calculated in terms of the minimum block mass (m_{min}) and the maximum contact stiffness ($k_{n,max}$) in the system ($\Delta t_c = \sqrt{m_{min}/k_{n,max}}$). Cundall's local damping formulation ($F_d = \lambda|F_i^t|sgn(\dot{u}^{t-})$, $M_d = \lambda|\Sigma M_i^t|sgn(\omega^{t-})$) is applied to obtain quasi-static solutions, providing a damping force opposing motion proportional to the local unbalanced force [22]. The adopted damping scheme uses a non-dimensional damping constant (λ), which has a default value of 0.8.

The defined contact constitutive law governs the interaction between discrete blocks in DEM. When two blocks meet, a series sub-contacts are generated along their contact surface. At each sub-contact, three orthogonal springs are defined: one in the normal direction and two in the shear direction. The present study adopts a soft contact approach, allowing blocks to overlap according to their defined contact stiffnesses in the shear and normal directions (k_n and k_s, respectively). Once the position of each rigid block is updated by integrating the predicted velocity, the relative point contact displacement increments for the adjacent blocks in the normal (Δu_n) and shear ($\Delta u_{s,i}$) directions are calculated. Then, elastic normal ($\Delta\sigma$) and shear ($\Delta\tau_{s,i}$) contact stress increments are obtained as follows.

$$\Delta\sigma = k_n\Delta u_n;\ \Delta\tau_{s,i} = k_s\Delta u_{s,i} \tag{3}$$

New contact stresses are calculated by adding the stress increments to the contact stresses from the previous time step ($\sigma^{t+} = \Delta\sigma + \sigma^t$, $\tau_{s,i}^{t+} = \Delta\tau_{s,i} + \tau_{s,i}^t$) and corrected according to the defined failure criterion (if applicable). A contact stress update routine is executed within the explicit solution scheme of the DEM. The present research utilizes simple elasto-brittle contact model to capture the weak/aged bond behaviour. In shear, the Coulomb-Slip Joint model is adopted, where the bond cohesion (c) and friction angle (ϕ) are used to calculate the shear strength (τ), while the residual shear capacity (τ_{res}) is controlled by the residual cohesion (c_{res}), and residual friction angle (ϕ_{res}). Conversely, the bond tensile strength is represented by a tensile strength (f_T) with an abrupt failure and no compression failure criteria is considered. The assigned contact stress-displacement behaviour in tension, compression and shear regimes are illustrated in Figure 2.



(a) **(b)**

Figure 3. Defined elasto-brittle contact models in the normal (a) and shear (b) direction.

Finally, the updated contact stresses are multiplied by the associated sub-contact area and utilized in the equations of motion. The provided explicit solution procedure continues until a quasi-static solution or a defined displacement limit is reached during the analysis. Nonlinear pushover analysis is performed following the procedures discussed above to predict the seismic response of the two URM buildings.

3. Discrete Block Representation Of Urm Buildings

Different workflows are proposed in the literature to utilize the collected vision-based data in the generation of computational models [23–26]. In this research, a practical approach is implemented, where data from remote-sensing technologies is investigated manually, but block generation is conducted automatically using custom code. The measurements used to generate the DEM models were obtained from post-collapse laser scans, pre-disaster visual records, GIS data and 360 photography from Google Maps. The accuracy in geometric representation of the buildings varies depending on the available data.

3.1. Determination Of Overall Building Geometry

The geometrical properties of the Mithat Pasa building are determined from recently acquired laser scan point cloud data [27]. Laser scanning technology creates detailed point clouds of its surroundings by measuring the phase shifts or time of arrival of reflected light produced by infrared laser beams. Since the data was collected after the earthquakes, the locations of the window openings in the collapsed second-floor walls are extrapolated based on the sizes and distances of the first-floor walls. Pre-collapse photographs and available drawing plans/dimensions presented in the literature are used to qualitatively verify the proposed geometry. The wall thicknesses were obtained by measuring the scanned faces of the walls. Characteristic dimensions of individual masonry units are determined based on measurements from areas where masonry surfaces are exposed.

While the identified dimensions are expected to be quite close to the as-is condition for the Mithat Pasa building, the geometrical properties of the Liwan Hotel are predicted by the less accurate GIS data and 360 panoramic images from Google Maps. An orthographic photo of the Liwan building's entrance elevation is obtained by capturing the view from Google Streetview and then correcting it using the "*perspective warp*" tool from Adobe Photoshop. The GIS data provides an estimate of the building's footprint, while the orthographic photo can be used to estimate the height of the overall building as well as the dimensions of the window and door openings and characteristic dimensions of masonry units [28].

Once all the general dimensional measurements for both buildings (the Mithat Paşa Primary School in Iskenderun and the Liwan Boutique Hotel in Antakya) are obtained, they are used to create simplified CAD drawings. The obtained 3D AutoCAD drawings are then utilized by the automatic block generation algorithm, discussed in the next section. This workflow is summarized in Figure 4.

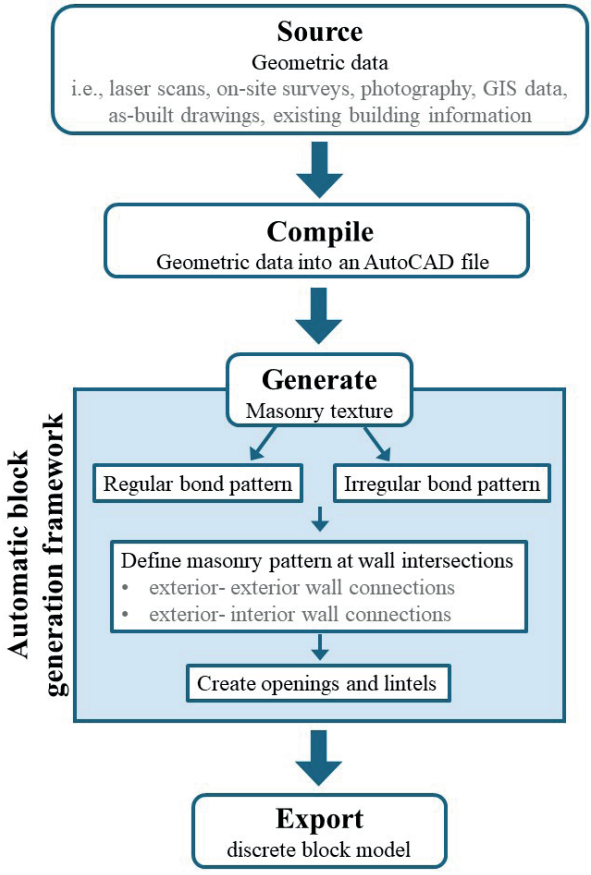


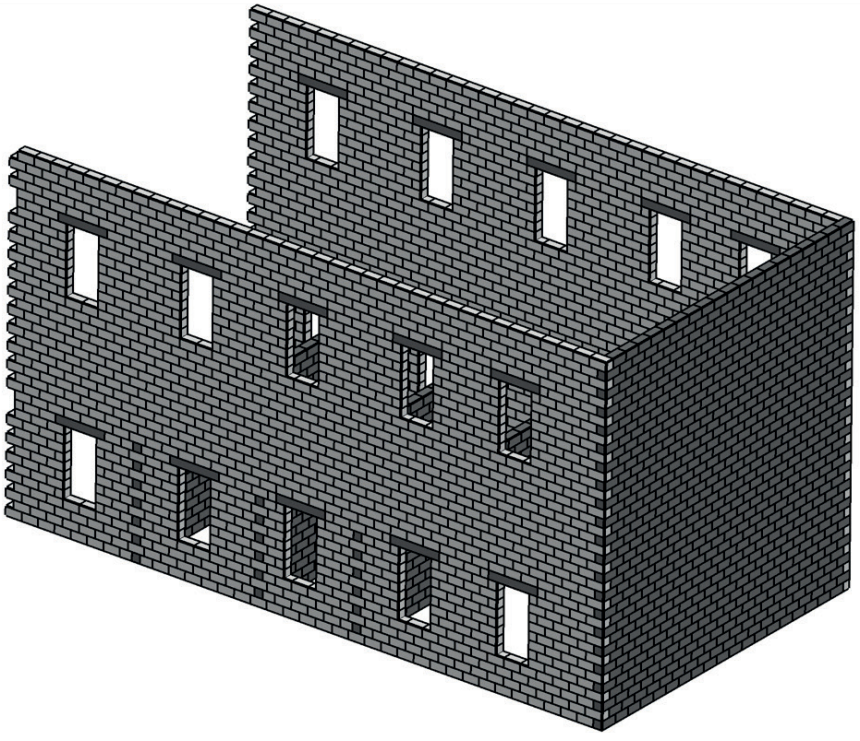
Figure 4. Proposed framework for generating discrete block URM buildings.

3.2. Generation Of Periodic Block Geometry For Discontinuum-Based Analysis

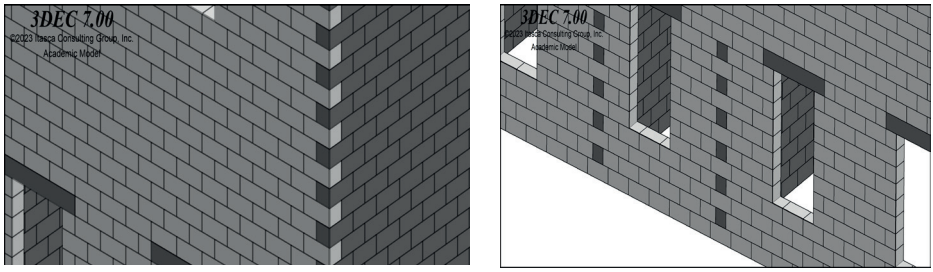
An automatic pipeline is implemented to generate a block-based virtual URM wall cross-section to be utilized in discontinuum-based analysis. The CAD models of the analyzed URM buildings are used as the primary input. The discrete block geometry is defined by filling the 3D solid envelopes corresponding to the load bearing URM walls with discrete rigid blocks which have the characteristic size discussed in the previous section. The straightforward running bond pattern is adopted where all blocks have identical dimensions and can fill any arbitrary volume corresponding to the masonry

wall. Specifically, individual wall facades are represented using 2D arrays where the values of entries correspond to bricks or openings. Multiple entries that are adjacent and have the same value represent a larger masonry unit. This array is then converted into coordinate data utilized in the adopted 3D discrete element code (3DEC).

The proposed block-generator algorithm consists of different functions to automatically address the common morphological features of URM walls and buildings, such as corner interlocking of orthogonal walls and interior-exterior wall detailing. Specifically, external walls define the outer envelope of the building and interlock when two orthogonal walls meet at the corners. The configuration of an exterior wall connection can be seen in Figure 5a, while the interior wall detailing when it meets the exterior wall sections is presented in Figure 5b. This manner of connection could potentially enhance the seismic performance by enabling force transfer between load-bearing walls.



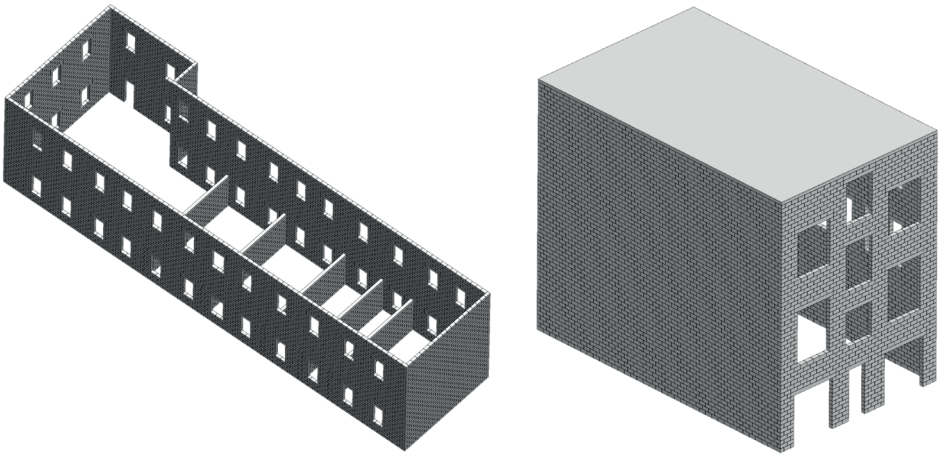
(a)



(b) **(c)**

Figure 5. Illustration of the output of implemented block generator for running bond pattern (a) block detailing seen in overall structure, (b) interlocking at the corner between exterior orthogonal walls (c) Interior-exterior wall connection.

After all walls have been generated, openings and their associated lintels are created. These openings have their top and bottom bounds aligned to the height of a bed joint. This prevents the formation of small blocks, which might be unrealistic. Openings are also aligned to head joints; thus, openings have only full and half blocks composing their sides. Furthermore, using a similar number of discrete blocks in discontinuum-based analysis corresponding to the real-world masonry building is computationally demanding and impractical. A few examples in the literature incorporate a significantly large number of blocks in DEM-based simulations [9, 29]. One method to improve the performance of a large-scale model is to increase the size of the discrete blocks, where each discrete block represents multiple masonry units. However, caution should be exercised, as the mentioned modification may reduce the accuracy of the crack pattern and unrealistically increase the predicted structural capacity if done inappropriately. In this study, larger blocks corresponding to multiple masonry units on the real buildings are used to create the Mithat Pasa Building and Liwan Boutique Hotel. Approximately 9,000 rigid blocks are utilized for each discontinuum model. The overall discrete block geometry of the proposed computational models for regular running bond patterns is shown in Figure 6.



(a) *(b)*

Figure 6. Discrete block representation of analyzed buildings: (a) Mithat Pasa Primary School, (b) Liwan Boutique Hotel.

3.3. Generation Of Nonperiodic Block Geometry For Discontinuum-Based Analysis

Masonry buildings in the province of Hatay typically featured nonperiodic bond patterns. The periodic block-generator algorithm is modified to address these nonperiodic (irregular) wall morphologies. The proposed approach begins with selecting a representative section of an existing URM wall (if applicable) or defining a hypothetical wall section. Primarily, the measured characteristics of the selected representative section are the frequency of different block sizes and the horizontal offset of head joints. Using these characteristics, blocks can be pseudo-randomly generated to fill a given volume while maintaining the morphological characteristics of the analyzed URM wall. Note that the block size distribution and shape can be obtained automatically through up-to-date pattern recognition algorithms (e.g., [30]) or determined manually. Furthermore, the horizontal offset of head joints can be measured using the ratio, part of the Masonry Quality Index (MQI) introduced by Borri et al. [31]. The MQI analysis aims to predict material strength and URM wall failure mechanism purely relying on visual inspection. The readers are referred to the reference studies for further details regarding the MQI analysis [31, 32]. The ratio specifically considers how easily a crack can propagate through the bed and head joint in a masonry wall, as shown in Figure 7a.

We propose a straightforward procedure to create nonperiodic wall patterns, which may be informed by an actual wall cross-section. The implemented block placement procedure considers a certain block-size distribution (primarily block length and height considered) and satisfies the desired horizontal offset of head joints. The block placement procedure in the virtual environment begins row by row, with each row completed block by block from left to right. The blocks placed along the first row are selected based solely on the frequency of their block sizes. Each block location is randomly selected proportional to its frequency in the sample wall section (if applicable). Once the first row is completed, a similar strategy is considered, except multiple block candidates are selected from the frequency distribution for placement of a single block. Of these candidates, the one with the greatest offset from head joints in the already completed adjacent row is selected and placed in the wall cross-section. It is important to note that the number of block candidates considered for each block placement is modified to match its real-world counterpart. It is worth noting that in the absence of actual wall cross-section properties, the user can start with a synthetic block size distribution and refine the virtual model once additional vision-based data is collected. The number of candidates used during block selection is decided by an automatic calibration tool. It generates different walls for each block candidate sample size and measures the resulting ratio. In case the actual wall section is known, the candidate size best approximating the expected ratio measured in the real wall sample is used. Sometimes, there is no number of candidates, which results in a ratio low enough to match the real wall sample. In this case, the block selection process can be modified. Instead of selecting the candidate block that creates a head joint with the greatest vertical offset, the candidate block that creates the smallest head joint offset with the adjacent row is chosen. Note that low ratio procedure may be useful when considering semi-rubble and poor construction quality walls. The adopted code flow is given in Table 1, where the procedure for selecting a single block is shown. This procedure is repeated for the leftmost unoccupied space in each row until the row is filled, and adjacent rows are then similarly filled until the wall is completed.

Table 1. Implemented nonperiodic wall generation algorithm (pseudo-code)

I***nput:*** R (current row), *S* (set of sample blocks), *C* (candidate size), *W* (actual or synthetic wall geometry)

Output: B (new block to be added into wall geometry)

If *R* = 1: // *First row is generated without consideration for head joint offset*

B = randomly selected block from S

Else if R != 1: // All other rows are generated based on head joint offset

S = {}

For i in 1 to C: // C*reate set of candidate blocks of size C*

$B_{Candidate,i}$ = randomly selected block from S

$B_{Candidate,i,OS}$ = distance from the nearest head joint in the adjacent row of *W* to the potential head joint on the right of $B_{Candidate,i}$ // Referred to as block offset score

Add $B_{Candidate,i}$ to S

End For

B = $B_{Candidate,i}$ within S with lowest associated $B_{Candidate.i,OS}$ // The highest $B_{Candidate.i?OS}$ value can instead be selected to create very low M_1 ratio walls.

End if

B is added to W

It should be noted that the ratio may not necessarily be constant in a given wall structure. A sample distribution of measured from multiple walls, along with example measurements, are presented in Figure 7b. Measuring the ratio by following different mortar joint paths from top to bottom within a single wall rarely results in the same ratio for nonperiodic masonry constructions. The variance in is intrinsic to the measurement as it is an approximate quantification of a wall's quality, which is not constant throughout a given wall geometry (see Figure 7c).

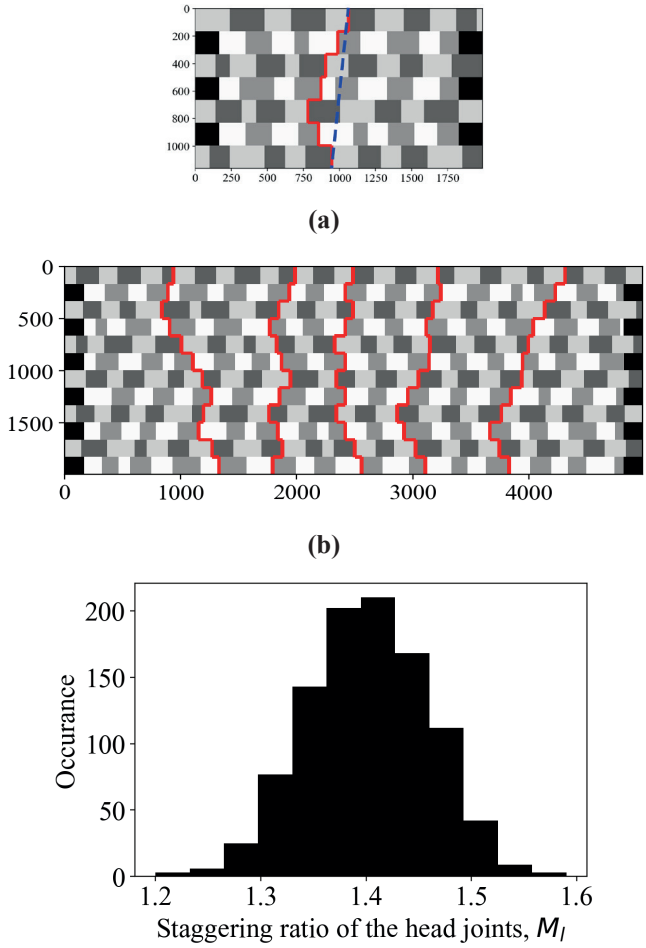


Figure 7. (a) Computation of the : Stepped line (red) top to bottom divided by the straight line (blue), (b) illustration of various paths for computing , and (c) a typical distribution of a virtually generated URM wall section.

Overall, the given block generator algorithms are utilized to create a discontinuous representation of the analyzed URM buildings in the virtual environment that are later subjected to lateral loading. We want to stress that the principal goal is to set a general framework capable of developing different discrete block mediums sufficiently representative of a given morphology rather than creating a one-to-one representation of the existing morphology. The proposed pipeline can be improved in the future to achieve a closer match to the as-is morphology, although generation is likely to be necessary in

future practical applications in order to limit analysis run times and simulate unmeasured morphology information (e.g. related to morphology along the thickness of the wall).

4. Pushover Analysis And The Proposed Reverse Engineering Framework

In this section, nonlinear quasi-static (pushover) analyses of Mithat Pasa and Liwan Hotel Buildings are conducted. Density of 2000 kg/m^3 is used for rigid blocks in the discrete element model. The elastic and plastic contact properties are determined in line with similar studies published in the literature (*e.g.*, [33–35]). The contact stiffness in the normal and shear directions are defined as Pa/m and Pa/m, respectively. Moreover, the initial and residual friction angles are assumed to be 37 degrees. Given the aged and weak mortar joint condition of the analyzed URM buildings, either dry-joints are assumed (*i.e.*, and , Mithat Pasa Building) or a limited bond strength is considered (*i.e.*, MPa and MPa, Liwan Boutique Hotel). The boundary conditions of the models were established by restricting the bottom course of masonry from displacing and rotating in all degrees of freedom. Once each computational model is brought into equilibrium under its self-weight, lateral accelerations (constant at any one instant) are applied gradually in an incremental fashion along the predefined direction aligned to the longitudinal or transversal axis of the building. During the analysis, several monitoring points are utilized to record displacements through the height of the buildings and determine the initial kinematic mechanism. Overall convergence conditions and automatic lateral load increments are programmed in FISH language (an executable programming language in 3DEC).

4.1. Building #1: Mithat Paşa Building

Four structural configurations are considered for the Mithat Pasa Building, as shown in Figure 8. The first iteration (Figure 8a) includes only the exterior façade of the building, while the second one (Figure 8b) consists of five interior walls interlocking with the exterior envelope. In other models, the diaphragm action is considered by adding continuous rigid bond beams (see Figure 8c) or a floor slab (Figure 8d). The investigation of different configurations is necessary due to the uncertainties associated with the floor structures. Visual evidence suggests the use of a jack arch floor for most of the

building, while the stairs and floor structures in the extruded part may have been reinforced concrete additions. Note that almost no structural cracks or failures were noted in the extruded portion of the building. Lateral accelerations were applied along the transversal direction of the building.

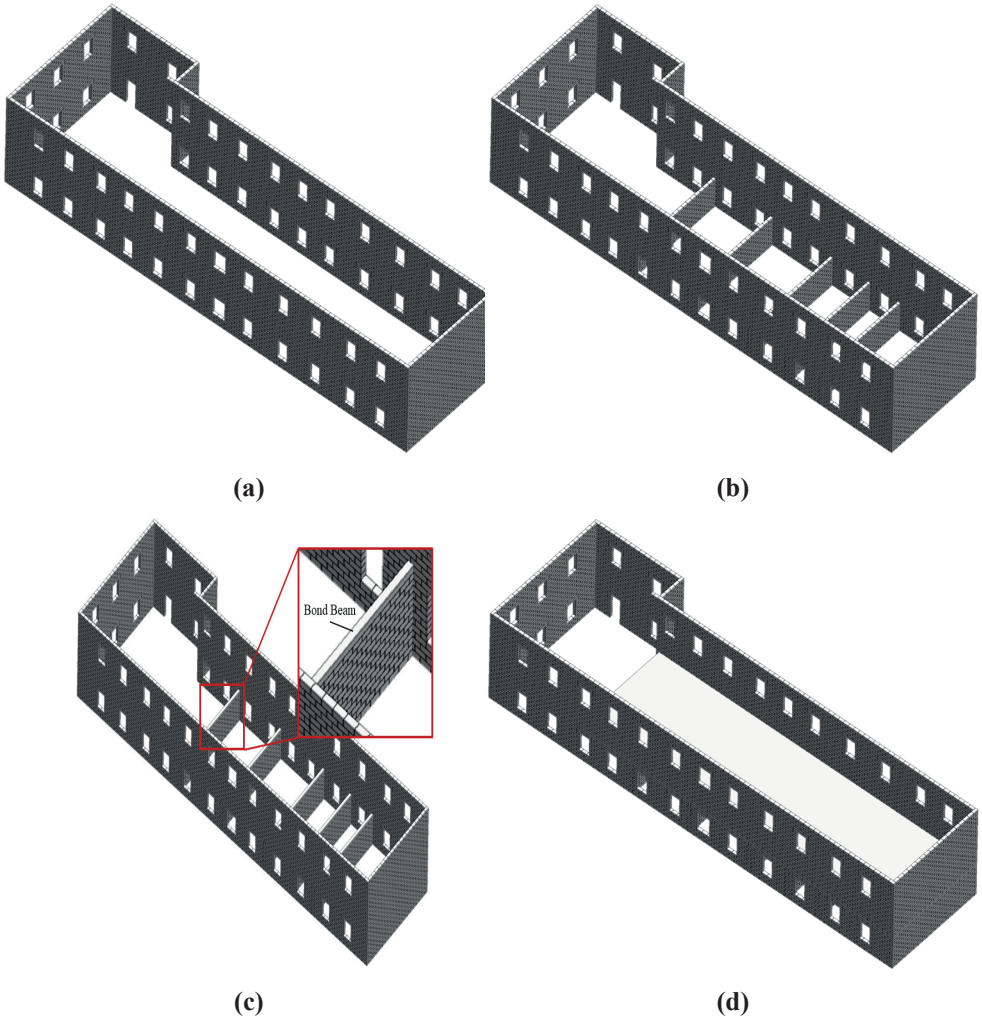
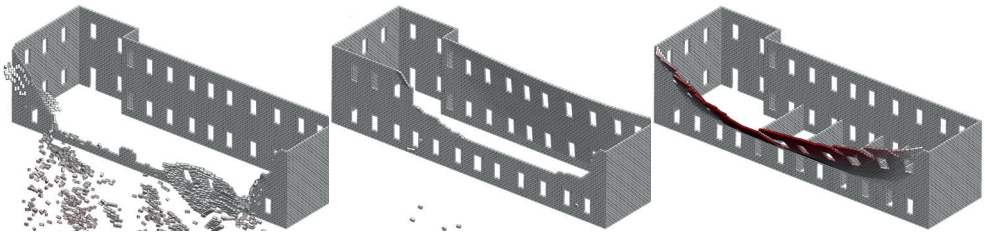
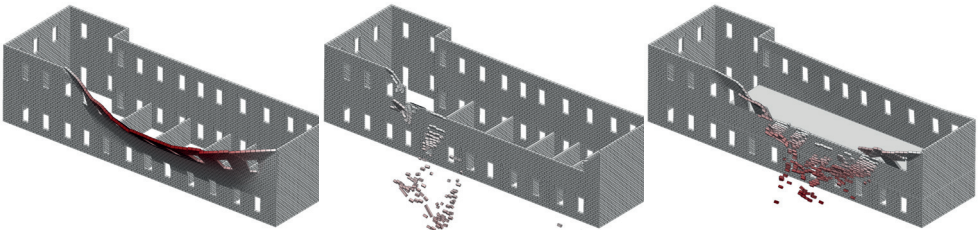


Figure 8. Proposed structural configurations for the Mithat Pasa Building: (a) no internal walls, (b) addition of the interior walls, (c) implementation of continuous rigid beam between two façades and (d) interior wall + rigid slab.

The obtained failure mechanisms and the associated pushover curves are given in Figures 9 and 10, respectively. Results indicate a combined out-of-plane arching action with the overturning mechanism of the façade along the entire wall length when interior walls on the first floor are neglected (*Config#1*, Figure 9a). While this mechanism is likely to occur if there is no proper diaphragm action, the extruded portion of the building demonstrated almost no damage, as mentioned earlier. This is considered to be due to the retrofitted rigid stair and floor structure in this portion of the structure. To address this aspect, the boundary conditions are updated, and in the second structural configuration, the extruded portion of the building is fixed in place; this is denoted as *Config#2*. This changes the resulting failure mode to a local overturning failure at the second storey (see Figure 9b). The following iterations introduce five interior walls along the ground floor. Both simulations are executed without and with the extruding section fixed. The former (*Config#3*) leads to a failure mechanism along the entire length of the second storey (Figure 9c), while the latter (*Config#4*) provides a better match compared to on-site observations (Figure 9d). Further adjustments are adopted by introducing rigid continuous beams (denoted as bond beams) along each partition wall, partially restricting the displacement of interior URM walls and providing limited diaphragm action (*Config#5*). Finally, a very similar collapse mechanism is noted when the bond beams are replaced with a rigid floor slab (*Config#6*), as shown in Figure 9e. According to the computational investigations, the localized overturning mechanism at the upper storey arises due to a lack of a orthogonal load-bearing walls in the second storey and a lack of diaphragm action from the timber truss roof (which was neglected).



(a) **(b)** **(c)**



(d) **(e)** **(f)**

Figure 9. Predicted collapse mechanism of Mithat Pasa building considering different structural configurations: (a) ***Config#1****: No internal walls, (b)* ***Config#2****: No internal walls – extruded portion fixed, (c)* ***Config#3****: Addition of the internal walls, (d)* ***Config#4****: Internal walls – extruded portion fixed, (e)* ***Config#5****: Internal walls with rigid bond beam – extruded portion fixed and (f)* ***Config#6****: Internal walls with rigid slab - extruded portion fixed.*

In Figure 10, the results of the nonlinear quasi-static analyses are provided for each structural configuration. The results underline the positive influence of the adopted bond beams and slabs on the lateral load carrying capacity of the URM buildings, denoted in *Config#5* and *Config#6*, respectively. Note that the large stiffness difference considered in *Config#5* and *Config#6* between the extruded portion and the rest of the structure provides a collapse mechanism in line with the post-earthquake condition of the analyzed URM building. Conversely, the lack of proper connection between façades prescribed through the interior wall system yields considerably lower capacity, as depicted in Figure 10 (*Config#1*). The remaining case studies (from *Config#2* to *Config#4*) provide seismic resistance bounded by *Config#1* and *Config#5*.

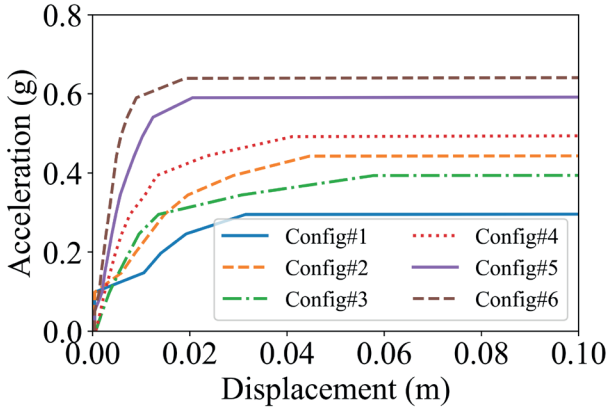
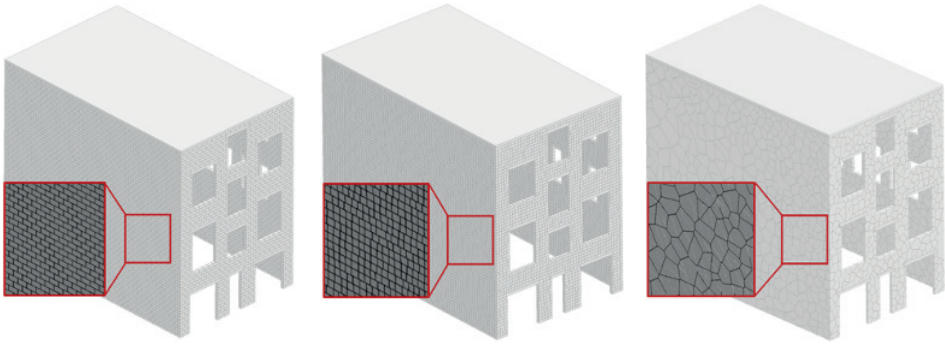


Figure 10. Pushover curves (lateral acceleration vs displacement) obtained from discontinuum analysis considering different structural configurations.

4.2. Building #2: Liwan Boutique Hotel

In line with the previous case study, a similar workflow is adopted in the seismic assessment of the Liwan Boutique Hotel. A rigid diaphragm is assigned to the top floor of the building and accelerations are applied along the longitudinal building axis. Since the interlocking between the orthogonal walls has a major impact on the observed out of plane failure mechanism in Figure 1b, different scenarios for wall morphologies and interlocking between walls are investigated since no prior information was available regarding wall morphology. As shown in Figure 10, three discrete element models are proposed, where the morphology varies from a regular running bond pattern to an irregular loosely interlocking rubble masonry. For the regular pattern, a worst case scenario is considered where there is no interlocking between orthogonal walls.

The proposed irregular (rubble) masonry fabric is generated using Grasshopper, a visual programming environment bundled with the Rhinoceros drawing software [36]. Once the basic representation of the Liwan Hotel (overall dimensions including openings) is realized in Rhino, the building domain is populated with three-dimensional random seed points. The defined random seed points are later processed through the 3D Voronoi module and utilized for tessellation of varying shapes and sizes resembling irregular masonry wall construction.



(a) **(b)** **(c)**

Figure 11. The proposed URM construction morphologies: (a) running bond, (b) nonperiodic pattern and (c) rubble (irregular) block geometry.

Overall, four masonry construction morphologies are analyzed. The predicted collapse mechanisms are shown in Figure 12. As expected, the worst-case scenario (Figure 12a) yields a vertical arch mechanism with a total separation of the front façade from the rest of the building. While the predicted failure mechanism (denoted as LH#1) is reasonable for poorly constructed old masonry buildings, it does not fully match the partially collapsed state of the building, where the failure mechanism also involves the side walls. Alternatively, a periodic (running bond) pattern is considered (LH#2) to examine the effect of proper interlocking at the corners and side walls (Figure 12b). The results highlight the positive influence of interlocking between orthogonal walls, enhancing the integrity of the URM wall system. However, it is evident that the adoption of regular masonry units of equal staggering ratio does not lead to the failure mode observed in the building. Therefore, two intermediate conditions are adopted, namely a nonperiodic masonry fabric (LH#3) and an irregular (also called rubble) construction pattern (LH#4). Specifically, we aim to introduce lower staggering ratios leading approximately vertical fracture planes to manifest and achieve the collapse of the front façade of the building with side (orthogonal) walls. The results show that LH#3 experiences significant deformation near the centre of the western façade, similar to LH#2, while the proposed rubble masonry texture offers relatively close damage mechanism of the analyzed building as shown in Figure 12c and Figure 12d, respectively.

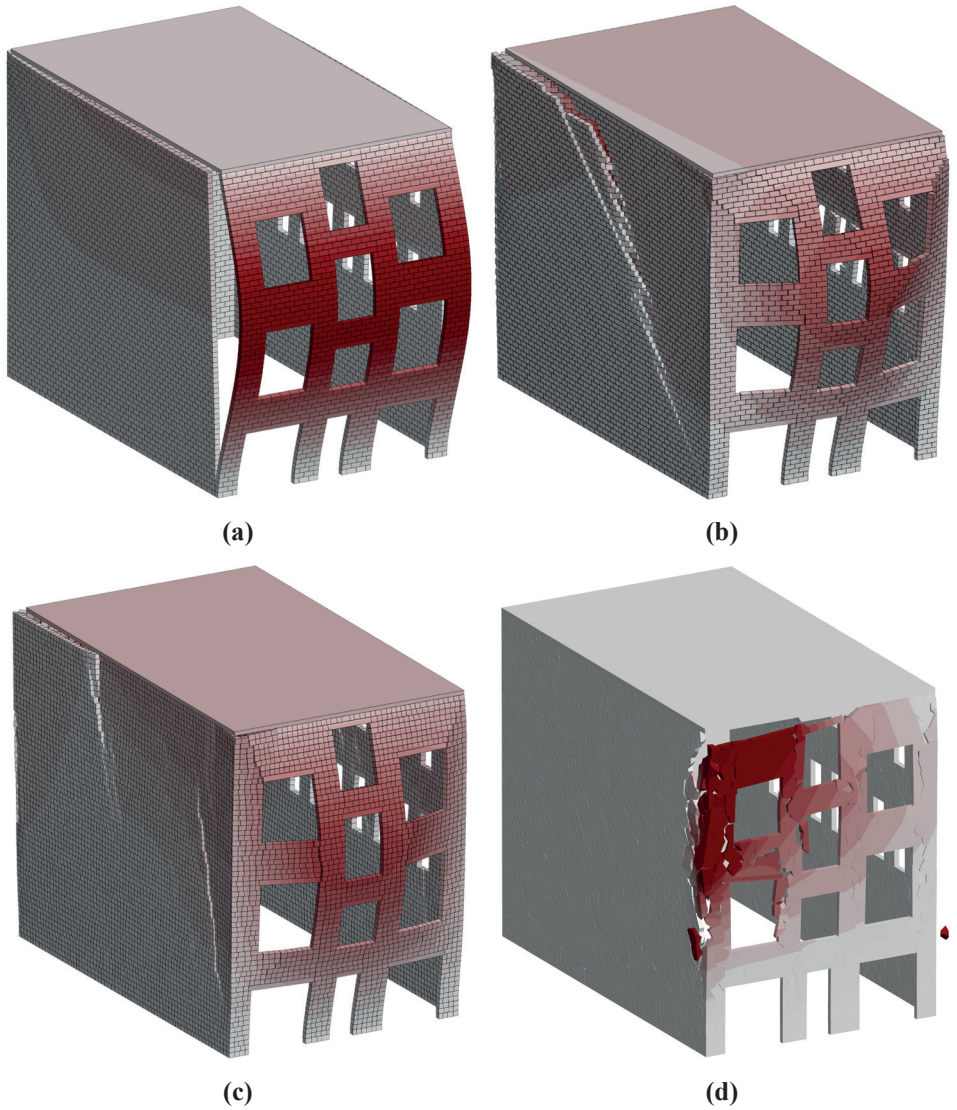


Figure 12. Predicted collapse mechanisms considering different construction morphologies: (a) no interlocking between front façade and orthogonal walls (LH#1), (b) running bond pattern (LH#2), (c) nonperiodic masonry walls (LH#3) and (d) rubble masonry (LH#4).

Figure 13 shows the ultimate lateral acceleration, obtained from the non-linear quasi-static analysis, for each scenario. In the plot LH#1-4 are each associated with an average staggering ratio. Note that the average staggering ratio is computed at the intersection between the front façade and perpendi-

cular walls since the failure is governed by the detachment of the front façade and, eventually, the vertical overturning mechanism. The results indicate that the lowest seismic multiplier is obtained for the rubble masonry building (LH#4), which has experienced a disaggregation type localized failure due to low bond and construction quality. A slight increase in accelerations is noticed for the failure of the structure where no connection is present between the front façade and side walls (LH#1). However, both configurations underline the vulnerability of the buildings to poor construction practices and lack of diaphragm action. The highest seismic capacity is noted for the running bond pattern (LH#2), which demonstrates the desired construction quality and a corner interlocking mechanism. Interestingly, LH#3, which features a nonperiodic morphology shows a higher seismic capacity compared to LH#1 and LH#4. This outcome is related to the inherent features of using rigid blocks in the adopted computational modelling framework. Since no corner crushing or cracking within the masonry units has been considered in the numerical models, it may overestimate even a small amount of interlocking developing within the masonry construction. Thus, further refinements may be necessary when using the rigid discrete block simulations to better capture the local failure mechanisms and explore the effect of meso-scale morphological features on the macro response of the URM buildings.

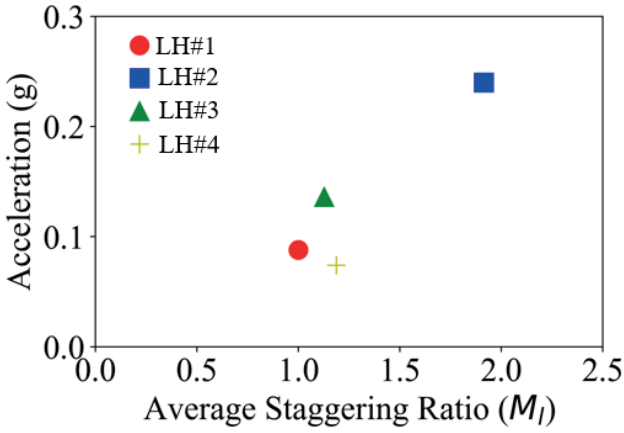


Figure 13. Lateral accelerations associated with predicted collapse mechanism and masonry construction morphology.

5. Conclusions

This research conducts forensic investigation on the seismic response of two buildings which suffered partial collapses during the Kahramanmaraş Earthquakes in 2023. The out of plane collapse mechanisms observed in both buildings are predicted using a new reverse engineering framework that utilizes remote sensing data. Several conclusions can be drawn from the conducted analyses:

- Due to the challenges surrounding acquiring geometrical information after a seismic event, creating digital representations of damaged or partially collapsed unreinforced masonry structures can be complicated. The presented case studies demonstrate the effectiveness of compiling geometric information from multiple vision-based data sources to obtain geometrical measurements that can be employed in computational modelling.
- The proposed automatic block generation algorithms generate periodic and nonperiodic block patterns, representing various real-life masonry configurations. The adopted approach significantly improves efficiency compared to manual block-generation strategies and facilitates iterative investigation of discrete element models for forensic purposes.
- It is demonstrated that the proposed discontinuum-based modelling strategy considering different boundary conditions and floor structures captures the post-earthquake condition of the Mithat Paşa Building. This approach provides insights into the building's *as-is* condition, notably by highlighting how the lack of interior walls and diaphragm action in the second storey, played a key role in the collapse.
- The analysis of the second case study building, the Liwan Boutique Hotel, demonstrated the influence of wall morphology (in particular, interlocking between orthogonal walls) on the overall behaviour of the structure. Despite a lack of data on wall morphology, analyses of different wall morphologies (generated using automated or semi-automated tools) highlights how deficiencies in morphology and a general lack of diaphragm action may have been major contributors to the observed failure. The findings highlight the need for an automated framework capable of representing diverse masonry textures and patterns to improve the reliability of structural assessments. This finding is especially critical for rubble buildings with poor quality construction which may experience local disaggregation failures that can cascade to premature global failures.

In future studies, the implemented block-generation algorithm will be extended to include additional masonry quality index parameters. This will enhance the diversity of created bond patterns and may help address the existing conditions of the URM buildings. Further work may also address the automated extraction of masonry quality index from laser scan and photogrammetry data.

Acknowledgements

B. Pulatsu would like to gratefully acknowledge the support of the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) grant RG-PIN- 2022-04938. Moreover, the first author is supported through Undergraduate Student Research Awards (USRA) program administered by NSERC.

References

1. Roca P, Cervera M, Gariup G, Pelà L (2010) Structural analysis of masonry historical constructions. Classical and advanced approaches. Arch Comput Methods Eng 17:299–325. https://doi.org/10.1007/s11831-010-9046-1

2. Lourenço PB, Rots JG, Blaauwendraad J (1998) Continuum model for masonry: Parameter estimation and validation. J Struct Eng 124:642–652. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:6(642)

3. Funari MF, Spadea S, Lonetti P, et al (2020) Visual programming for structural assessment of out-of-plane mechanisms in historic masonry structures. J Build Eng 31:101425. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101425

4. Funari MF, Hajjat AE, Masciotta MG, et al (2021) A parametric scan-to-FEM framework for the digital twin generation of historic masonry structures. Sustain 13:11088. https://doi.org/10.3390/su131911088

5. Saloustros S, Pelà L, Contrafatto FR, et al (2019) Analytical Derivation of Seismic Fragility Curves for Historical Masonry Structures Based on Stochastic Analysis of Uncertain Material Parameters. Int J Archit Herit 13:1142–1164. https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1638992

6. Lourenço PB, Rots JG (1997) Multisurface interface model for analysis of masonry structures. J Eng Mech 123:660–668

7. Foti D, Vacca V, Facchini I (2018) DEM modeling and experimental analysis of the static behavior of a dry-joints masonry cross vaults. Constr Build Mater 170:111–120. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.202

8. Pulatsu B, Erdogmus E, Lourenço PB, et al (2020) Discontinuum analysis of the fracture mechanism in masonry prisms and wallettes via discrete element method. Meccanica 55:505–523. https://doi.org/10.1007/s11012-020-01133-1

9. Gonen S, Pulatsu B, Erdogmus E, et al (2021) Quasi-static nonlinear seismic assessment of a fourth century A.D. Roman Aqueduct in Istanbul, Turkey. Heritage 4:401–421. https://doi.org/10.3390/heritage4010025

10. Lemos J V., Sarhosis V (2022) Discrete Element Bonded-Block Models for Detailed Analysis of Masonry. Infrastructures 7:31. https://doi.org/10.3390/infrastructures7030031

11. Malomo D, Pulatsu B (2024) Discontinuum models for the structural and seismic assessment of unreinforced masonry structures: a critical appraisal. Structures 62:106108. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106108

12. Griesbach P, Wilson R, Karakus B, Pulatsu B (2023) Transferring vision-based data to discontinuum analysis for the assessment of URM walls. Eur J Environ Civ Eng 0:1–16. https://doi.org/10.1080/19648189.2023.2254376

13. Loverdos D, Sarhosis V (2024) Pixel-level block classification and crack detection from 3D reconstruction models of masonry structures using convolutional neural networks. Eng Struct 310:118113. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118113

14. Erdogmus E, Pulatsu B, Can B, Ozkan K (2019) Analysis of the Last Standing Arch of the Roman Aqueduct at Blaundos. In: Dillion PB, Fonseca FS (eds) 13th North American Masonry Conference. The Masonry Society, Salt Lake City, pp 483–493

15. Loverdos D, Sarhosis V (2023) Image2DEM: A geometrical digital twin generator for the detailed structural analysis of existing masonry infrastructure stock. SoftwareX 22:101323. https://doi.org/10.1016/j.softx.2023.101323

16. Cundall PA (1971) A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems. In: The International Symposium on Rock Mechanics. Nancy, pp 47–65

17. Cundall PA (1988) Formulation of a Three-dimensional Disctinct Element Model - Part I. A Scheme to Detect and Represent Contacts in a System Composed of Many Polyhedral Blocks. Int J Rock Mech Min Sci Geomech 25:107–116

18. Hart R, Cundall PA, Lemos J V. (1988) Formulation of a three-dimensional distinct element model - Part II. Mechanical calculations for Motion and Interaction of a System Composed of Many Polyhedral Blocks. Int J Rock Mech Min Sci Geomech 25:117–125

19. Pulatsu B, Erdogmus E, Lourenço PB, et al (2020) Simulation of the in-plane structural behavior of unreinforced masonry walls and buildings using DEM. Structures 27:2274–2287. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.026

20. Pulatsu B (2023) Coupled elasto-softening contact models in DEM to predict the in-plane response of masonry walls. Comput Part Mech 10:1759–1770. https://doi.org/10.1007/s40571-023-00586-x

21. Itasca Consulting Group Inc. (2013) 3DEC Three Dimensional Distinct Element Code

22. Cundall PA, C. D (2017) Dynamic relaxation applied to continuum and discontinuum numerical models in geomechanics, 1st Editio. CRC Press, Boca Raton, FL

23. Pirchio D, Walsh KQ, Kerr E, et al (2021) Integrated framework to structurally model unreinforced masonry Italian medieval churches from photogrammetry to finite element model analysis through heritage building information modeling. Eng Struct 241:112439. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112439

24. Crespi P, Franchi A, Ronca P, et al (2015) From BIM to FEM: the analysis of an historical masonry building. Build Inf Model Des Constr Oper 1:581–592. https://doi.org/10.2495/bim150471

25. Milani G, Esquivel YW, Lourenço PB, et al (2013) Characterization of the response of quasi-periodic masonry: Geometrical investigation, homogenization and application to the Guimarães castle, Portugal. Eng Struct 56:621–641. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.05.040

26. Loverdos D, Sarhosis V, Adamopoulos E, Drougkas A (2021) An innovative image processing-based framework for the numerical modelling of cracked masonry structures. Autom Constr 125:103633. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103633

27. Bozyigit B, Ozdemir A, Donmez K, et al (2024) Damage to monumental masonry buildings in Hatay and Osmaniye following the 2023 Turkey earthquake sequence: The role of wall geometry, construction quality, and material properties. Earthq Spectra. https://doi.org/10.1177/87552930241247031

28. Mijic N, Sestic M, Koljancic M (2017) CAD—GIS BIM Integration—Case Study of Banja Luka City Center. In: Hadzikadic M, Avdakovic S (eds) Lecture Notes in Networks and Systems 3. Spring International Publishing, pp 267–281

29. Ferrante A, Loverdos D, Clementi F, et al (2021) Discontinuous approaches for nonlinear dynamic analyses of an ancient masonry tower. Eng Struct 230:111626. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111626

30. Mishra M, Lourenço PB (2024) Artificial intelligence-assisted visual inspection for cultural heritage: State-of-the-art review. J Cult Herit 66:536–550. https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.01.005

31. Borri A, Corradi M, De Maria A (2020) The failure of masonry walls by disaggregation and the masonry quality index

32. Borri A, Corradi M, Castori G (2015) A method for the analysis and classification of historic masonry. Bull Earthq Eng 2647–2665. https://doi.org/10.1007/s10518-015-9731-4

33. Erdogmus E, Pulatsu B, Gaggioli A, Hoff M (2021) Reverse Engineering a Fully Collapsed Ancient Roman Temple through Geoarchaeology and DEM. Int J Archit Herit 15:1795–1815. https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1728593

34. Alexakis H, Makris N (2017) Hinging Mechanisms of Masonry Single-Nave Barrel Vaults Subjected to Lateral and Gravity Loads. J Struct Eng 143:4017026. https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001762

35. Lourenço PB, Gaetani A (2022) Recommended properties for advanced numerical analysis. In: Finite Element Analysis for Building Assessment. Routledge, New York, pp 209–320

36. McNeel R and others (2023) Rhinoceros 3D, Version 8.0. Robert McNeel & Associates, Seattle, WA

27 EYLÜL 2024

7. ULUSLARARASI TARİHİ YAPILARIN GÜÇLENDİRİLMESİ VE GELECEĞE GÜVENLE DEVRİ SEMPOZYUMU

7. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRENGTHENING HISTORICAL BUILDINGS AND TRANSFERRING THEM SAFELY TO THE FUTURE

7. SEMPOZYÛMA NAVNETEWEYÎ LI DERBARÊ QEWÎKIRIN Û PARASTINA AVAHÎYÊN DÎROKÎ

DİYARBAKIR, SEZAİ KARAKOÇ KÜLTÜR MERKEZİ

B SALONU - 2B OTURUMU

Oturum Başkanları
M. Salih Keskin, Tansel Önal

Anıtsal Yapılarda Zemin Çağdaş Güçlendirme Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Analizi: Uygulanmış Koruma Çalışmaları Üzerinden Bir Değerlendirme
Şule Ergün, Nursen Işık

Tarihi Ahşap Çatı Birleşim Davranışının Deneysel İncelenmesi
Büşra Nur Gürgün, Nihan Doğramacı Aksoylar, Mehmet Selim Ökten

Tarihi Yapılarda Tespit Edilen Sorunların Yapı Malzemeleri Üzerinden İyileştirilmesi
Ebru Kılıç Bakırhan

Kılıçlama Yöntemi ile Duvar ve Döşeme Bağlantılarının Depreme Karşı Davranışa Etkisi
Cevdet Şentürk, Rabia Aydın

19. Yüzyıl Anadolu Rum Ortodoks Kiliseleri: Krom Vadisi Örneği
Merve Ertürk, Neslihan Kulözü

TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI ANKARA ŞUBESİ
TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI DİYARBAKIR ŞUBESİ
ODEYA ENDAZYARÊN AVAHÎYÊ

ANITSAL YAPILARDA ÇAĞDAŞ ZEMİN GÜÇLENDİRME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ: UYGULANMIŞ KORUMA ÇALIŞMALARI ÜZERİNDEN BİR DEĞERLENDİRME

Şule ERGÜN[1], Nursen IŞIK [2]

[1]Araştırma Görevlisi, Dicle Üniversitesi, sule.ergun@dicle.edu.tr
[2]Doçent Doktor, Dicle Üniversitesi, isikcn@gmail.com

Özet

Günümüz bilgi ve teknolojisindeki gelişmeler, anıtsal yapılarda kullanılan güçlendirme yöntemlerini etkilemektedir. Çağdaş teknik ve malzemeler, yapıların onarımı sırasında çalışan uzmanlara önemli kolaylıklar sağlayabilmektedir. Bu bağlamda, çalışmada anıtsal yapıların onarımında kullanılan çeşitli çağdaş zemin güçlendirme yöntemlerinin sağladığı avantaj ve dezavantajları belirlemek amaçlanmaktadır. Çalışmada, zemin güçlendirme çalışmaları tamamlanmış yapıların *yapısal hasarları, zemin sorunlarının olası nedenleri ve yapılan güçlendirme çalışmaları* araştırılmıştır. Tespit edilen yöntemler; *geri dönülebilirlik, yapıya hasar verme durumu, kullanılan teknik ve malzemenin geleneksel veya çağdaş olma durumu, yapıların özgün sanatsal, yapısal ve mekansal değerlerin sürdürülebilirliği* gibi koruma ölçütleri bağlamında değerlendirilerek zemin güçlendirme yöntemlerinin belirlenmesinde yol gösterici olması amacı ile karşılaştırma yapılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Zemin Güçlendirme, Anıtsal Yapı, Mimari Koruma

Abstract

Today's advances in knowledge and technology affect the reinforcement methods used in monumental buildings. Modern techniques and materials can provide significant convenience to the experts working during the repair of structures. In this context, this study aims to determine the advantages and disadvantages of various modern ground reinforcement methods used in the repair of monumental structures. In the study, structural damages, possible causes of ground problems and reinforcement works were investigated. The methods identified were evaluated in the context of conservation criteria such as reversibility, damage to the structure, traditional or contemporary techniques and materials used, sustainability of original artistic, structural and spatial values of structures, and a comparison was made in order to guide the determination of ground reinforcement methods.

Keywords: Ground Reinforcement, Monumental Structure, Architecture Conservation

1. Giriş

Yapılarda onarım ve güçlendirme çalışmaları insanlık tarihi kadar eski bir olgudur. Her dönem yapı ustaları, döneminin teknolojisini bir adım ileriye taşıma çabası içerisinde olup mevcut onarım bilgilerini yeni teknikler ile entegre edebilme yeteneği doğrultusunda bilimsel bir ilerleme göstermiştir. Günümüzde benzer yaklaşım uluslararası çağdaş koruma ilkelerinde de benimsenmiş olup anıtsal yapıların onarımında çağdaş yöntemlere başvurulabileceği sıklıkla ifade edilmiştir [1, 2]. Ancak anıtsal yapılarda, yapıların sahip oldukları özgün kültürel özellikleri gereği çağdaş yapı ilkeleri ve standartlarında uygulanabilirliği kısıtlayan onarım ve güçlendirme sorunları bulunabilmektedir. Her yapının kendine özgü gelişen sorunlarının çözümü disiplinler arası çeşitli uzmanlıkların çalışmaları ile mümkün olabilmektedir. Çeşitli uzmanlıkların paylaşıldığı bilimsel metinler ise; yapılan uygulamaların disiplinler arası değerlendirilerek yeni açılımlar oluşturmasına öncülük etmektedir.

Bu çalışmada, anıtsal yapıların güçlendirilmesinde başvurulan çağdaş zemin güçlendirme yöntemleri araştırılmıştır. Bu kapsamda, uygulaması yapılmış zemin güçlendirme çalışmaları araştırılarak geri dönülebilirlik (dönülebilir/dönülemez), hasar durumu (tahribatlı/tahribatsız), özgünlük (teknik ve malzemede; sanatsal, yapısal ve mekansal öğelerin sürdürülebilirliğinde) gibi koruma ölçütleri bağlamında analizleri yapılmıştır. Değerlendirme sonucunda, uygulanabilecek yöntem veya yöntemlerin koruma uygulamalarını yönlendirebilecek bir araç olması amaçlanmıştır.

2. Anıtsal Yapılarda Zemin Güçlendirme Çalışmalarını Yönlendiren Ölçütler

Zemin özellikleri farklı bölgelerde kaya, çakıl, kum, kil ve silt gibi farklılık göstermektedir. Farklı özelliklere sahip katmanlar; yer kabuğu hareketleri, yer altı su seviyesindeki değişim, mevsimsel değişimler gibi doğa olayları ile yapı yükünün değişmesi, çarpık kentleşme, titreşim gibi insan faaliyetlerine bağlı olarak değişebilir. Değişen zemin özellikleri, yapının yükünü güvenle aktardığı yapı-zemin ilişkisini zedeleyerek yapısal sorunların ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir. Zemini farklılaşan temeller, zemin ile uyum gösteremediği zaman, temellerde farklı oturmalar gerçekleşir ve yapıdan zemine yük aktarımı dengesiz hale gelir. Bu durumda oturma ve kayma durumuna bağlı olarak, üst yapıda çatlak, ayrışma, parça kopması ve malzeme kaybı gibi hasarlar meydana gelebilir [3]. Meydana gelen hasarların gi-

derilmesi ve anıtın güçlendirilmesi için öncelikle zemin ile ilgili problemlerin çözülmesi gereklidir. Anıtsal yapılarda zemin güçlendirme uygulamaları öncesi, gerekli inceleme ve araştırmalar yapılmalı, yapı taşıyıcı sistemi ve zeminin davranışı tüm yönleriyle anlaşılmalıdır. Her yapının kendine özgü gelişen zemin problemlerine yine yapı özelinde bir değerlendirme yapılarak müdahale önerileri geliştirilmelidir. Öneriler geliştirilirken rasyonel mühendislik çözümleri ile tarihi yapıların onarımını yönlendiren koruma ilkeleri beraber değerlendirilmelidir. Bir kültürel varlık olarak yapıların, yapısal özellikleri ile özgün sanatsal ve kültürel nitelikleri korunmalıdır.

Tarihi yapıların korunması amacıyla yapılan bilimsel metinlerde ve uluslararası platformlarda kabul görmüş koruma ilkelerinde; hasar tespit sonrası tercih edilen onarım müdahalelerinin geri dönülebilir olması, yapıya hasar vermeyen tahribatsız bir yöntem olması gibi ölçütler onarım sırasında dikkat edilmesi gereken ilkeler olarak sıklıkla ifade edilmektedir [1, 2]. Geri dönülebilirlik ilkesi (reversible); yapının korunması amacıyla yeni yöntemler geliştirildiğinde yapılan müdahalelerin anıta zarar vermeden kaldırılarak daha uygun olanla değiştirilmesi bakımından önemli bir ilkedir. Yapıya hasar vermeyen tahribatsız bir yöntem olması hem yapı hasarı analiz çalışmalarında hem de yapı güçlendirme uygulamalarında tercih edilmesi gereklidir. Yapılacak müdahalelerde yapının durumu göz önünde bulundurularak mümkün olduğu kadar özgün teknik ve malzemenin sürdürülmesi beklenir. Eğer bu durum mümkün değilse yapılacak çağdaş teknik ve malzemelerle yapılan müdahalelerin ayırt edici olması gerekir. Ayrıca çağdaş tekniklerle yapılan müdahaleler, özgün cephe özelliklerinin sürdürülmesine olanak sağlayacak biçimde düzenlenmelidir [4].

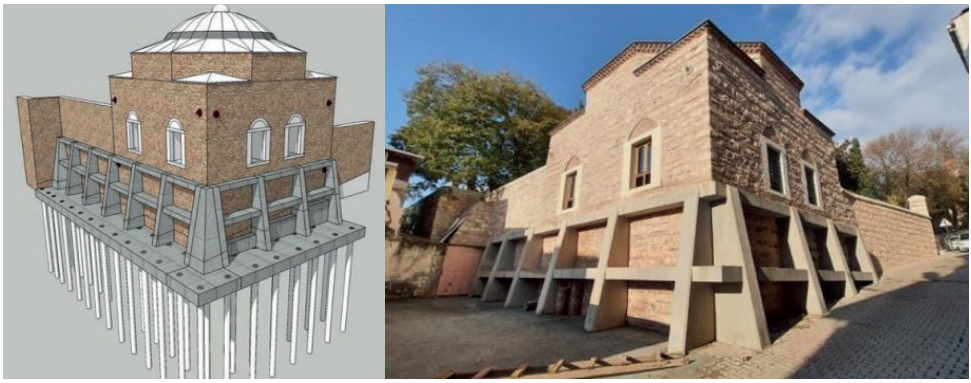
3. Anıtsal Yapıların Zemin Güçlendirmelerinde Kullanılan Çağdaş Yöntemler

Zemin güçlendirme çalışmaları, mevcut zemini değiştirmeden ancak zeminin mühendislik özelliklerini değiştirerek zemin mukavemetinin arttırılmasını sağlarlar. Bu çalışmalar, kayma mukavemeti ile gerilme-deformasyon modülünün arttırılması, sıkışabilirliğin, permeabilitenin ve sıvılaşma potansiyelin azaltılması, şişme/büzülme potansiyelinin kontrol altına alınması, çevre koşullarına bağlı olarak fiziksel ve kimyasal değişimlerin önlenmesi gibi çalışmaları içerir [5]. Günümüz bilgi ve teknolojisi ile zemin güçlendirilme uygulamaları için çok çeşitli yöntemler geliştirilmektedir. Ancak, bu teknikler her zaman anıtsal yapılar için uygun yöntemler olamayabilmektedir. Anıtsal yapılar, taşıdıkları tarihi, sanatsal ve estetik değerleri ile korun-

ması gereken kültür varlıkları olduğundan seçilecek yöntemlerde yapıların sahip oldukları değerleri sürdürecek biçimde değerlendirilmesi beklenir. Bu kapsamda çalışmada, anıtsal yapılarda kullanılan yaygın ve çağdaş zemin güçlendirme yöntemlerinin tespiti için uygulaması yapılmış 8 anıtsal yapının zemin güçlendirme çalışmaları derlenerek değerlendirme yapılmıştır.

3.1. İstanbul Şeyh Murad Efendi Mescidi

Sağlam zemine inen kazıklı temellerle yapılan zemin güçlendirme çalışmalarının günümüz teknolojisiyle yapılan uygulamalarına örnek olarak İstanbul Şeyh Murad Efendi Mescidi'nde yapılan zemin güçlendirme çalışmalarında, tarihi su kanalları, çeşitli derinliklerde isale hattı ve internet veri kablolarının geçtiği kanallarının oluşturduğu zemin hareketlerini önlemek amaçlanmıştır. Yapıda gerekli güvenlik önlemleri alındıktan sonra duvarların dönmesini/kaymasını önlemek için mevcut taşıyıcı sisteme ve temele ek bir payanda sistemi ile destek verilerek kazık temellerle zeminin güçlendirilmesi öngörülmüştür [6], (Şekil 1). Zeminde yapılan müdahalelerin geri dönülebilirliği oldukça zor olup uygulaması pek mümkün değildir. Çağdaş teknik ve malzemelerin kullanıldığı zemin güçlendirme çalışmalarında yapıya zarar verilmemiştir. Ancak kazık sistemiyle bütünleşik üst yapıda yapılan, betonarme payanda sistemi ve gergi uygulamaları ile özgün cephenin yapısal ve estetik değerleri zarar görmüştür.

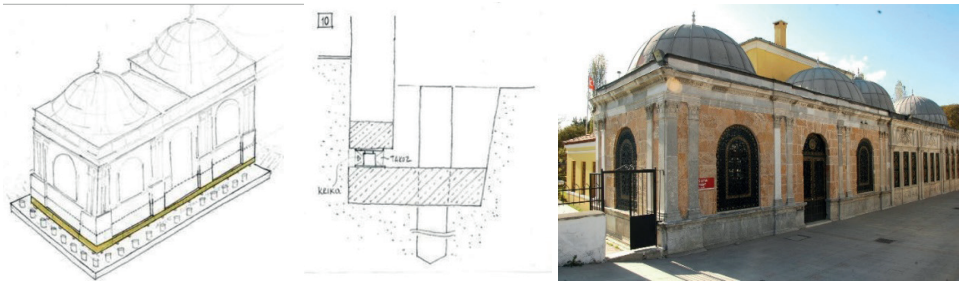


Şekil 1- Şeyh Murad Efendi Mescidi güçlendirme uygulamaları modeli[1] ve sonrası[2] [6]

1 Savaş Ekinci Arşivi, 2015'ten aktaran Ökten vd., 2021
2 Mehmet Selim Ökten, 2020'den aktaran Ökten vd., 2021

3.2. İstanbul Adile Sultan Türbesi (19. yy.)

İstanbul Adile Sultan Türbesi'nde yapılan güçlendirme çalışmalarında yapı bitişiğinde yeni açılan temel çukurunun sebep olduğu yapısal sorunların giderilmesi amaçlanmıştır. Zemin güçlendirme çalışmaları ile yapısal sorunların giderilmesi için yapı sağlam bir mesnete oturtulması hedeflenerek betonarme bir hatıl ve bu hatılın oturduğu kazıklı bir temel ile desteklenmiştir [6], (Şekil 2). Zeminde yapılan uygulamaların geri dönüşümü oldukça zor olup yapıya zarar verilmemektedir. Çağdaş teknik ve malzemeler ile yapılan bu uygulamalar dış cepheye yansımamakta olup yapının özgün yapısal, mekansal ve sanatsal özellikleri sürdürülmektedir.

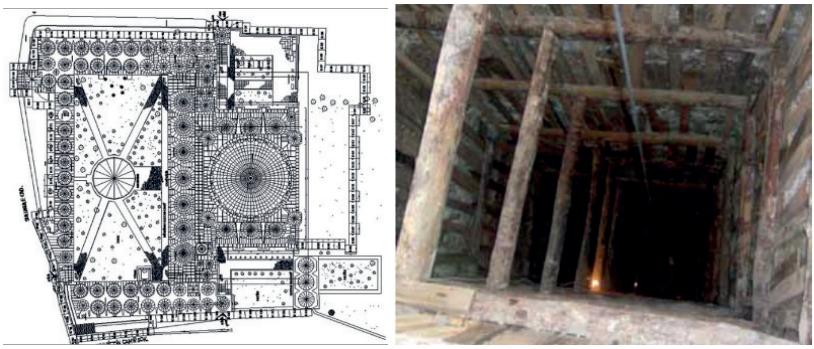


Şekil 2- Planlanan güçlendirme müdahaleleri eskizi[3] [6] ve mevcut durumu [7]

3.3. Edirnekapı Mihrimah Sultan Camii (16. yy.)

Derin kazılarda genelde iksa sistemi olarak bilinen kuyu perde uygulamaları, zeminin yanal hareketlerini engellemek amacıyla da üretilebilirler. Edirne Mihrimah Sultan Camii'nde; karayolu imar hareketlerinin sebep olduğu zemin hasarlarının giderilmesi amacıyla yapılan zemin güçlendirme çalışmalarında; yapı avlusunu çevreleyen ve en az 5m sağlam zemine soketlenen 2m kalınlığında, kuyu temel sistemi ile oluşturulan bir perde sistemi ile güçlendirme yapılmıştır [8], (Şekil 3). Avlu çevresinde yapıldığı nitelendirilen uygulamalar yapıya zarar vermemektedir. Ancak yapılan uygulamaların geri dönüşümü oldukça zordur. Çağdaş teknik ve malzeme ile yapılan bu uygulamalar dış cepheye yansımamakta olup yapının özgün cephe özellikleri sürdürülmektedir.

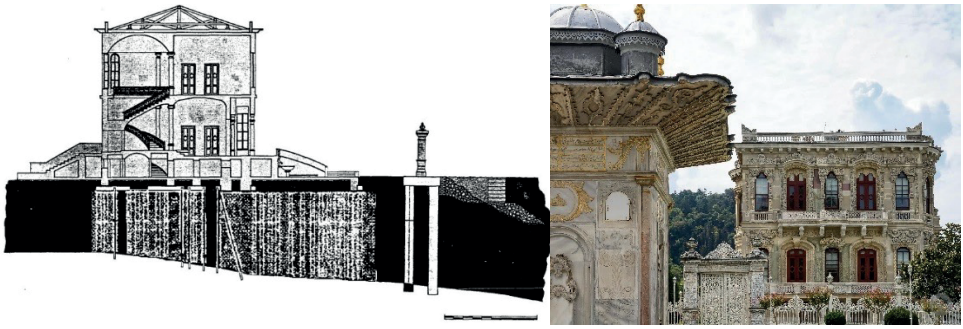
3 Savaş Ekinci Arşivi, 2015'ten aktaran Ökten vd., 2021



Şekil 3- Mihrimah Sultan Cami avlu çevresindeki perde sistemi ve kuyu temel örneği [8]

3.4. İstanbul Küçük Su Kasrı (19. yy.)

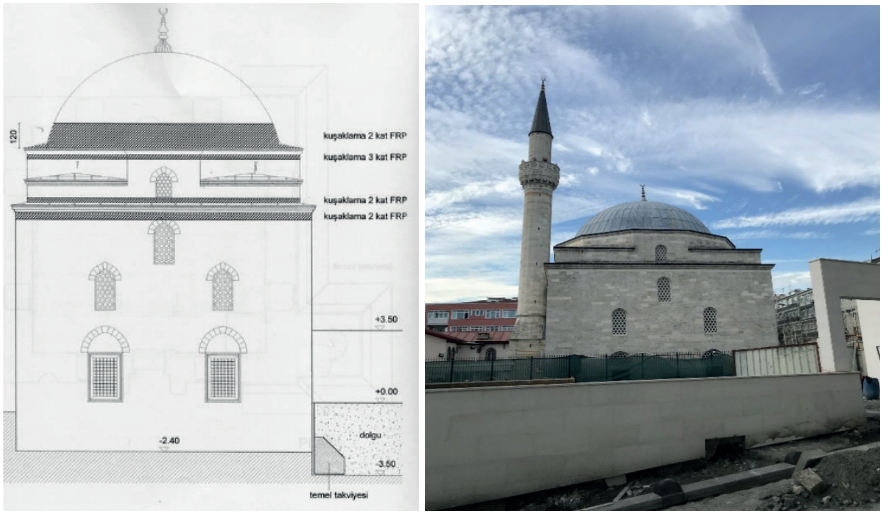
Enjeksiyon uygulamaları, günümüzde yaygın olarak kullanılan ve bilinen bir yöntemdir. Enjeksiyon ile yapılan zemin güçlendirme çalışmalarının günümüz teknolojisiyle yapılan uygulamalarına İstanbul Küçüksu Kasrı örnektir. Zayıf zemin koşullarından dolayı duvarda ayrılmalar ve denize doğru eğilmelerin tespit edildiği kasırda, kıyı şevlerinin iyileştirilmesi amacı ile deniz içinde dolgu (1980), bahçede kasrı çevreleyen ve kayaya ulaşan 55 sıkılaştırma enjeksiyonu yapılmış (1983-1984), daha sonra, 1987 yılında beton bloklarla rıhtım yapılmıştır, [5], (Şekil 4). Yapı zemininde yapılan enjeksiyon uygulamaları, dış cepheye yansımayarak yapının özgün silüetini sürdürmesine olanak sağlamıştır. Çağdaş teknik ve malzemelerin kullanıldığı bu uygulamalar yapıya zarar vermeyen uygulama olmasına rağmen geri dönüşümü mümkün değildir.



Şekil 4- Küçüksu Kasrı jet grout uygulamaları kesiti [5] ve mevcut durumu [9]

3.5. Fatih İskender Paşa Camii (16. yy.)

Zeminlerde kompaksiyon çalışması, boşluklu, gevşek zeminlerin güçlendirme çalışmalarında kayma mukavemetini arttırmak amacıyla yapılmaktadır. Fatih İskender Paşa Camii'ndeki güçlendirme çalışmalarında yapı bitişiğinde yapılan ek yapının sebep olduğu zemin problemleri giderilmiştir. Yapıda öncelikle caminin zayıflayan kâgir temelleri, ek bir betonarme temel sistemi ile desteklenmiştir. Sonrasında hasara sebebiyet veren ek yapı kaldırılmış ve zemindeki boşluk sıkıştırılarak yeniden doldurulmuştur [6], (Şekil 5). Zemin alt kotunda yapılan uygulamalar, dış cepheye yansımayarak yapının özgün cephe özelliklerini sürdürmesine olanak sağlamıştır. Özgün ve çağdaş yöntemlerin bir arada kullanıldığı yapıda, yapıya zarar vermeyen ancak geri dönüşümü pek mümkün olmayan uygulamalar tercih edilmiştir.



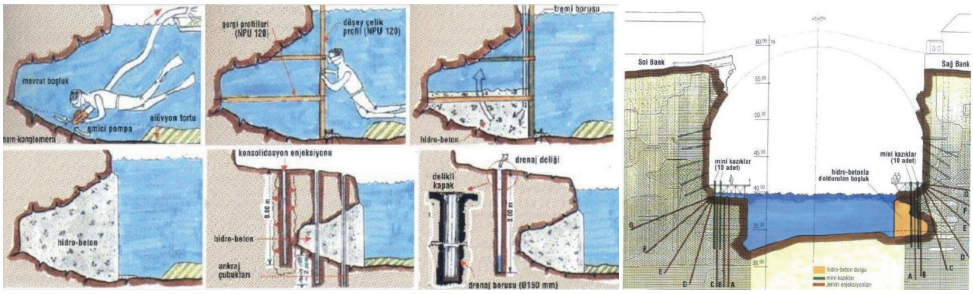
Şekil 5- Güçlendirme müdahaleleri krokisi[4] [6] ve mevcut durumu [10]

3.6. Mostar Köprüsü (16. yy.)

Zeminlerde sıklıkla görülebilen drenaj problemleri; yer altı su seviyesindeki değişimler, afetler, zayıf zeminlerin zaman içerisinde boşalması sonucu su birikimi, plansız alt yapı projeleri gibi sebeplerden ötürü ortaya çıkabilmektedir. Zeminden uzaklaştırılmayan su zemin özelliklerinin değişmesine sebep olarak üst yapıdaki sorunları da arttırabilmektedir. Bosna Hersek'teki

4 Hassa Mimarlık, 2004'ten aktaran Ökten vd., 2021

Mostar Köprüsü'nde, üst yapıda onarım çalışmaları başlatılmadan önce nehir yatağındaki derin boşlukların giderilmesi amaçlanmış olup bu amaçla nehir yatağında birçok işlem bir arada yapılmıştır. Yapılan işlem basamakları; nehir yatağının temizlenmesi, çelik kalıp montajı, beton dökümü, kalıp sökümü, ankraj, kontakt ile konsolidasyon enjeksiyonu, ile drenaj çalışmalarından oluşmaktadır [11][5], (Şekil 6). Uygulanan zemin güçlendirme çalışmaları, rekonstrüksiyon öncesi yapılan çalışmalar olduğundan yapıya zarar verme durumu söz konusu değildir. Ancak yapılan uygulamaların geri dönüşümü mümkün değildir. Çağdaş teknik ve malzemeler ile su altında yapılan bu uygulamalar dış cepheye yansımamaktadır.

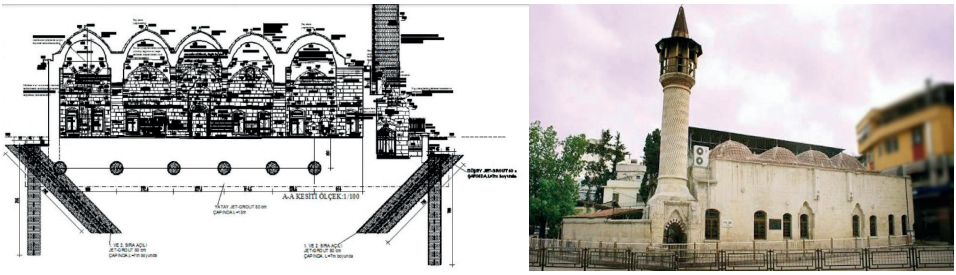


Şekil 6- Mostar Köprüsü rekonstrüksiyon öncesi zemin güçlendirme işlemleri [11][6]

3.7. Adana Yeni (Abdürrezzak Antaki) Cami (18. yy.)

Abdürrezzak Antaki Camii'nde; deprem (1998 Adana-Ceyhan), trafik titreşimleri, yer altı su seviyesindeki değişimler ve özgün mimariye yapılan müdahalelerden dolayı yapı stabilitesinin bozulması sebeplerinden dolayı yapının kubbe, minare ve beden duvarlarında çatlamalar oluşmuştur [12]. Yapılan zemin etüt çalışmaları sonucunda; cami temellerinin desteklenmesi ve yapıda meydana gelen oturmaların önüne geçilebilmesi için jet grout (enjeksiyon) ile güçlendirme yapılması öngörülmüştür [12], (Şekil 7). Uygulanan zemin güçlendirme çalışmalarının yapıya zarar verme durumu söz konusu değildir. Ancak yapılan uygulamaların geri dönüşümü mümkün değildir. Çağdaş teknik ve malzemeler ile zemin altında yapılan bu uygulamalar dış cepheye yansımamaktadır.

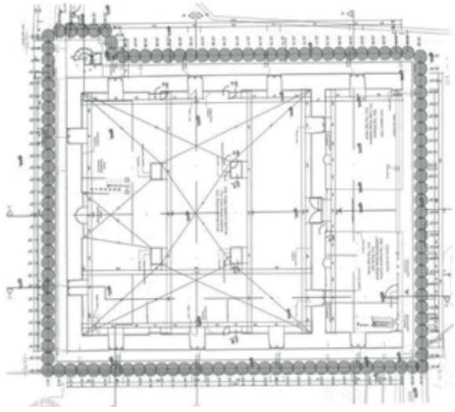
5 Arıoğlu ve Anadol 2004'den aktaran Meriç Cevahir, 2019
6 Arıoğlu ve Anadol 2004'ten aktaran Meriç Cevahir, 2019



Şekil 7- Abdürrezzak Antaki Cami, zemin güçlendirme işlemleri [12] ve sonrası [13]

3.7. Mersin Camili Köyü Cami (14. yy.)

Yapının duvarlarında, kemerlerinde ve avlu zemininde yapı güvenliğini tehlikeye atan çatlamalar oluşmuş ve olası hasar sebepleri olarak; temel zeminini oluşturan birimlerin taşıma gücünün zayıflaması, yapı etrafındaki eğimden dolayı meydana gelen kısmı heyelan, ve civardaki taş ocağı titreşimleri olarak belirlenmiştir [12]. Zemin ıslahı projesi kapsamında, yapı etrafında kesişen ve yapı altına su sızmasını engelleyecek şekilde bitişik olarak jet-grout kolonlarının oluşturulması ve yapı etrafındaki şevden kaynaklanan ve kısmen başlamış olan heyelanın önlenmesi amacıyla istinat duvarı yapılması önerilmiştir [12]. Uygulanan zemin güçlendirme çalışmalarının yapıya zarar verme durumu söz konusu değildir. Ancak yapılan uygulamaların geri dönüşümü mümkün değildir. Çağdaş teknik ve malzemeler ile zemin altında yapılan jet grout uygulamaları dış cepheye yansımamakta olup istinat duvarı dış cepheye yansımaktadır.



Şekil 8- Mersin Camili Köyü Cami, zemin güçlendirme işlemleri [14]

4. Değerlendirme

Anıtsal yapılarda uygulanan zemin güçlendirme çalışmaları değerlendirildiğinde; yapılarda tespit edilen hasarlar dönme, eğilme, burulma, kayma, oturma, ayrışma, çatlama, göçme, yıkılma gibi çeşitli ciddi yapısal sorunlardır. Yapısal sorunların, zemin kaynaklı olası nedenleri araştırıldığında, problemlerin bazen doğa bazen de insan kaynaklı geliştikleri tespit edilmiştir. Doğa kaynaklı olarak; denizlerde gel-git, nehir yataklarında debi yükselmesi, deprem gibi olaylar iken; insan kaynaklı olarak, imar hareketleri sonucu yeraltında derin boşluklar oluşturulması, trafik/maden ocağı titreşimleri gibi sorunlar olduğu belirlenmiştir. İncelenen anıtsal yapılarda her yapı kendi özelinde değerlendirilerek güçlendirme önerisi geliştirilmiştir. Zemin güçlendirme çalışmalarında uygulanan yöntemler; temel takviyeleri (payanda, betonarme, beton, ankraj), kazık sistemler, enjeksiyon ve drenaj sistemleri olarak çeşitlenmektedir. Bu yöntemler arasında genellikle, yapılara temel takviyeleri yapılarak yapının sağlam zemine inen kazık sistemler ile güçlendirilmesi tercih edilmiştir. Yapılan zemin güçlendirme uygulamaları, genel olarak temel alt kotunda ve yapı dış çeperini kapsayacak biçimde yürütülmüştür (Tablo 1).

Tablo 1- Anıtsal yapılarda uygulanan zemin güçlendirme çalışmaları analizi

	Yapı	Tespit Edilen Hasarlar	Zemin Sorunlarının Olası Nedeni	Zemin Güçlendirme Uygulamaları	Kaynak
1	Şeyh Murad Efendi Mescidi, İstanbul	Yapısal dönme, kayma ve çatlaklar	Yeraltındaki tarihi ve yeni açılan kanallar	Payanda sistemi ile kazıklı temel yapımı	(Ökten vd., 2021)
2	Adile Sultan Türbesi, İstanbul	Yapısal çatlaklar ve oturma, ahşap kazıklı temelin bozulması	Yapı bitişiğinde yeni açılan temel çukuru	Betonarme hatıl ile kazıklı temel yapımı	(Ökten vd., 2021)
3	Edirnekapı Mihrimah Sultan Camii, İstanbul	Yapısal kayma, çatlaklar, taş dökülmeleri ve demir gergi ek bölgelerinde kopmalar	Karayolu imar hareketleri	Sağlam zemine soketlenen kuyu temel sistemi ile avlu çevresinde perde yapımı	(Sesigür ve Çılı 2014)

4	Küçüksu Kasrı, İstanbul	Yapısal eğilme, dönme, oturma, ayrılma ve çatlaklar	Zayıf zemin koşulları, deniz gelgitleri, deniz ve karayolu ulaşımı titreşimleri	Temel takviyesi (kolon ve kiriş yapımı) ile enjeksiyon (jet-grout)	(Sarı, 2008)
5	Fatih İskender Paşa Cami, İstanbul	Yapısal burulma ve çatlak	Yapı bitişiğinde, yapı temel alt kotundan daha alt bir kota inen yeni ek yapı	Temel takviyesi (betonarme) ile zeminin yeniden doldurularak kompaksiyonu	(Ökten vd., 2021)
6	Mostar Köprüsü, Bosna Hersek	Yıkılma	Savaş ve nehir debisinin artmasından dolayı zeminde derin boşalmalar	Temel takviyesi (beton), ankraj, enjeksiyon (kontakt, konsolidasyon), mini kazık, drenaj	(Arıoğlu ve Anadol 2004'ten aktaran Meriç Cevahir, 2019)
7	Yeni (Abdürrezzak Antaki) Cami, Adana	Yapısal çatlaklar ve oturma	Deprem (1998 Adana-Ceyhan), trafik titreşimleri, yer altı su seviyesindeki değişimler, özgün mimariye yapılan müdahaleler	Jet grout, iksa	(Utkan, 2014)
8	Camili Köyü Cami, Mersin	Yapısal çatlaklar ve oturma	Su hareketinden dolayı zemin taşıma gücünün zayıflaması, şevden kaynaklı heyelan, taş ocağının sebep olduğu titreşimler	Yapı etrafında kesişen ve bitişik şekilde jet-grout kolonlarının oluşturulması, betonarme istinat duvarı	(Utkan, 2014) (Utkan vd., y.y.)

Çalışma aracılığı ile incelenen anıtsal yapılarda tercih edilen zemin güçlendirme yöntemlerinin koruma ilkeleri kapsamında analizleri yapıldığında; bu yöntemler arasında ankraj ve drenaj gibi uygulamalar genel olarak geri dönülebilir uygulamalar iken taşıyıcı sistem takviyesi, kazık sistemler, enjeksiyon uygulamalarının geri dönülebilirliği oldukça zordur. Yapılan çalışmalar genellikle yapı alt kotunda kalarak yapıya hasar vermemektedir. Böylelikle yapıların özgün sanatsal, yapısal ve mekansal değerleri sürdürülebilmektedir. Payanda veya istinat duvarı ile yapılan takviyelerde yapıların cephe estetiği bozulabilmektedir. Yöntemler uygulanırken kullanılan teknik ve malzemeler ise genellikle günümüz teknolojisi ile uygulanmış beton, betonarme, çelik gibi çağdaş malzemelerdir.

Yöntemler özelinde bir değerlendirme yapıldığında; taşıyıcı sistem takviyeleri genel olarak kazık sistemlerle birlikte düşünülmüştür (Tablo 2).

Tablo 2- Zemin güçlendirme yöntemlerinin koruma kuramı bağlamında analizi

Zemin Güçlendirme Yöntemleri	Geri Dönülebilirlik		Yapıya Hasar Verme Durumu		Teknik ve Malzeme		Özgün Sanatsal, Yapısal ve Mekansal Niteliklerin Sürdürülebilirliği	
	Dönülebilir	Dönülemez	Hasarlı	Hasarsız	Özgün	Çağdaş	Sürdürülebilir	Sürdürülemez
Taşıyı Sistem Takviyesi (Temel, Duvar)		✓		✓		✓	✓	✓
		1, 2, 4, 5, 6, 8	1	2, 4, 5, 6, 8		1, 2, 4, 5, 6, 8	2, 4, 5, 6,8	1
Kazık Sistemler		✓		✓		✓	✓	
		1, 2, 3, 6, 7		1, 2, 3, 6, 7		1, 2, 3, 6, 7	1, 2, 3, 6, 7	
Enjeksiyon		✓		✓		✓	✓	
		4, 6, 7, 8		4, 6, 7, 8		4, 6, 7, 8	4, 6, 7, 8	
Ankraj	✓			✓		✓	✓	
	6			6		6	6	
Drenaj	✓			✓		✓	✓	
	6			6		6	6	

5. Sonuç ve Öneriler

Anıtsal yapıların hassas strüktürel durumları, zemin ile yakından ilgilidir ve kritik seviyede etkilenmektedir. Ancak anıtsal yapılarda yapılan onarım çalışmaları geçmişinde; öncelikle yapı üst kotunda onarımların yapıldığı, daha sonra eğer süregelen yapısal problemler var ise yapı alt kotu ile ilgili sorunların irdelenmeye başlandığı görülmektedir. Yapı alt kotundaki problemlerin öncellenmemesi, üst yapıdaki sorunların tekrarlanmasına sebep olabilmektedir. Bu durum, yapı ömrünü kısaltmakla birlikte, işgücü, zaman, ekonomi gibi kaynakların etkin kullanımını olumsuz etkilemektedir. Yakın dönemde, meydana gelen yıkıcı depremlerin, onarımı yeni tamamlanmış olan anıtsal yapıları, olumsuz etkilediğine şahit olunmuştur. Bu durumun aksine, yüzlerce yıllık anıtsal yapıların geçirdiği birçok felakete rağmen günümüze ulaşabildiğine de tanık olunmaktadır. Bu deneyim, bizlere geçmiş dönemde olsa bir yapının hem alt hem üst kotunda gerekli önlemlerinin alındığı takdirde, statik dengesini yüzyıllarca sürdürebilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir.

Çağdaş zemin güçlendirme uygulamalarının uzun vadede nasıl bir koruma sağlayacağı henüz öngörülemese de koruma ilkelerinin gereklilikleri büyük oranda yerine getirdiği söylenebilmektedir. Yapılan uygulamalar genelikle zemin alt kotunda yapılan uygulamalar olduğundan yapıların özgün sanatsal, yapısal ve mekansal nitelikleri kolaylıkla sürdürülebilmektedir. Ancak, uygulamaların zemin altında yürütülmesi, uygulama zorluklarını ve risklerini arttırmaktadır. Yapı üst kotundaki gibi yönetilemeyen zemin altındaki uygulamaların geri dönüşümü de oldukça zor olmaktadır. Yapılan zemin güçlendirme uygulamaları yapıyı ciddi oranda etkileyebilecek potansiyele sahip olmasına rağmen yapı ile doğrudan ilişkili uygulamalar değillerdir. Bu sebeple, riskleri doğru değerlendirilmiş zemin güçlendirme uygulamaları yapılara zarar vermemektedir. Ayrıca uygulamalar yapı estetiğine dahil olmadıklarından, yöntem seçiminde özgün malzeme ve teknik kaygısı güdülmemektedir.

Yapılan onarımlarda mimarlar, sanat tarihçileri, restorasyon uzmanları, arkeologlar ile geoteknik, inşaat mühendisleri ve malzeme uzmanlarının da bilgisine başvurulması gerekmektedir. Kültür mirası yapılarının korunması, çeşitli uzmanlıkların bir arada değerlendirilmesi ile mümkündür. Bu çalışma ile restorasyon alanındaki zemin güçlendirme çalışmaları için farkındalık oluşturulması hedeflenmekte, zemin ve zeminle ilgili çevresel etmenlerin değerlendirilerek koruma çalışmalarına yol gösterici olması düşünülmektedir.

Kaynaklar

[1] Mimari Mirasın Analizi, Korunması ve Strüktürel Restorasyonu İçin İlkeler, (2003). http://www.icomos.org.tr/Dosyalar/ICOMOSTR_tr0033791001536913477.pdf adresinden erişildi.

[2] Venedik Tüzüğü, (1964). http://www.icomos.org.tr/Dosyalar/ICOMOSTR_tr0243603001536681730.pdf adresinden erişildi.

[3] Işık, N., Geleneksel Yığma Yapılarda Taşıyıcı Sistem Hasarları ve Nedenlerinin Tespiti ile Güçlendirme ve Tamamlayıcı Müdahale Önerileri; Diyarbakır Suriçi Örneği, Doktora, Dicle Üniversitesi, 2017.

[4] Ahunbay, Z., Kültür Mirasını Koruma İlke ve Teknikleri, 2, İstanbul. YEM Yayın, 2021.

[5] Sarı, M. S., Temellerin Takviyesi ve Uygulamadan Örnekler, Yüksek Lisans, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2008.

[6] Ökten, Mehmet S., Balaban Ökten, B., Ekinci S., Altyapı ve Kazı Çalışmalarının Tarihi Yapılara Etkisi Şeyh Murad Efendi Mescidi, Adile Sultan Türbesi ve İskender Paşa Camii, bāb Mimarlık ve Tasarım Dergisi 2, 2, 200-219, 2021.

[7] T.C. Eyüpsultan Belediyesi, Adile Sultan Türbesi, 2024. https://www.eyupsultan.bel.tr/tr/main/pages/adile-sultan-turbesi/960 adresinden erişildi.

[8] Sesigür, H., Çılı, F. Edirne Mihrimah Sultan Camisinde Yapılan Onarım ve Güçlendirme Çalışmaları, Restorasyon Yıllığı Dergisi, 9, 72–79, 2014.

[9] Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Milli Saraylar Başkanlığı, Küçüksu Kasrı, 2023. https://www.millisaraylar.gov.tr/Lokasyon/6/kucuksu-kasri adresinden erişildi.

[10] Kültür Envanteri, Köroğlu, F.Y., İskender Paşa Camii, İstanbul, 2021. https://kulturenvanteri.com/yer/?p=50181 adresinden erişildi.

[11] Meriç Cevahir, Ç., Tarihi Taş Köprülerin Yapım Teknikleri ve Malzeme Kullanımı Açısından İncelenmesi. Yüksek Lisans, Bursa Uludağ Üniversitesi, 2019.

[12] Utkan, U., Tarihi Yapılarda Karşılaşılan Geoteknik Problemler ve Uygulanan Zemin İyileştirme Yöntemleri, Yüksek Lisans, Çukurova Üniversitesi, (2014).

[13] Taş Köprü Gazetesi, Gül, E., Adana'nın Kalbi, "YENİ CAMİİ", 2023. https://www.taskoprugazetesi.com/yazarlar/esra-gul/adana-nin-kalbi-yeni-camii/989/ adresinden erişildi.

[14] Utkan, U., Yıldız, A., Uç Karalar, R., Adana Yeni (Abdürrezzak Antaki) Cami ve Mersin Camili Köyü Cami Restorasyonlarında Karşılaşılan Geoteknik Problemler, 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, Erzurum, 219–234, 2015.

TARİHİ AHŞAP ÇATI BİRLEŞİM DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Büşra Nur GÜRGÜN[1], Nihan DOĞRAMACI AKSOYLAR [2], Mehmet Selim ÖKTEN[3]

[1]YL Öğrencisi, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, busranur.gurgun@stu.fsm.edu.tr
[2]Dr.Öğr.Üyesi, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, ndogramaci@fsm.edu.tr
[3]Doç.Dr., Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, selim.okten@msgsu.edu.tr

Özet

Tarihi ahşap çatılar ülkemizin yanı sıra dünyanın birçok ülkesinin kültürel mirasının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu çalışmada Beylerbeyi Sarayı tarihi ahşap çatı sistemi yapısal olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada ilk olarak ahşap çatının özgün durumunun teşhisi ve kullanılan yapı malzemeleri ile birleşim vasıtaları hakkında bilgi sahibi olmak için saha çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sırasında ahşap elemanlar, bağlantı detayları, birleştirme vasıtaları gibi çatıya özgün durumlar yerinde gözlemlerle değerlendirilmiştir. Daha sonra tarihi ahşap çatılarda kullanılan birleşim tiplerinden biri seçilerek deneysel olarak davranışı araştırılmıştır. Deneysel çalışmada tarihi ahşap çatıda kullanılan geleneksel yarım geçmeli "T" birleşim tipi incelenmiştir. Deney sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman grafiği incelendiğinde birleşim tipinin beklenenden daha sünek davranış sergilediği gözlemlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Beylerbeyi Sarayı, Tarihi Ahşap Çatı, Geçmeli Birleşim, Deneysel Çalışma.

Abstract

Historical timber roofs constitute a significant part of our cultural heritage as well as many countries of the world. In this study, the structural behavior of Beylerbeyi Palace timber roof structure has been evaluated. Firstly, field studies are carried out to understand the original condition of the historical roof, material and connection types. Then, one of the connection types of the historical timber roof is selected to investigate its behavior experimentally. One of the common typology of traditional timber connections half lap "T" joint is used in the experiments. As a result of the experiment, the force-displacement curve has been obtained. According to the curve, it is observed that the half lap connection exhibits more ductile behavior than expected.

Keywords: Beylerbeyi Palace, Historical Timber Roofs, Half Lap Connection, Experimental Study.

1. Giriş

İstanbul farklı dönemlerden kalma tarihi yapılarıyla zengin bir kültür mirasına sahiptir. Yüzyıllar boyunca farklı mimari üsluplarla şekillenen bu yapılar, korunması gereken yeri doldurulamaz birer varlıktırlar. Zaman içinde meydana gelen yangınlar, depremler gibi doğal afetler tarihi yapıların özellikle 20. yüzyıl ortalarına kadar İstanbul yapı stoğunda önemli yeri olan ahşap yapıların büyük bir kısmının kaybedilmesine neden olmuştur.

Tarihi yapıların gizli kalmış ögelerinden tarihi ahşap çatılar ise Türkiye'nin yanı sıra dünyanın birçok ülkesinin kültürel mirasının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Tarihi ahşap çatılar, binanın dışarıdan algılanmasında büyük etkisi olan hem yapısal hem de estetik değeri olan taşıyıcı sistem kurgusu alışagelmiş düzenden daha karmaşık yapılardır. Dönem içinde tarihi yapılarda gerçekleştirilen restorasyon çalışmaları tarihi yapılara ait özgün ahşap çatı sistemlerinin önemini de gözler önüne sermiştir. Çatı sistemlerinde geçilen açıklık, taşıyıcı eleman kesitlerinin yapının diğer kısımlarındaki taşıyıcılara göre daha büyük olması, kullanılan birleşimler ve birleştirme vasıtaları yapının yapıldığı döneme ait özgün detaylar sunması açısından oldukça önemlidir. Ancak bakımsızlık, çevresel etkiler, yangın ve deprem gibi doğal afetler nedeniyle çatıların yenilenmesi sonucunda özgün olarak günümüze ulaşan ahşap çatı sayısı son derece azdır. Farklı malzeme ve taşıyıcı sistem kurgusu ile yenilenmiş tarihi ahşap çatılar kültürel mirasın sürdürülebilirliğini etkilemektedir.

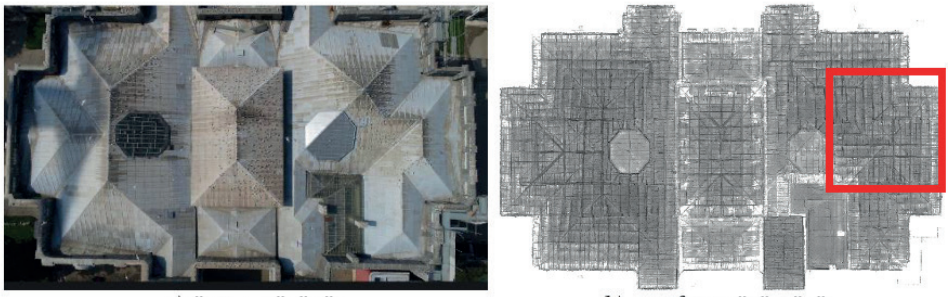
Ülkemizde tarihi yapılarla ilgili pek çok çalışma yapılmış olmasına rağmen ancak sınırlı bir kısmı tarihi ahşap çatılar üzerinedir. Bu çalışmalarda ise tarihi ahşap yapılar genellikle mimari açıdan değerlendirilmiş, yapısal değerlendirme ve iyileştirme/destekleme uygulamalarının ele alındığı az sayıda çalışma olduğu belirlenmiştir [1, 2]. Buna karşın Avrupa'da tarihi ahşap yapılarla ve özellikle çatı sistemleri üzerine kapsamlı projeler yürütülmüştür. Bu çalışmalar neticesinde tarihi yapılardaki ahşap çatı sistemlerinden çoğunun özgünlüklerinin korunamayarak değiştirildikleri ortaya çıkmıştır [3-7].

Bu çalışmada İstanbul'un önemli tarihi yapılarından birisi olan Beylerbeyi Sarayı ahşap çatı sisteminin yapısal olarak incelenmiştir. İlk olarak tarihi ahşap çatıda kullanılan yapı malzemeleri, eleman boyutları, birleşim tipleri ve birleştirme vasıtaları hakkında bilgi sahibi olmak için saha çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışmalar sırasında tarihi ahşap taşıyıcı ve taşıyıcı ol-

mayan elemanları, bağlantı detayları, birleştirme vasıtaları gibi çatıya özgün durumlar yerinde gözlemlerle değerlendirilmiştir. Daha sonra deneysel çalışmalarla davranışını değerlendirilmek üzere çatı bağlantı tiplerinden birisi seçilmiş ve özgün durumunu yansıtacak şekilde ürettirilerek monotonik deneyleri gerçekleştrilmiştir.

2. Beylerbeyi Sarayı Çatısı

İstanbul'da Beylerbeyi semtinde Sultan Abdülaziz tarafından 1863-1865 yılları arasında yaptırılan Beylerbeyi Sarayı, 19.yy. Osmanlı Dönemi mimari yapılarındandır. Beylerbeyi Sarayı yüksek bir bodrum kat üzerine iki katlı olarak dikdörtgen bir zemin alana inşa edilmiştir. Beylerbeyi Saray'ın ana binası Mabeyn ve Harem bölümlerinden oluşmaktadır [8]. Beylerbeyi Saray çatısı dört yönde kırma çatı olup üstten bütün cephe kenarlarını çevreleyen bir korkuluk ile gizlenmiştir. Ahşap çatı sistemine sahip olan Beylerbeyi Sarayı çatısı üç kısımdan meydana gelmektedir. Bunlar; güney kısmında Mabeyn bölgesi çatısı, kuzey kısmında Harem bölgesi çatısı ve orta kısımda yer alan Mavi Salon çatısıdır. Şekil 1'de Beylerbeyi Saray çatısının üstten görünüşü ve ortofoto görüntüsü verilmiştir.



a) üstten görünüş *b) ortofoto görüntüsü*

Şekil 1- Beylerbeyi Sarayı Çatısı

Yerinde yapılan gözlemler neticesinde Harem Bölgesi Valide Sultan Dairesi (Şekil 1'de kırmızı çerçeve) çatısının iki ana makas (kafes sistem) üzerine kurulduğu belirlenmiştir. Ana taşıyıcı kafes sistem elemanları üst başlık, dikme, diyagonal ve alt başlıktan oluşmuştur. Kuşaklama elemanı çift olarak uygulanmış, dikme ve üst başlıklara çivi ile sabitlenmiştir. Ana taşıyıcı ahşap kafes taşıyıcı sistem ile 13.61m açıklık geçilmiştir. Kafes taşıyıcılar

açıklığa dik doğrultuda 2.20m aralıklarla yerleştirilmiştir. Harem Bölgesi Valide Sultan dairesi çatısı ahşap taşıyıcı sistemi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2- Valide Sultan dairesi ahşam kafes çatı sistemi

Yerinde yapılan gözlemlerle Beylerbeyi Saray çatısının ahşap taşıyıcı sisteminin özgün durumu, kullanılan malzemelerin özellikleri, bağlantı tipleri ve detaylarının yanısıra birleştirme vasıtaları hakkında detaylı bilgi edinilmesi amaçlanmıştır. Çatıda sisteminde kullanılan birleşim tiplerine örnekler Şekil 3'te gösterilmiştir.



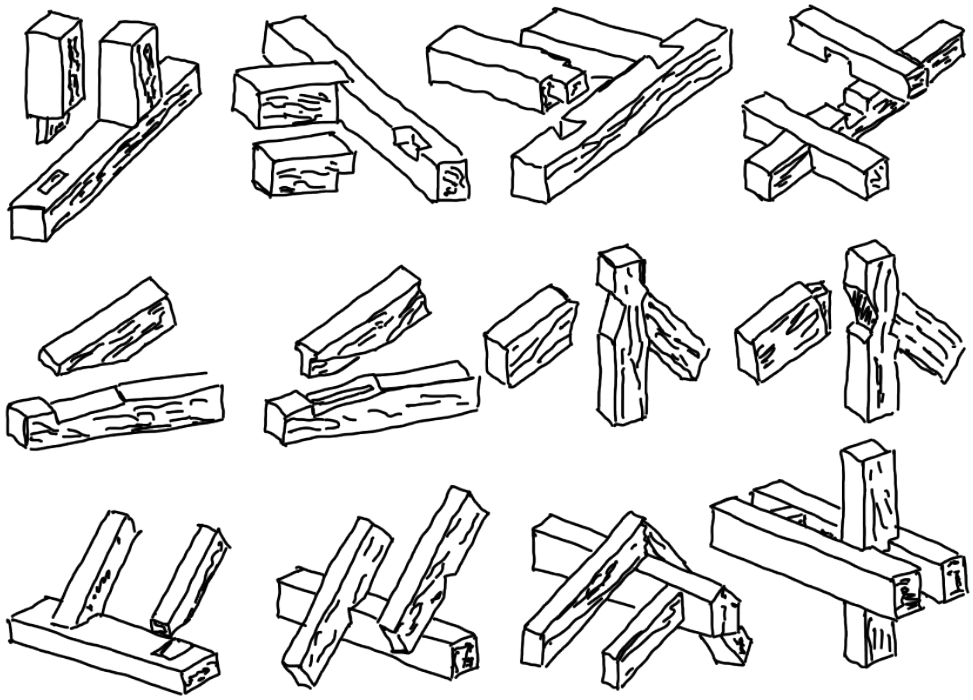


Şekil 3- Çatı sisteminde kullanılan birleşim örnekleri

Yerinde yapılan gözlemler sonucunda çatının taşıyıcı sistem elemanlarında ciddi bozulmaların olmadığı gözlemlenmiştir. En çok bozulmaların yastık kirişlerinde ve merteklerde olduğu gözlemlenmiş bunun temel nedeni ise yalıtım probleminden kaynaklanmıştır. Yağmur sularının çatı içine girmesinden dolayı bozulmaya maruz kalan tüm elemanların yenilenme çalışmaları devam etmektedir.

3. Birleşim Tipleri

Tarihi ahşap yapılarda kullanılan birleşimler incelendiğinde kuvvet aktarımı açısından iki ana gruba ayrılabilir. Bunlardan ilki geleneksel bağlantı tipi olarak tanımlanan elemanlar arasındaki kuvvet aktarımının temas yüzeyleriyle sağlandığı birleşimlerdir. Kuvvet aktarımında kullanılan temas yüzeylerinin iyi bir marangozluk işçiliği ile hazırlanması gerektiğinden bu birleşimlere "Marangoz Birleşimleri" de denilmektedir [9]. Genellikle tarihi yapılarda bulunan bu tip birleşimler geçmeli ve/veya ahşap çubuk kamalı olarak uygulanmaktadır. İkinci grupta ise elemanlar arasında yük aktarılmasında çivi, bulon, tutkal gibi birleştirme vasıtalarından yararlanılır. Tarihi ahşap yapılarda ve çatılarda kullanılan çeşitli geleneksel bağlantı tipleri Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4- Tarihi ahşap çatılarda kullanılan geleneksel bağlatı tipleri [10]

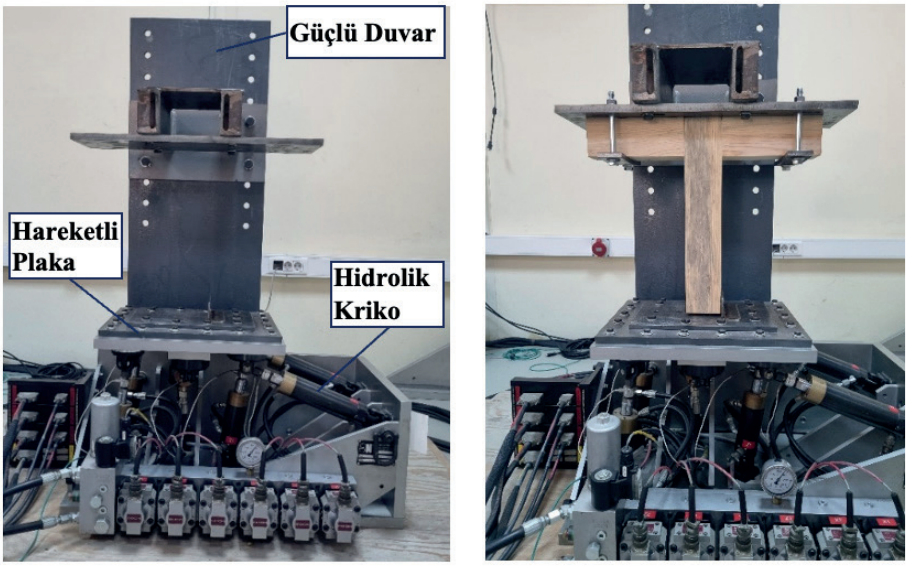
Tarihi ahşap çatı birleşim davranışının araştırılmasında yapıldıkları dönemin yapım tekniklerinin bilinmesi oldukça önemlidir. Bunun başlıca sebebi endüstri devriminden önce 19.yy başlarına kadar tarihi çatı sistemlerinin tasarımının geleneğe, deneme yanılmaya ve marangoz ustalığına bağlı gerçekleştirilmesiydi. Özellikle yapıldıkları dönemde koruma sağlayan kimyasal ve fiziksel teknikler olmadığından ahşap malzemeyi tanıyan, doğasını bilen, kullanım ve sınırlamalarına ilişkin derin bilgiyi kullanarak ahşap çatıların dayanıklılığını artıracak farklı kullanım uygulamaları geliştiren marangoz ustalığı yapıları olmuşlardır. Günümüzde neredeyse kaybolan bu teknikler hakkında bilgi sahibi olabilmek sadece tarihi yapılarda kalan sınırlı özgün sistemlerin analiz ve testleriyle mümkün olmaktadır [10].

Bu çalışmada çivi, bulon gibi birleştirme vasıtaları kullanılmadan sadece ahşap kullanım esasına dayanan elemanda geçmeler oluşturularak gerçekleştirilen geleneksel bağlantı tipi deneysel olarak incelenmiştir. Marangoz ustalığının baskın olduğu tarihi ahşap yapıların neredeyse hemen hepsinde

bu tip bağlantılara rastlamak mümkün olsa da yük taşıma kapasiteleri sınırlı olduğundan tek veya iki katlı yapı türlerinde ya da çatı makaslarında kullanılması tercih edilmiştir.

3. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalarda ahşap malzemeden üretilmiş birleşim elemanının davranışı incelenmiştir. Deneysel çalışmalar Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi "Yapı Mekaniği ve Deprem Araştırma Laboratuvarı" nda gerçekleştirilmiştir. Altı serbestlik dereceli yük ve deplasman hücresi her üç eksen doğrultusunda öteleme veya kuvvet ve her üç eksen etrafında dönme veya moment olarak aldığı komutları deney numunesine verebilmektedir. Deneyler deplasman ve kuvvet kontrollü olarak yapılabilmektedir. Deneylerde kullanılan hücrenin fotoğrafı Şekil 5'te, teknik kapasitesi ise Tablo1'de verilmiştir.



Şekil 5- Yük ve deplasman hücresi

Tablo 1- Yük ve deplasman hücresinin teknik kapasitesi

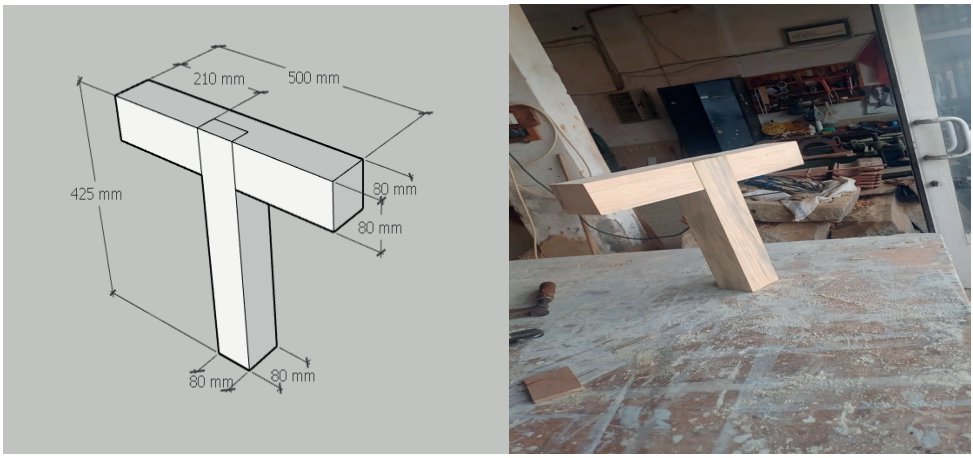
	X doğrultusu	Y doğrultusu	Z doğrultusu
Yer Değiştirme	**± 50 mm**	± 25 mm	± 25mm
Dönme	± 11.6°	± 9.4°	± 20.4°
Kuvvet	**18.6**/31kN (B/Ç)	**9.3**/15.6kN (B/Ç)	**27.9**/46.8kN (B/Ç)
Moment	2.2 kNm	2.6 kNm	2.2 kNm

Bu çalışmanın en önemli kısımlarından birisi tarihi çatı bağlantılarındaki davranışlarını değerlendirmek için kullanılacak deney numunelerin tasarlama ve hazırlama süreci olmuştur. Deneylerde kullanacağımız ahşap numunelerin boyutlarının belirlenmesi ve birleşim detayının oluşturulmasında en önemli kısıtlama yük ve deplasman hücresinin teknik kapasite değerleri olmuştur. Yük ve deplasman hücresinde güçlü duvar, hareketli plaka ve hidrolik krikoların kapasiteleri dikkate alınarak numunelerin geometrik özellikleri ile yük hücresine bağlantı detayları belirlenmiştir.

3.1. Deney Numunesi

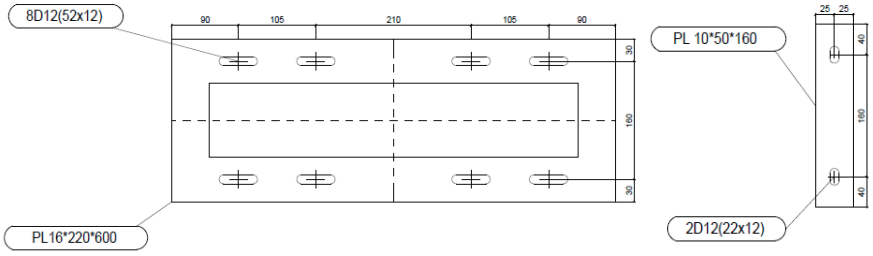
Tarihi yapılarda kullanılan geleneksel bağlantı tiplerinin davranışını tanımlamak için bir seri monotonik deney planlanmıştır. Deneylerin ilk seti olarak yarım geçmeli "T" birleşim seçilmiştir. Bu birleşimlerde ahşap elemanlar çivi, bulon vb. gibi birleştirme vasıtaları kullanılmadan birleşim bölgelerinin mekanik olarak elle düzenlenmesiyle oluşturulmuştur. Ahşap elemanların boyutlandırılması yük ve deplasman hücresinin Tablo 1'de koyu gösterilen kapasite değerleri dikkate alınarak TS647 ve EN 1995-1-1 yönetmeliklerine göre gerçekleştirilmiştir.

Deneylerde 80x80 mm kare kesitli masif ahşap eleman 425mm ve 500mm uzunluğunda kestirilerek kullanılmıştır. Ahşap elemanlar yarım geçmeli olarak marangozluk yaklaşımıyla T şeklinde üst üste birleştirilmişlerdir. Deneyler için 2 adet aynı özelliklere sahip numune ürettirilmiştir. Ahşap elemanlarda 1.sınıf sarıçam malzeme kullanılmıştır. Deney numunesine ait geometrik özellikler Şekil 6'da ayrıntılı olarak verilmiştir.



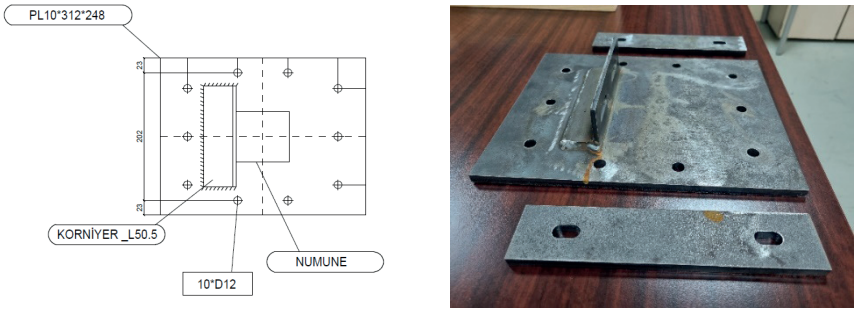
Şekil 6 –Deney numunesinin geometrik özellikleri

Deneylerde T şeklindeki ahşap bağlantının yatay elemanı güçlü duvar görevi gören çelik konstrüksiyona rijit davranış gösterecek şekilde bağlanmıştır. Bu amaçla Şekil 7'de geometrik özellikleri verilen çelik plaka ve levhalar ürettirilmiştir. Ahşap eleman M12 bulonları yardımıyla güçlü plakaya tamamen tutulu olacak şekilde sabitlenmiştir.



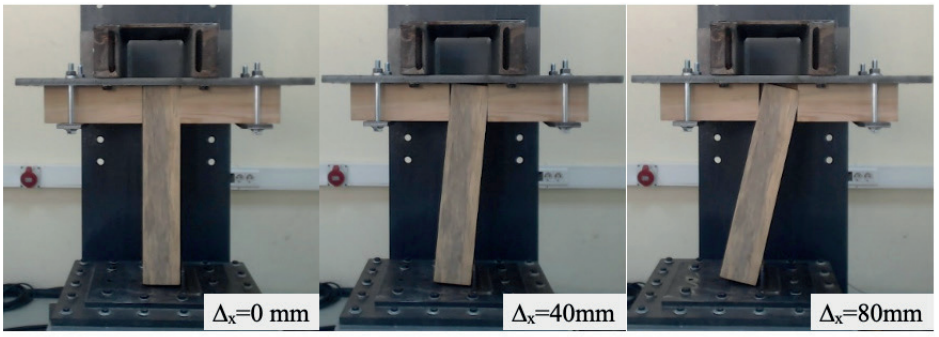
Şekil 7 – Deney numunesini güçlü duvara bağlayan üst levha detayları

Deneyler düşey elemanın serbest ucundan yük ve deplasman hücresinin hareketli plakası vasıtasıyla yatay deplasman uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla hareketli plaka üzerine yatay yükü verebilmek için levha ve korniyerden oluşan bir çözüm oluşturulmuştur (Şekil 8).



Şekil 8 – Deney numunesini hareketli plakaya bağlayan alt levha detayları

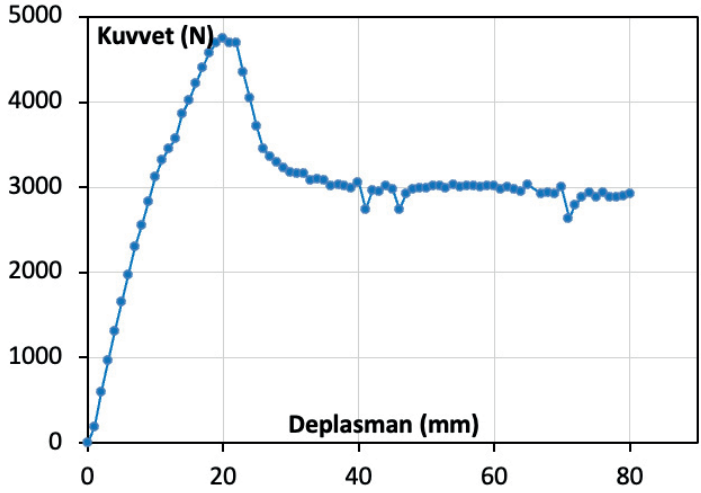
Düşey elemanının serbest ucu tarafından yük ve deplasman hücresinin hareketli yüzeyine yatay eksende öteleme, Δ_x, 1 birimlik deplasman etkitilerek, oluşan kuvvet değerleri her bir hidrolik krikonun ucunda bulunan yük ölçerler yardımıyla hesaplanmıştır. Yatay eksende 80mm'ye kadar 1 mm deplasman adımıyla gerçekleştirilen ,Δ_x öteleme deneyleri sonucunda her bir deney adımında birleşim bölgesinde ortaya çıkan etkiler hesaplanmıştır. Şekil 9'da Δ_x=0, Δ_x=40 ve Δ_x=80mm deney adımları için numunede meydana gelen deformasyon gösterilmiştir.



Şekil 9 – Deney numunesini hareketli plakaya bağlayan alt levha detayları

Deney sonucunda yarım geçmeli "T" tipi ahşap birleşimin elde edilen kuvvet deplasman grafiği Şekil 10'da verilmiştir. Başlangıçta her bir yük adımına karşılık gelen yer değiştirme davranış lineer ve elastiktir. Yük 4800 N'na ulaştığında birleşimin yük taşıma kapasitesinde hızlı bir düşüş gözlemlenmiştir. Sonrasında birleşim yük almasa dahi şekil değiştirme yapmaya devam etmiştir. Toplam taşıma kapasitesinin %40'ını ani olarak kaybettikten

sonra kalan %60 kapasitesini akma yer değiştirmesinin 4 katı olan 80mm ye kadar korumuştur. Bu durum birleşimin tahmin edilenin üzerinde süneklik göstermektedir. Yapılacak ilave deneysel çalışmalar ile davranışın incelenmesinde fayda vardır. Deney tamamlandığında numunede meydana gelen şekil değiştirmeler Şekil 11'da gösterilmiştir.



Şekil 10 – T tipi ahşap birleşiminin kuvvet deplasman grafiği



Şekil 11 – Deney sonucunda numunede meydana gelen deformansyonlar

4. Sonuçlar

Tarihi yapıların ahşap çatı sistemleri ülkemiz ve dünyanın birçok ülkesinin kültürel mirasını oluşturan önemli öğeleridir. Bu çalışmada İstanbul'un önemli tarihi yapılarından Beylerbeyi Sarayı ahşap çatı sistemi yerinde yapılan gözlemlerle değerlendirilmiş ve çatı sisteminde kullanılan geleneksel birleşim tiplerinden bir tanesi seçilerek davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında gerçekleştirilen saha çalışmalarında tarihi ahşap çatıda kullanılan yapı malzemeleri, eleman boyutları, birleşim tipleri ve birleştirme vasıtaları hakkında bilgi edinilmesinin yanısıra yapısal güvenlik değerlendirmesi yapılmıştır. Saha çalışmaları sonucunda çatı taşıyıcı sistem elemanlarında ciddi bozulmaların olmadığı gözlemlenmiştir. Tarihi çatı sisteminde en çok bozulmanın yastık kirişleri ve merteklerde olduğu bunun sebebinin ise yağmur sularının çatı içerisine girmesinden kaynaklı yalıtım problemi olduğu gözlemlenmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ahşap çatı sisteminde kullanılan geleneksel bağlantı tiplerinden biri deneysel olarak incelenmiştir. Monotonik deneyleri gerçekleştirilen yarım geçmeli "T" birleşime ait kuvvet-deplasman eğrisi elde edilmiştir. Kuvvet deplasman eğrisinden görüldüğü üzere birleşimde doğrusal sınır aşıldıktan sonra dayanımda ve rijitlikte ani düşüş gözlemlenmiştir. Birleşim maksimum taşıma yükünün %40'ını akma noktasından sonra çok hızlı kaybetmesine rağmen %60 taşıma kapasitesini yüksek süneklikle korumuştur. Bunun nedeni olarak geçmeli mekanik birleşimde maksimum yük aşıldıktan sonra devreye giren basınç ezilmesine çalışan yüzeylerin olduğu düşünülmektedir. Ayrıca yapılan deneysel çalışmalar monotonik olarak gerçekleştirilmiştir, çevrimsel deneylerinde yapılması birleşim davranışının incelenmesine katkı sağlayacaktır. Çalışamnın bir sonraki adımında ise deneysel çalışmalarla davranışları belirlenen birleşimlerde çatı sistemlerinin doğal dokularını bozmadan yapılabilecek koruma, onarım ve güçlendirme teknikleri incelenecektir.

Tarihi ahşap çatılarda birleşim davranışlarının anlaşılması için özgün malzeme ve detaylar kullanılarak farklı birleşim tipleri için deneysel çalışmaların artırılması faydalı olacaktır.

Teşekkürler

Bu bildiri FSMVU BAP birimi tarafından desteklenen 2023B1Ç01D nolu "Beylerbeyi Sarayı Ahşap Çatı Sistemi Birleşim Davranışının Değerlendirilmesi" projesi kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan hazırlanmıştır. Yazarlar çalışma süresince gerekli izinler için ve verdikleri destekten dolayı Milli Saraylar İdaresi Başkanlığına teşekkürlerini sunarlar.

Kaynaklar

Uzun S., Tarihi Ahşap Yapı Taşıyıcı Sistemlerinin İncelenmesi ve Boğaziçi Örneği: Amcazade Hüseyin Paşa Yalısı. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ, 2018.

Ökten M.S., 19. Yüzyıl İstanbul'unda Tarihi Ahşap Çatı Sistem Örnekleri ve Onarımları,

İstanbul Sabahattin Zaim Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi (2023) 5 (1): 1-7, 2023.

Parisi, M.A. ve Piazza, M., Seismic Behavior and Retrofitting of Joints in Traditional Timber Roof Structures. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 22; 1183-1191, 2002.

Parisi, M. A., Chesi, C. ve Tardini, C., Seismic Vulnerability of Timber Roofs, Advanced Materials Research. 778:1088-1095 2013.

Serafini, A., Gonzalez Longo C., Seventeenth and Eighteenth Century Timber Roof Structures in Scotland: Design, Pathologies and Conservation. 10th Int. Conf. on Structural Analysis of Historical Constructions, Leuven, Belgium, 2016.

Cestari C.B., Marzi T., Conservation of Historic Timber Roof Structures of Italian Architectural Heritage: Diagnosis, Assessment, and Intervention, Int. Journal of Architectural Heritage, 12:4, 632-665, 2018.

Mosoarca M., Keller A.I., A Complex Assessment Methodology and Procedure For Historic Roof Structures, International Journal of Architectural Heritage, 12:4, 578-598, 2018.

URL-1: https://www.millisaraylar.gov.tr/Lokasyon/4/index.html, Erişim Tarihi: 10.06.2024

Odabaşı, Y., Ahşap ve Çelik Yapı Elemanları, Beta Basım, İstanbul, 1997.

Larsen, K.E ve Marstein, N., Conservation of Historic Timber Structures: An Ecological Approach, Oslo, 2016.

TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI ANKARA ŞUBESİ
TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI DİYARBAKIR ŞUBESİ
ODEYA ENDAZYARÊN AVAHÎYÊ

TARİHİ YAPILARDA TESPİT EDİLEN SORUNLARIN YAPI MALZEMELERİ ÜZERİNDEN İYİLEŞTİRİLMESİ

Ebru KILIÇ BAKIRHAN[1]

[1]Araştırma Görevlisi, Karabük Üniversitesi, ebrukilic@karabuk.edu.tr

Özet

Tarihi yapılar günümüz şartlarına uyum sağlayabilmeleri ve varlıklarını sürdürebilmeleri adına çeşitli müdahalelere ihtiyaç duyabilmektedir. Bu süreçte yapılarda tespit edilen sorunların yenilikçi bir çerçevede ele alınarak tarihi dokuya ve çevreye zarar vermeden giderilmesi gerekir. Bu çalışmada yıllar içerisinde tarihi yapılarda görülen aksaklıklar ve ihtiyaçlar ele alınarak bunların yapı malzemesi ölçeğinde giderilmesine yönelik çözüm önerileri sunulmuştur. Çalışmanın metodolojisine göre, nem sorunu, enerji performansı, termal konfor, çevresel etkiler ve iç mekân hava kalitesi olarak belirlenen beş farklı kategoride yakın zamanda literatüre kazandırılmış çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışma, yeni malzeme ve teknoloji kullanımının tarihi çevre kadar doğal çevreye olan etkilerinin de incelenmesi açısından bilinçlendirici bir yaklaşıma sahiptir.

Anahtar Sözcükler: Tarihi çevre, Doğal çevre, Koruma, Mimari sürdürülebilirlik, Malzeme iyileştirmeleri.

Abstract

Historic buildings may need various interventions to adapt to changing conditions and maintain their existence. The problems identified in the buildings should be addressed in an innovative framework and should be eliminated without harming the historical texture and the environment. In this study, the problems and needs of historical buildings over the years are discussed and solutions are proposed to eliminate them on the scale of building materials. Recent studies in five different categories, namely humidity and dampness, energy performance, thermal comfort, environmental impacts, and indoor air quality, were examined. This study has an awareness-raising approach in terms of examining the effects of the use of new materials on the natural environment as well as the historical environment.

Keywords: Historic environment, Natural environment, Conservation, Architectural sustainability, Material improvements.

1. Giriş

İnşa edildiği döneme ait fiziksel özelliklerini bütüncül bir şekilde barındıran ve toplumsal, görsel veya tarihi açıdan bir değere sahip yapılar, tarihi bina kategorisinde değerlendirilmektedir [1]. Ayrıca kültürel mirasa ait olan bir yapının 100 yıl boyunca yıkılmadan ayakta kalması ona 'tarihi yapı' unvanı alma hakkı tanır [2]. Ancak bu kadar uzun süre tarihe tanıklık eden yapılarda yıllar içerisinde değişen çevresel koşullar, kullanıcı hataları veya yapı malzemelerinin ömrünü tüketmesi nedeniyle çeşitli deformasyonlar görülmeye başlar. Bu tür sorunların üstesinden gelinmesinde yeni malzeme ve tekniklerden faydalanılması, yapıların ömrünü uzatarak tarihi yapıların sürdürülebilirliğe katkı sunabilmektedir [3].

Tarihi yapıların koruma işlerinin yapının bütünlüğünü bozmayacak şekilde gerçekleştirilmesi gerekir. Ancak koruma işlemleri doğal kaynakların kullanıldığı, atık malzemelerin ortaya çıktığı, maliyetli ve özen gerektiren bir süreçtir. Bu sürecin doğal ve yapılı çevreye en az etki edecek şekilde yürütülmesi elzemdir. Tarihi binaların restorasyonunda kullanılan malzemeler, yapı ile uyumu, rengi, dokusu, işlevi ve özellikleri açısından dikkatle seçilmelidir.

2. Tarihi Yapıların Sorunları

Bu çalışmada tarihi yapılarda sıkça görülen nem sorunu, düşük enerji performansı, termal açıdan konforsuzluk, olumsuz çevresel etkiler ve düşük iç mekan hava kalitesine yönelik gerçekleştirilen malzeme ölçeğindeki çalışmalar derlenerek yorumlanmıştır. Böylelikle kültürel mirasın korunmasına yönelik alınması gereken önlemlerin gözler önüne serilmesi ve koruma işiyle ilgilenen yetkililerin bilinçlendirilmesi amaçlanmıştır.

2.1. Nem sorunu

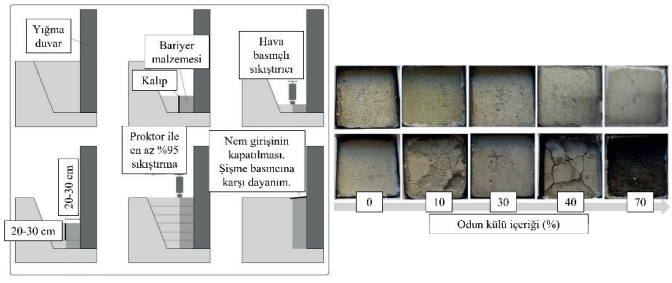
Yapı malzemelerinde yıllar içerisinde meydana gelen hasar, topraktan gelen neme karşı yapıyı savunmasız hale getirebilir. Nem, yapı strüktürüne ve kaplamalara zarar vererek bina kabuğunda gerçekleşen ısı alışverişini artırır ve bu durum binanın enerji tüketiminin de artmasına neden olur. Ayrıca kullanıcılarda konforsuzluk hissine de yol açan iç mekanlardaki yüksek nem artışı, küf oluşumuna ve bina kullanıcılarında çeşitli sağlık problemlerinin

gelişmesine neden olabilmektedir [4].

Tarihi yapılardaki nem artışı, yapının taşıyıcı sisteminin zarar görmemesi adına üstesinden gelinmesi gereken ciddi bir sorundur. Bu aşamada düşük maliyetli, tarihi dokuda en az etkiye neden olacak nem bariyerlerinden faydalanılabilir. Piyasada düşük hidrolik iletkenliğe sahip olarak satılan bentonit kil-kum karışımı ve buzul tortusu içeren farklı bariyerler tarihi bir bina kapsamında değerlendirilmiş ve test edilen toprak numunelerinin zeminden nem girişi ve buna bağlı gerçekleşen hasarı önlemede etkili olabileceği görülmüştür [5].

Neme maruz kalmış tarihi binalardan nemin uzaklaştırılmasında kireç harcının içine katılan odun külü de etkili olabilmektedir [6]. Yapılan bir çalışmada kireç harcına %20 ila %40 oranında katılan odun külünün harç üzerinde puzolanik aktivite göstererek kılcal doygunlukta odun külü içermeyen harçlara göre daha fazla suyu emdikleri ortaya çıkmıştır (Tablo 1). Bunun nedeninin harç içeriğindeki gözenek sayısının artması olduğu bilinmektedir. Kullanılan biyokütle özelliğindeki odun külü, nemli ortamlarda bulunan yığma duvarların derzlerinin onarılmasında, belirtilen ideal oranlarda olmak kaydıyla, kullanılabilir. Bu oranların üzerine çıkılması durumunda ise kuruma aşamasında harçta büzülmeler gözlemlenmiştir [6].

Tablo 1. Nem sorunu ve olası çözümler

Sorunlar	Nemin bina strüktürüne zarar vermesi, dayanımı düşürmesi, kullanıcı konforsuzluğuna neden olması ve yalıtımı zedelemesi sonucunda binanın enerji tüketiminde artışa neden olması.
Olası çözümler ve yapıda kullanım alanları	Yığma duvarların toprakla temas eden yüzeyinde kil bariyerlerinin [5] ve kireç harcında odun külünün kullanımı [6].  Yukarıdaki görsellerde yığma duvara uygulanan kil bariyerin inşa aşamaları (solda) ve farklı oranlarda odun külü içeren kireç harcındaki bozunmalar (sağda) gösterilmektedir.

İyileştirilen özellikler	Tarihi dokuya minimum müdahale, malzeme gözeneklerinin kapatılarak nem girişinin ve hasarın önüne geçilmesi.

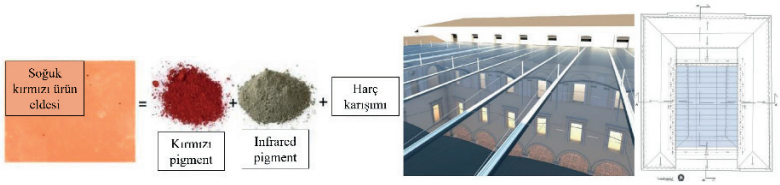
2.2.Düşük Enerji Performansı

Tarihi yapıların enerji tüketimlerinin azaltılmasında genellikle içten uygulanan yalıtım katmanı ve bunun yeterli gelmemesi durumunda aktif olarak enerji tüketen cihazlarla iyileştirmelere gidilir. Yakın zamanda bu yöntemlere ek olarak etkin şekilde enerji verimliliği sağlayacak yenilikçi çözüm ve malzemelerin arayışına girişilmiştir.

Bu çalışmalardan biri İtalya'da gerçekleştirilen soğuk renkli cephe malzemelerinin kullanımıdır. Ilık veya sıcak iklimlere sahip bölgelerde termal konforun sağlanması ve soğutma yükünün düşürülmesi adına genellikle açık renkli elemanlar tercih edilmektedir. Ancak tarihi çevrelere hâkim olan renkler gri veya kırmızı tonlarındadır. Bu durum dikkate alınarak seçilen tarihi bir yapı üzerinden yürütülen çalışmada, enerji performansının iyileştirilmesi adına tarihi binaların dış görünüşüne etki etmeden yenilikçi, soğuk renkli, çimento bazlı malzeme kullanımı önerilmiştir. Harçlara renk pigmentleri eklenerek oluşturulan bu yeni cephelerin yüzey sıcaklıkları geleneksel cephelerle kıyaslandığında 8°C düşüş ve soğutmadan kaynaklı enerji tüketiminde %3 oranında azalma sağlandığı görülmüştür [7].

Gerilebilir membranlar, maliyet etkin ve sürdürülebilir bir şekilde binaların strüktürel performanslarını iyileştirmek için yaygın olarak tarihi binalarda uygulanmaktadır. Ancak bu tür membranların iç mekân konforuna ve enerji tüketimine olan etkilerini ortaya koymak önemlidir. Bu amaçla İtalya'da yer alan ve orta avluya sahip tarihi bir yapının orta avlusunun plastik bir polimer türü olan ETFE ile kaplanmasının binanın enerji performansına olan etkisi araştırılmıştır (Tablo 2). Enerji simülasyonlarının sonucunda, uygulanan membran sayesinde özellikle kış aylarında en yüksek enerji kazanımının sağlandığı görülmüştür. Yıllık karbon salımlarında sıcak aylarda %6, soğuk aylarda %10 düşüş gözlemlenmiştir [8].

Tablo 2. Enerji performansının iyileştirilmesine yönelik olası çözümler

Sorunlar	Enerji performansında düşüş, iklim değişikliği, geleneksel iyileştirme hamlelerinin yetersiz olması.
Olası çözümler ve yapıda kullanım alanları	Yapı kabuğunda soğuk renkli malzemeler [7] ve avlu üzerinde ETFE membran kullanımı [8].  Yukarıdaki görsellerde soğuk renk pigmenti eklenen harç karışımı (solda) ve tarihi bina avlusuna gerilen üst örtünün detayları (sağda) gösterilmektedir.
İyileştirilen özellikler	Termal konfor, enerji performansı, maliyet etkinliği, strüktürel performans, çevresel etkiler.

2.3.Termal Konfor Eksikliği

Küresel çapta gerçekleşen iklim değişikliği tarihi yapıların iç mekân sıcaklıkları ve dolayısıyla kullanıcıların termal konforu üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Bu nedenle mevcut binalar daha fazla aktif sistemlere bağlı kalmakta ve yeni binalara göre bu tür yapıların enerji tüketimleri artış göstermektedir. Neticede daha fazla karbon salımı gerçekleşmekte ve küresel ısınma artış göstererek iklim değişiklikleri de bundan payına düşeni almaktadır. Bu kısır döngüden çıkabilmek adına termal konforun sağlanması, konunun kilit noktasını teşkil etmektedir [9].

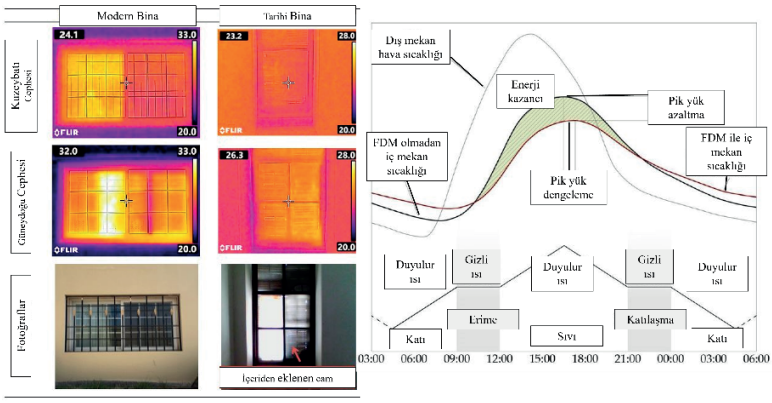
Termal konforun sağlanmasında aktif sistemlerin büyük rol üstlendikleri ve kullanımları süresince harcanan enerjinin tarihi binaların mevcut enerji tüketiminden daha az olduğu bilinse de [9], aktif sistemlerden önce pasif tasarım ilkeleri bağlamında malzemelerin sağladıkları avantajların irdelenmesi mimari sürdürülebilirliğin sağlanması açısından esastır.

Bu pasif ilkelerden biri olan termal kütlelerin kullanımının ısıl konforun sağlanmasında etkili olduğu bilinmektedir. Doğru yönelim, cam seçimi, gölgelendirme elemanları ve havalandırma ile bu etki daha da güçlendirilebilmektedir. Özellikle sıcak iklimlerde konfor şartlarının sağlanmasında cam türü seçiminin termal kütleden daha etkili olduğu bilinmektedir. Tüm

bu bahsi geçen yapı malzemelerinin ekstrem hava koşullarında ve gerekli görüldüğü durumda aktif sistemlerle desteklenmesi, ısıl konfor ve enerji performansı açısından etkili olacaktır [10].

Diğer yandan tarihi binaların çoğunluğunda halihazırda termal kütle kullanıldığı bilinmektedir. Ancak termal kütlenin yeterli olmadığı durumlarda restorasyon aşamasında faz değiştiren malzeme (FDM) içeren harçların kullanımı, binaların termal ataletini iyileştirebilir ve bu müdahale aynı zamanda tarihi binanın dış görünüşüne etki etmez (Tablo 3). Kireç harcına granül parafin FDM'nin eklendiği deneysel ve sayısal bir çalışmada, ağırlıkça %10 FDM harcı içeren numunenin referans numuneye göre enerji kullanımında %9-18 düşüş ve malzemenin termal iletkenliğinde %22,5 azalma sağladığı gözlemlenmiştir [11].

Tablo 3. Termal konforun iyileştirilmesine yönelik olası çözümler

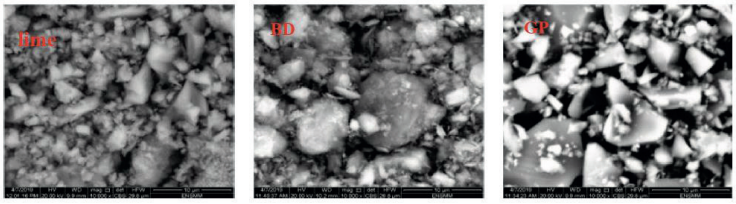
Sorunlar	Termal konforsuzluk ve buna dayalı enerji tüketiminde gerçekleşen artış, küresel ısınma, karbon salımlarındaki artış.
Olası çözümler ve yapıda kullanım alanları	Yapı kabuğunda termal kütle kullanımı, uygun cam seçimi, gölgelendirme elemanları [10] ve FDM uygulamaları [11]  Yukarıdaki görsellerde 2020 yılı ilkbahar sezonunda saat 10:00-14:00 aralığında elde edilen tarihi ve modern binalara ait termal kamera görüntüleri (solda) ve FDM kullanımından kaynaklanan enerji kazanımı (sağda) gösterilmektedir.
İyileştirilen özellikler	Termal konfor, enerji performansı, maliyet etkinliği, aktif sistemlere olan bağımlılığın azaltılması, çevresel etkiler.

2.4. Olumsuz Çevresel Etkiler

Tarihi yapıların korunmasında kullanılan her yeni malzeme yeni ham madde ihtiyacını da beraberinde getirerek çevre üzerinde bir yük oluşturur. Bunun çözümlerinden biri de atık malzeme kullanımına yönelmektir. Bu sayede yapı malzemelerinin mekanik ve fiziksel özelliklerinin geliştirilebilmesinin yanı sıra çevresel etkilerinin düşürülebilmesi de mümkün olabilmektedir.

Kuzey Cezayir'de gerçekleştirilen bir çalışmada kireç harçlarına eklenen %30 oranındaki seramik atığı ve cam şişelerden elde edilen cam tozu sayesinde puzolanik aktivitenin görüldüğü ve özellikle basınç dayanımında artış sağlandığı tespit edilmiştir. Sınanan numuneler arasında %30 oranında cam tozu içeren harçta, en düşük açık gözenekliliğe sahip olması nedeniyle suya karşı en yüksek direncin sağlandığı görülmüştür (Tablo 4). İyileştirilen özelliklerin yanı sıra ham madde ihtiyacının kullanılan atık oranınca düşürülmesi çevresel açıdan kayda değerdir [12].

Tablo 4. Çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik olası çözümler

Sorunlar	Artan karbon salımı ve ham madde ihtiyacı.
Olası çözümler ve yapıda kullanım alanları	Harçlarda atık taş, cam ve tuğla tozu kullanımı [12].  Yukarıdaki görselde harçlara ait SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri yer almaktadır.
İyileştirilen özellikler	Malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, çevresel etkilerin düşürülmesi.

2.5. Düşük İç Mekan Hava Kalitesi

Tarihi binalarda kullanılan yeni malzemeler, açığa çıkardıkları uçucu organik bileşikler nedeniyle iç mekanlarda çeşitli sağlık sorunlarını da beraberinde getirebilir. Bu nedenle tercih edilen yeni malzemelerin formaldehit gibi kansere yol açan madde içeriklerinin önceden tespit edilmesi, kullanıcı sağlığı açısından son derece önemlidir. İç mekân hava kalitesinin düşük olduğu or-

tamlarda hasta bina sendromu görülebilmektedir. Bu sendrom, alerji, astım, öksürük, yorgunluk, baş ağrısı, göz ve burunda tahriş gibi rahatsızlarla kendini belli etmektedir [13].

Yeşil yapı malzemelerinin kullanımı ile iç mekanlarda istenen hava kalitesinin sağlanabilmesi mümkündür. Tayvan'da yapılan bir araştırmada yasalarla güvence altına alınan iç mekan hava kalitesinin standartlarına ve yeşil malzeme özelliklerine değinilmiştir. 2000'li yılların başından beri sağlanan farkındalık ve denetimde sağlanan etkinlik nedeniyle piyasadaki ürünlerin %75'inin yeşil yapı malzemelerinden oluştuğu bildirilmiştir. Binanın iç yüzey alanının en az %45'i ve dış mekana bakan yüzey alanının en az %10'unun yeşil yapı malzemelerinden oluşmasının gerekliliği standartlarla belirtilmiştir. Bina Teknik Yasası'nda yer alan geri dönüştürülmüş plastik, kauçuk, tuğla ve ahşabın yanı sıra EPA tarafından belirlenen zehirli malzemeleri içermeyen ve Montreal Protokolü'ne uygun yalıtım ürünleri, su bazlı boya ve kaplamalar ve diğer sertifikalı malzemeler yeşil yapı malzemelerini oluşturur (Tablo 5). Bu tür malzemelerin çevreye ve insan sağlığına karşı zararsız olması ve ulusal standartlara uygun olması zorunludur [14].

Tablo 5. İç mekân hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik olası çözümler

<table>
<tr><td>Sorunlar</td><td>Düşük iç mekân hava kalitesi, hasta bina sendromu, kanserojen madde içerikleri.</td></tr>
<tr><td>Olası çözümler ve yapıda kullanım alanları</td><td>Yeşil yapı malzemelerinin kullanımı [14]
<table>
<tr><th rowspan="2">İç ortamdaki hava kirleticileri</th><th colspan="2">Standard</th></tr>
<tr><th>Konsantrasyon</th><th>Test süresi</th></tr>
<tr><td>Karbondioksit (CO_2)</td><td>1000 ppm</td><td>8 sa</td></tr>
<tr><td>Karbonmonoksit (CO)</td><td>9 ppm</td><td>8 sa</td></tr>
<tr><td>Formaldehit (HCHO)</td><td>0,06 ppm</td><td>1 sa</td></tr>
<tr><td>T. uçucu organik bileşikler</td><td>0,56 ppm</td><td>1 sa</td></tr>
<tr><td>Bakteri</td><td>1500 CFU/m³</td><td>Tavan değer</td></tr>
<tr><td>Mantar</td><td>1000 CFU/m³</td><td>Tavan değer</td></tr>
<tr><td>Kaba partiküller (PM10)</td><td>75 µg/m³</td><td>24 sa</td></tr>
<tr><td>İnce partiküller (PM2.5)</td><td>35 µg/m³</td><td>24 sa</td></tr>
<tr><td>Ozon (O_3)</td><td>0,06 ppm</td><td>8 sa</td></tr>
</table>
CFU: Koloni oluşturabilen birim, ppm: milyondaki partikül miktarı

Yukarıdaki grafikte çeşitli iç mekan hava kirleticilerine ait sınır değerler verilmiştir.</td></tr>
<tr><td>İyileştirilen özellikler</td><td>Döngüsel ekonomiye katkı, insan sağlığının ve doğal çevrenin korunması, malzemelerde standardizasyon.</td></tr>
</table>

3. Sonuç ve Değerlendirme

Tarihi yapılar kültürel ve evrensel mirası oluşturdukları için geleceğe aktarılmaları son derece mühimdir. Bu hususta bu tür yapıların zaman içerisinde maruz kaldıkları sorunların giderilmesine yönelik çağdaş önlem ve metotlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma tarihi dokuya, bina kullanıcılarına ve çevreye olumsuz etkileri olan beş farklı sorunun yapı malzemeleri üzerinden çözümlenmesine ve/veya etkilerinin azaltılmasına odaklanmaktadır. Sorunun öncelikle malzeme ölçeğinde ele alınması, tarihi binaların aktif sistemlere olan bağımlılığını azaltmak ve küresel iklim değişikliğine katkı sunacak yeni sorunların önüne geçilebilmesi adına önemlidir.

Çalışma kapsamında nem sorununa karşın doğal bir malzeme olan kil bariyerlerinin yığma duvarların önünde toprak seti olarak kullanımı önerilmiştir. Böylelikle suyun yapı kabuğu ile olan teması en aza indirilmiş; yapısal unsurlara ve kullanıcı konforuna zarar verebilecek nemin binadan uzaklaştırılması sağlanmıştır. Tarihi yapıların kabuğunda soğuk renkli malzeme ve avlularında membran kullanımının yapının enerji etkinliği üzerinde olumlu etkilerinin olduğu görülmüştür. Kullanıcı konforun sağlanması kaynak tüketimi ve çevresel etkilerin düşürülmesinde bir diğer kilit noktadır. Termal kütle, doğru cam türünün seçimi, gölgelendirme elemanlarının kullanılmasının yanı sıra FDM gibi yenilikçi teknolojilerin tarihi binalarda uygulanması ısıl konforu iyileştiren metotlardandır.

Yapılarda yeni malzeme kullanımı yeni ham madde ihtiyacı anlamına geldiğinden bunun yerine daha önceden kullanılmış malzemelere başvurulması, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasında etkilidir. Yapılan çalışmalarda atık taş, tuğla ve camların harçlarda kullanılması durumunda hem harç özelliklerinin iyileştirildiği hem de döngüsel ekonomiye katkı sunulduğu tespit edilmiştir. Diğer yandan yapılarda yeşil yapı malzemelerinin kullanımı, atık kullanımına teşvik etmesi, insan sağlığına olan etkileri ve malzeme onarımları açısından doğal, sosyal ve tarihi çevre üzerinde olumlu etkilere sahiptir.

Kaynaklar

[1] Webb, A.L., Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 77, 748-759, 2017.

[2] Feilden, B., Conservation of Historic Buildings, 3. Baskı, Londra, 2003.

[3] Buda, A., Hansen, E.J.P., Rieser, A., Giancola, E., Pracchi, V.N., Mauri, S., Marincioni, V., Gori, V., Fouseli, K., Lopez, C.S.P., Faro, A., L., Egusquiza, A., Haas, F., Leonardi, E., Herrera-Avellanosa, D., Conservation-Compatible Retrofit Solutions in Historic Buildings: An Integrated Approach, Sustainability, 13:5, 2021.

[4] Lourenço, P.B., Luso, E., Almeida, M.G., Defects and moisture problems in buildings from historical city centres: a case study in Portugal, Building and Environment, 41:2, 223-234, 2006.

[5] Michette, M., Lorenz, R., Ziegert, C., Clay barriers for protecting historic buildings from ground moisture intrusion, Heritage Science, 5:31, 2017.

[6] Fusade, L., Viles, H., Wood, C., Burns, C., The effect of wood ash on the properties and durability of lime mortar for repointing damp historic buildings, Construction and Building Materials, 212, 500-513, 2019.

[7] Rosso, F., Pisello, A.L., Castaldo, V.L., Ferrero, M., Cotana, F., On Innovative Cool-Colored Materials for Building Envelopes: Balancing the Architectural Appearance and the Thermal-Energy Performance in Historical Districts, Sustainability, 9, 2017.

[8] De Vita, M., D'Antonio, Beccarelli, P., Berardinis, P., Energy performance of film membranes in the retrofitting of Architectural Heritage: an Italian case study, Proceedings of the TensiNet Symposium 2019, 3-5 Haziran 2019, Politecnico di Milano, Milan, Italy. 624-633.

[9] Gonzalez, C.M.M., Rodriguez, A.L.L., Medina, R.S., Jaramillo, J.R., Effects of future climate change on the preservation of artworks, thermal comfort and energy consumption in historic buildings, Applied Energy, 276, 2020.

[10] Alwetaishi, M., Balabel, A., Abdelhafiz, A., Issa, U., Sharaky, I., Shamseldin, A., Al-Surf, M., Al-Harthi, M., Gadi, M., User Thermal Comfort in Historic Buildings: Evaluation of the Potential of Thermal Mass, Orientation, Evaporative Cooling and Ventilation, Sustainability, 12, 2020.

[11] Baccega, E., Bottarelli, M., Granular PCM-Enhanced Plaster for Historical Buildings: Experimental Tests and Numerical Studies, Energies, 15, 2022.

[12] Ayat, A., Bouzerd, H., Ali-Boucetta, T., Navarro, A., Benmalek, M.L., Valorisation of waste glass powder and brick dust in air-lime mortars for restoration of historical buildings: Case study theatre of Skikda (Northern Algeria), Construction and Building Materials, 315, 2022.

[13] Jafari, M.J., Khajevandi, A.A., Najarkola, S.A.M., Yekaninejad, M.S., Pourhoseingholi, M.A., Omidi, L., Kalantary, S., Association of Sick Building Syndrome with Indoor Air Parameters, Tanaffos, 14:1, 55-62, 2015.

[14] Tsai, W., Overview of Green Building Material (GBM) Policies and Guidelines with Relevance to Indoor Air Quality Management in Taiwan, Environments, 5:4, 2018.

TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI ANKARA ŞUBESİ
TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI DİYARBAKIR ŞUBESİ
ODEYA ENDAZYARÊN AVAHÎYÊ

KILIÇLAMA YÖNTEMİ İLE DUVAR VE DÖŞEME BAĞLANTILARININ DEPREME KARŞI DAVRANIŞA ETKİSİ

Cevdet ŞENTÜRK[1], Rabia AYDIN[2]

[1]Yüksek İnşaat Mühendisi, İndis Mühendislik,
cevdetsenturk@indismuhendislik.com
[2]İnşaat Mühendisi, İndis Mühendislik,
rabiaaydin@indismuhendislik.com

Özet

Tarihi yapıların korunması ve sürekliliğinin sağlanması açısından, ömür boyu bakım ve deprem etkilerine karşı önlemler alınması önemlidir. Yapıya deprem etkilerine karşı direnç kazandırmak için, yeterli ötelenme rijitliği, yeterli eleman dayanıklılığı ve yeterli süneklik olmalıdır. Süneklik artırmak, deprem etkilerine karşı etkili yöntemlerden biridir. Kılıçlama tekniği, deprem etkilerine karşı sünekliği artırarak yapıların direncini artırırken, tarihi dokunun korunmasında da önemli bir rol oynamaktadır. Döşeme sistemlerinin iyileştirilmesi ve duvar ile döşeme bağlantılarının güçlendirilmesi gibi özgün yöntemler, yapıların deprem kuvvetlerine karşı direncini artırarak kültürel mirasın sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır. Bu inceleme, kültürel mirasın korunmasının önemini ve gelecek nesillere aktarılmasının gerekliliğini vurgulayarak bu alandaki farkındalığı artırmayı hedeflemektedir.

Anahtar Sözcükler: Tarihi Yapılar, Yığma, Kılıçlama, Demir, Strüktürel Kullanım, Restorasyon.

Abstract

The preservation and continuity of historical structures are important in terms of maintenance throughout their lifetime and taking measures against the effects of earthquakes. To increase a building's resistance to earthquake effects, it must have sufficient displacement rigidity, element strength, and ductility. Enhancing ductility is one of the effective methods against earthquake effects. The technique of cable sheave plays a significant role in increasing the ductility and thus the resistance of structures, while also preserving the historical texture. Original methods such as improving floor systems and strengthening the connections between walls and floors contribute to the resistance of structures against earthquake forces, aiding in the sustainability of cultural heritage. This thesis aims to raise awareness in this field by emphasizing the importance of preserving cultural heritage and the necessity of passing it on to future generations.

Keywords: Historical Heritage, Masonry, Cable Sheave, İron, Structural Use, Restoration.

1. Giriş

Kültürel mirasın korunması, özellikle tarihi yapılar söz konusu olduğunda, mühendislik ve mimarlık disiplinlerinin ortak bir çabasını gerektirir. 1700'lerin başlarından itibaren, özellikle Avrupa'da, kagir yapıların dayanıklılığını artırmak amacıyla çeşitli yöntemler araştırılmış ve uygulanmıştır. Bu dönemde, doğal afetlerden kaynaklanan zararları minimize etmek için kılıçlama teknikleri gibi yapısal güçlendirme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu teknikler zamanla global olarak yaygınlaşarak birçok tarihi yapının günümüze kadar sağlam kalmasını sağlamıştır. Bu süreç, yapıların fiziksel bütünlüğünün yanı sıra estetik ve tarihsel değerlerinin de gelecek nesillere aktarılmasına olanak tanımıştır. Bu çerçevede, 1700'lü yıllardan sonra kılıçlama sistemlerinin her tür kagir yapıda kullanılması yaygınlaşmıştır (Kurugöl ve Küçük, 2015).

Yapılar, toplumların kültürel ve tarihi mirasını yansıtan değerli varlıklardır. Bu yapıların korunması ve gelecek nesillere aktarılması, sadece estetik ve tarihi değerlerin korunması açısından değil, aynı zamanda bu yapıların içinde yaşayan toplulukların kimliklerinin ve geçmişlerinin bir parçası olarak da büyük önem taşır. Modern mimari tekniklerin ve malzemelerin gelişimi, tarihi yapıların restorasyonu ve korunmasında yeni yaklaşımlar sunarken, bu yapıların orijinalliklerini koruma ihtiyacı da göz ardı edilemez. Bu makalede, özellikle demir kullanımı ve yapısal sünekliği artırma yöntemlerine, özellikle de kılıçlama tekniğine odaklanılacaktır.

Tarihi yapıların ve geleneksel mimarinin korunmasında kullanılan demir ve yapısal sünekliği artırma yöntemleri, deprem gibi doğal afetlere karşı bu yapıların direncini artırma potansiyeline sahiptir. Kılıçlama tekniği, bu yöntemlerden biri olarak öne çıkmakta, yapıların bütünlüğünü koruyarak afetlere karşı daha dirençli hale gelmelerini sağlamaktadır. Bu teknik, yapılarda duvarları birleştirmek için ahşap veya demir kiriş uçlarına, duvarın diğer yüzeyine geçecek şekilde dikine kılıca benzeyen demir parçalarının yerleştirilmesinin önemini kapsar. Bu yöntem, yapıların bütünlüğünü koruyarak afetlere karşı daha dirençli hale gelmelerini sağlamaktadır ve bu yapım tekniğinin önemini vurgulamaktadır.

2. Döşeme Rijitliği

Yapılar, özellikle deprem gibi yatay yönde kuvvetlerin uygulandığı durumlarda, bu kuvvetleri düşey yapısal unsurlara aktarırlar. Bu büyük ölçüde döşemelerin düzlem içi rijitliğine bağlıdır. Rijit döşemelerde, düzlem içi yer değiştirme olmadığı kabul edilir; böylelikle söz konusu döşemeyle bağlantılı tüm düşey yapısal elemanlar aynı ötelenme etkilerine maruz kalırlar. Dolayısıyla, yatay yüklerin düşey elemanlara aktarımı, bu elemanların rijitliği ile orantılıdır. Ancak, rijit döşeme yapısına sahip olmayan binalarda, düşey yapısal elemanlar arasında yük dağılımı, onların rijitliklerine göre düzenli bir şekilde gerçekleşmez. Bu durumlarda, yatay yüklerin dağılımı, döşemenin düzlem içindeki yer değiştirmelerine bağlı olarak daha karmaşık hale gelir ve yerel olarak farklılıklar gösterebilir. Rijit olmayan döşemelere sahip geleneksel taş veya tuğla gibi yığma yapılar söz konusu olduğunda, duvarların düzlem dışı direnç kapasiteleri hayati önem taşır ve bina güvenliği büyük ölçüde duvarlar arası bağlantıların sağlamlığına bağlı hale gelir. Eğer bu bağlantılar yeterince güçlü değilse, duvarlar birlikte hareket etmek yerine tek başlarına davranmaya başlar. Bu durum, yapının hatta düşük düzeydeki yatay kuvvetlere karşı bile çökme riskini önemli ölçüde artırır.

Duvar ve döşeme bağlantıları sağlam yığma binalarda deprem etkisi altında "kutu davranışı" gösterirler; bir başka deyişle, birbirine dik bağlantılı duvarlar ve üstlerinde yer alan döşeme beraber çalışarak deprem kuvvetlerini karşılarlar. (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, Vakıflar Genel Müdürlüğü). Duvar ve döşeme bağlantılarının yetersiz olduğu yığma yapılarında duvarlar birbirlerinden bağımsız olarak davranarak yapıda bölgesel hasarlara neden olabilirler. Böyle durumlarda ahşap döşeme kirişleri yataklarından oynayabilir ve döşeme hasarları oluşabilir; ya da yığma duvarlar yeterli düzlemine dik bağlantılara sahip olmadıkları için zayıflayarak düzlem dışı hareketlere başlayabilir. Özetle, tarihi bir yığma yapının deprem riskini değerlendirirken duvar ve döşeme bağlantılarının sağlamlığı hayati bir öneme sahiptir. Eğer bir tarihi yapıda bu tür zayıflıklar saptanırsa, mümkün olan en etkili şekilde müdahale edilmesi gerekmektedir.

2.1. Ahşap Döşeme Rijitliği

Ahşap binalarda döşemeler, üzerine taban kaplamasının uygulandığı ve belli aralıklarla yerleştirilen yatay kayıtlardan oluşmaktadır. Ahşap binalarda ya-

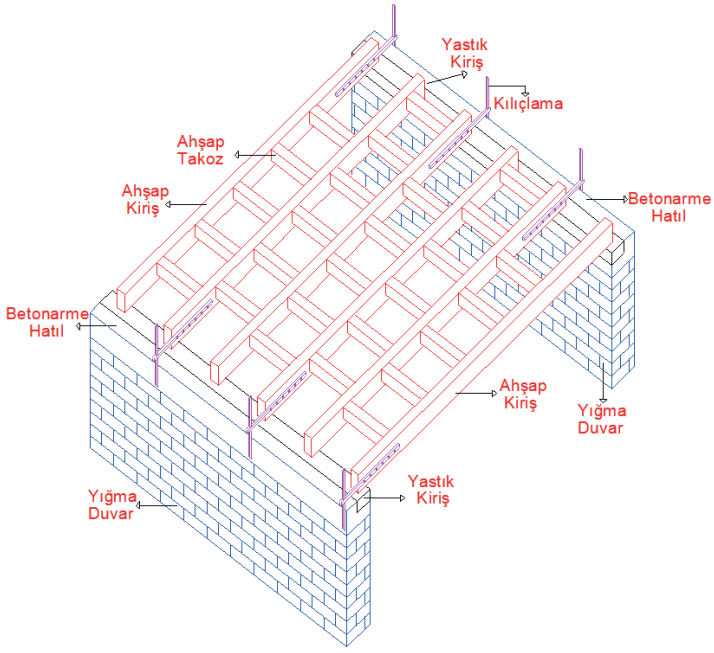
tay kayıtlar aynı zamanda taşıyıcı kiriş olarak da görev yaparlar.

Ahşap döşeme sistemleri, rijit diyafram oluşturmadıkları kabul edilir. Ahşap döşemeleri, düşey yüklere ve deprem yüklerine karşı daha dayanıklı hale getirmek amacıyla, döşeme yüklerinin destek sağlayan duvar veya kirişlere daha dengeli şekilde aktarılmasını sağlamak ve rijitliğini artırmak amacıyla taşıyıcı kirişlerin arasına kirişlere dik olarak belirli aralıklarla ahşap takoz elemanlar yerleştirilmesiyle taşıyıcı kirişlerin beraber çalıştırılarak döşemede rijit diyafram özelliği artırılır.

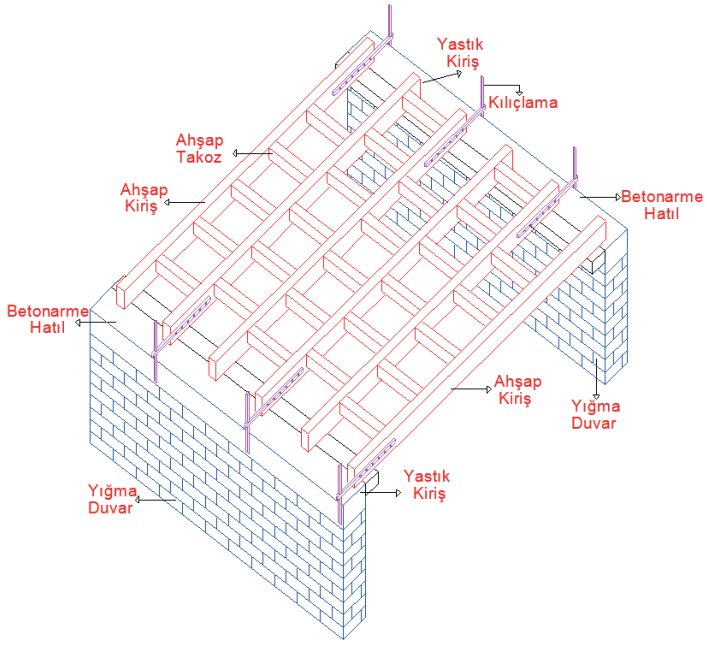
Ahşap döşemelerde, hem alttan hem de üstten yapılan kaplama uygulamaları, döşemeye gelen yayılı yüklerin kirişlere etkin bir şekilde aktarılmasına yardımcı olur ve ahşap döşemenin rijit diyafram özelliklerini artırır. Farklı açılarda yapılan kaplamalar, döşemenin rijitliğini önemli ölçüde güçlendirir. Bu yöntem, döşemenin genel dayanıklılığını artırırken, yan yana bulunan mekanlardaki döşemelerin birbiriyle uyumlu olması da binanın genel bütünlüğüne ve yapısal sağlamlığına olumlu katkıda bulunur. Bu entegrasyon, yapının genel dayanıklılığını ve performansını iyileştirmekte büyük rol oynar.



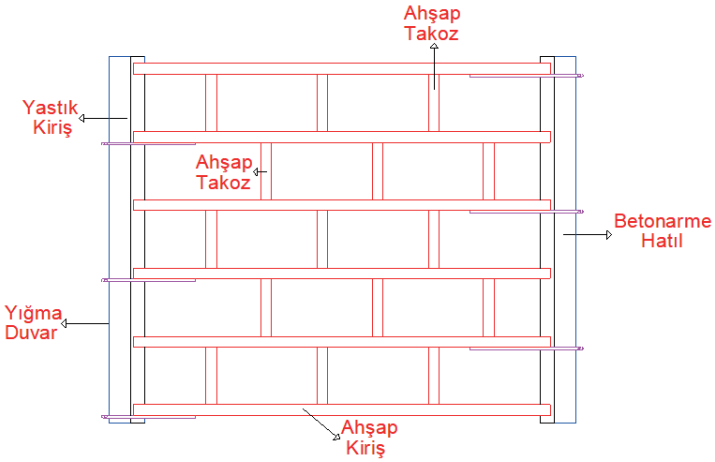
Şekil 2.1.1- Ahşap Döşeme Kirişleri



Şekil 2.1.2- Ahşap Döşemede Kılıçlama Şematik (Yastık Kiriş Hatılın İçinde)



Şekil 2.1.3- Ahşap Döşemede Kılıçlama Şematik (Yastık Kiriş Hatılın Yanında)

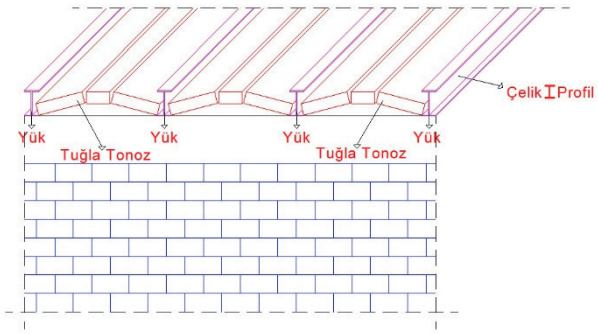


Şekil 2.1.4-Ahşap Döşemede Kılıçlama Kalıp Planı

2.2. Volta Döşeme Rijitliği

Volta döşeme, harç ile basık yay kemer şeklini alan tuğlaların arasına belli aralıklarla yerleştirilen çelik profillerin oluşturduğu bir döşeme tekniğidir. Bu yapıda, çelik elemanlar eğilme yüklerini taşırken, yığma elemanlar olan pişmiş tuğlalar yalnızca basınç yüklerine maruz kalacak şekilde tasarlanmıştır. Uygulamanın ardından tavan alt ve üst kısımları harç ile kapatılır.

Volta döşemelerde harç tabakası ve taban döşeme kaplamalarının rijitliğe katkıları vardır. Döşeme kaplamaları ve harç tabakasına gelen yayılı yükler çelik profillere aktarılır. Çelik profiller kaplama yüklerini ve kendi ağırlığını yığma duvarlara aktararak yük aktarımını sağlarlar.

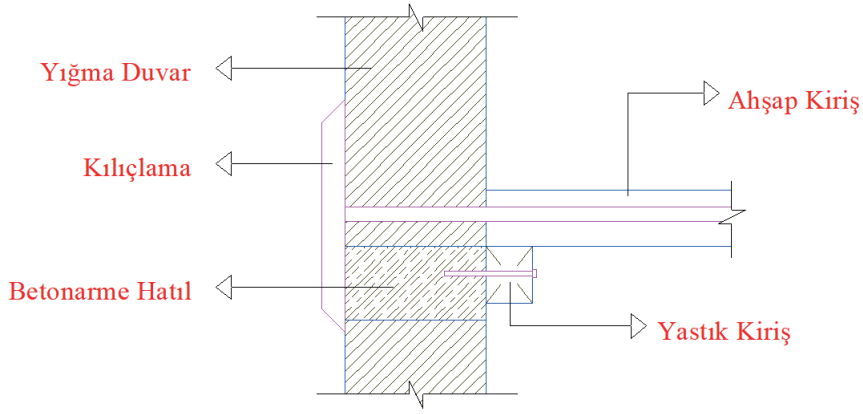


Şekil 2.2.1- Volta Döşeme Detayı

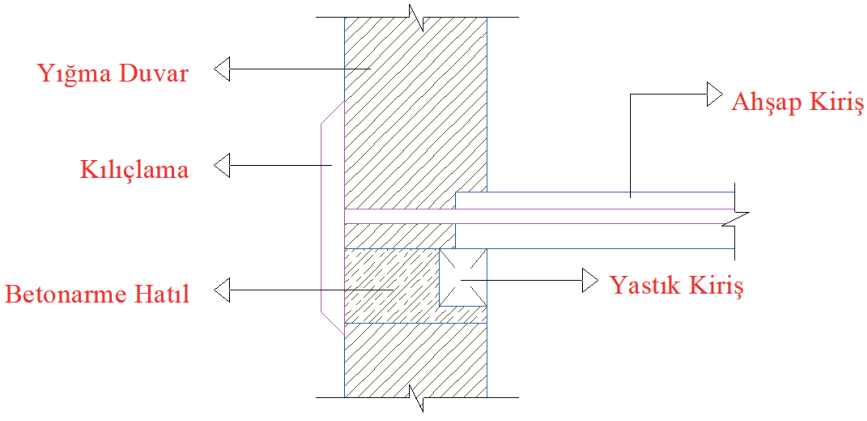
3. Döşeme-Duvar Birleşimi

Bağlantılar, tarihi yapıların taşıyıcı elemanları arasında düşey ve yatay yüklerin etkin bir şekilde dağıtılması ve yapısal güvenlik için büyük önem taşır. Yığma yapı tekniklerindeki tarihi binalarda yüklerin aktarımı esas olarak duvarlar arası ve döşeme ile duvar bağlantıları aracılığıyla sağlanır.

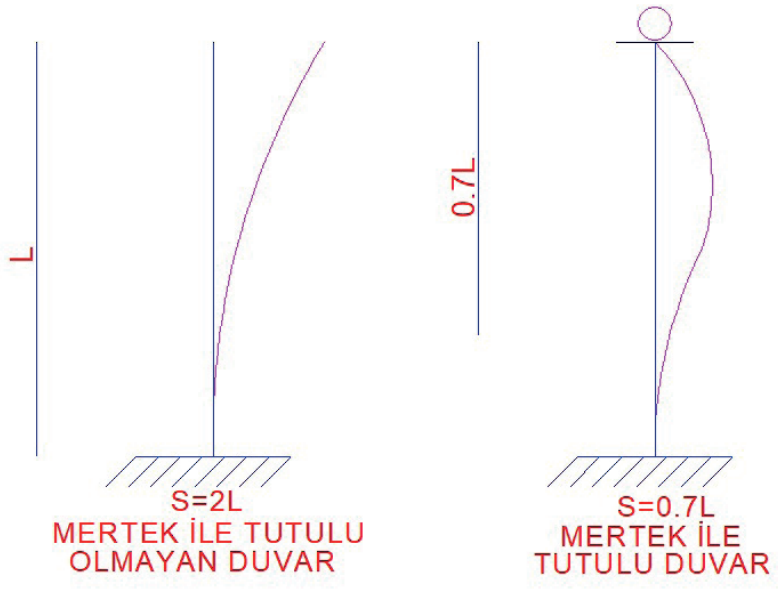
Döşeme-duvar bağlantılarında yük aktarımını ve sünekliği olumlu etkileyerek rijit diyafram oluşturulması kılıçlama yöntemi ile sağlanmaktadır. Kılıçlama yöntemi ile döşeme ve yığma duvarlar arasında gergi demiri ile bağlantı yapılır. Gergi demirleri rijit diyafram oluşturarak yığma duvara süneklik kazandırır.



Şekil 3.1- Döşeme- Duvar Birleşimi Detayı (Yastık Kiriş Hatılın Yanında)



Şekil 3.2- Döşeme- Duvar Birleşimi Detayı (Yastık Kiriş Hatılın İçinde)



Şekil 3.3- Yığma Yapılarda Duvarların Düzlem Dışı Davranışı



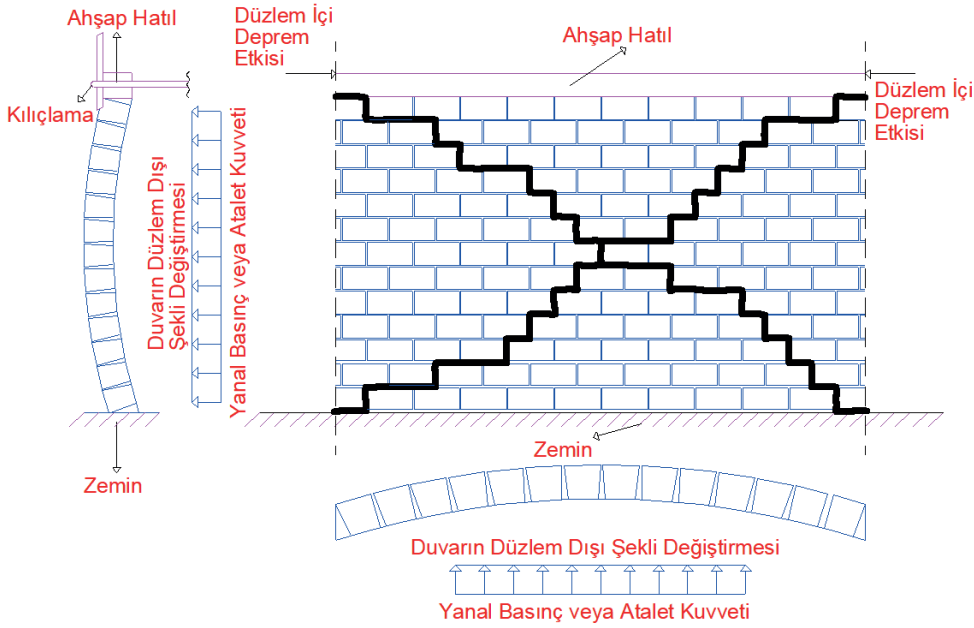
Şekil 3.4- Ahşap Döşeme Kılıçlama Yöntemi Uygulaması



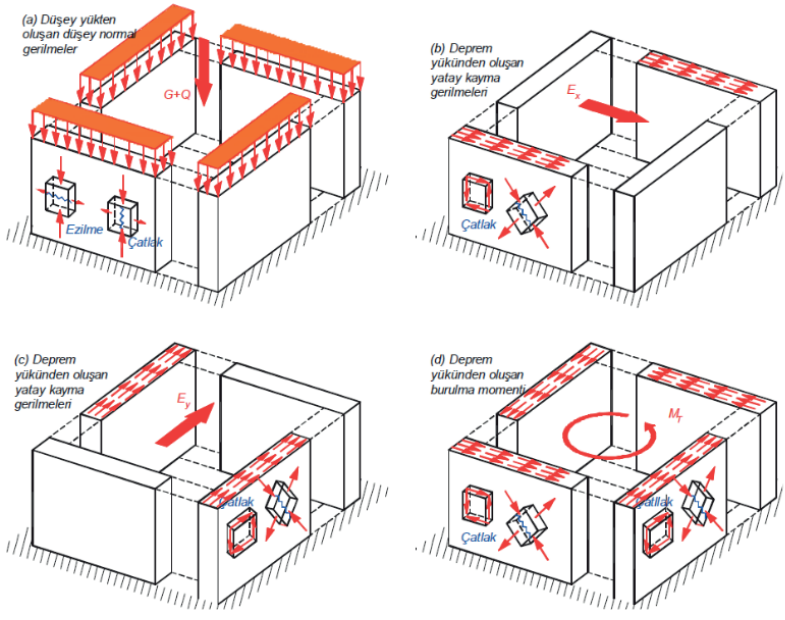
Şekil 3.5- Volta Döşeme Kılıçlama Yöntemi Uygulaması

3.1. Kılıçlama Yönteminin Yer Değiştirmeler Üzerindeki Etkisi

Tarihi yapıların çoğunda olduğu gibi, bu tür binalarda hem taşıyıcı hem de taşıyıcı olmayan elemanların ağırlığı, beklenen yüklerle karşılaştırıldığında oldukça fazladır. Bunlar arasında düşey ağırlık ve deprem nedeniyle ortaya çıkan yatay atalet kuvveti, karşılanması gereken başlıca iki yük türünü oluşturur. Bu yapı türlerinde hareketli yükler genellikle ahşap döşeme, betonarme döşeme ya da volta döşeme tarafından karşılanır ve bu döşemeler aracılığıyla duvarlara iletilir. Döşemelerde düşey yükler düzlem dışı kesme kuvveti ve eğilme momenti yaratırken, deprem yükleri ise düzlem içi yatay kuvvetler üretir. Bu yükler duvarlar üzerinden temele aktarılır. Döşemelerden duvarlara iletilen atalet kuvvetleri düzlem içi kuvvetlerle temele, bir kısmı ise düzlem dışı kuvvetlerle temele ulaşır. Duvarlar, yer hareketinin yönüne bağlı olarak hem düzlem içi hem de düzlem dışı kuvvetlere maruz kalır. Düzlem dışı kuvvetler duvarın zayıf yönünde kesme kuvveti ve eğilme momenti yaratır. Duvarların düzlem içi rijitliği, düzlem dışı rijitliğinden genellikle daha yüksektir. Yatay etkiler, bu yönde bulunan duvarlar tarafından karşılanır. Ancak, düzlem dışı etkilerden kaynaklanan iç kuvvetler küçük olsa da, düşük dayanım nedeniyle bu yönde hasar oluşması oldukça yaygındır.



Şekil 3.1.1- Yığma Duvar Deprem Etkileri



Şekil 3.1.2- Yığma duvarlı yapılarda duvarlarda meydana gelen normal kuvvetler ve kesme kuvvetleri (Vakıflar Genel Müdürlüğü, Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu)

Basit duvar modellerinde, deprem etkileri ile ilgili doğrultuda bulunan duvarlardaki düzlem içi kesme kuvvetleriyle karşılanır (Şekil 3.1.2). Yapı, düşey yüklerle birlikte iki doğrultuda deprem analizine tabi tutularak, duvarlardaki kesme kuvveti ve sonuç olarak ortaya çıkan kayma gerilmeleri hesaplanır.

Rijit diyaframa sahip yığma yapılarında, duvarlara etki eden kesme kuvveti, duvarların düzlem içi rijitliklerine göre değerlendirilir. Rijit diyaframa sahip olmayan yapılar için ise, duvarlara etki eden kesme kuvveti, üzerlerindeki eksenel yüke bağlı olarak hesaplanır. Duvardaki düşey normal gerilmeler de dikkate alınarak hesaplanan kayma gerilmesi, duvarın kayma dayanımıyla karşılaştırılır ve bu bilgiler duvarın taşıma kapasitesinin güvenliğini belirlemek için kullanılır.

Rijit diyaframa sahip olmayan yapılarda duvarları bağlamak için yerleştirilen demir veya ahşap kirişlerin duvardan ayrılmamalarını sağlamak üzere, bunların duvarın öteki yüzüne geçen uçlarına kama gibi geçirilen kılıca benzeyen dikine demir parçalarının yerleştirilmesi yani kılıçlama yöntemi uygulanır.

Kılıçlama yöntemi, düzlem dışı davranışlardaki iyileştirmelerin yanı sıra, düzlem içi performansı da artırarak yapının genel sünekliğine olumlu katkılar sağlar.Ayrıca ilave gergi demirlerinin konulmasıyla, ahşap döşemede rijit diyafram oluşturularak duvar ve döşemelerin beraber çalışması sağlanır.

4. Örnek Çalışma

4.1 Binanın Genel Özellikleri

İstanbul'da önemli tarihi binaların yer aldığı Fatih'te bulunan bina 5,75 m x 11,50 m boyutlarındadır. Mevcut bina bir bodrum, 1 zemin, 1 asma ve 3 normal kattan oluşmaktadır. Kat yükseklikleri her katta yaklaşık 3,30 m'dir.



Şekil 4.1.1- İncelenen binaya ait görüntü

Yapılan çalışmada yığma yapıda duvar- döşeme bağlantısına gergi demiri yerleştirildiğinde yer değiştirmelerin azaldığı belirlenmiştir. Kılıçlamalı yapıda yer değiştirmeler azalırken x yönünde periyot artmıştır. Periyodun artması kılıçlama yönteminin sünekliliği artırdığını göstermiştir.

4.2. Yapının Bulunduğu Zemin Bilgileri

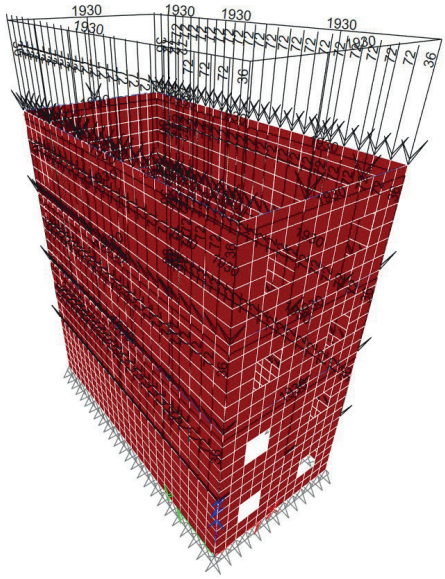
Enlem	41.030336
Boylam	28.950133
Zemin Sınıfı	ZE
Zemin Taşıma Gücü	1,00 kg/ cm^2
Düşey Yatak Katsayısı	1200 ton/m^3
Ss	0.913
S_1	0.255
S_{DS}	1.068
S_{D1}	0.771

4.2 Analiz Süreci Ve Analiz Sonuçları

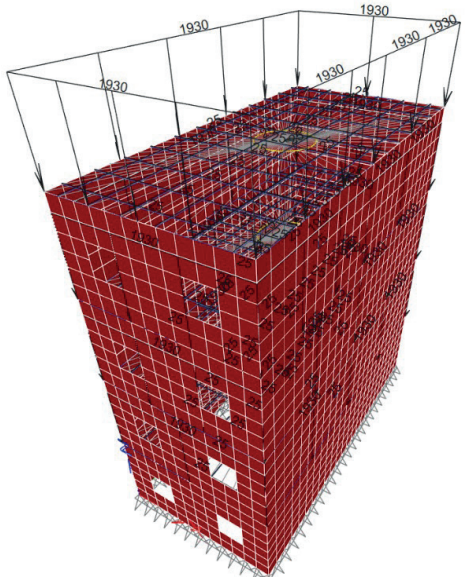
Kılıçlama yönteminde kullanılan gergi demirlerinin yığma duvarlarda yer değiştirmelere ve sünekliğe olan etkisini görmek amacıyla örnek bir çalışma yapılmıştır. İstanbul İli, Fatih İlçesi, Balat Mahallesi'nde bulunan kargir bina iki farklı modelde analiz yapılarak incelenmiştir. Birinci modelde yapıda ahşap döşeme kirişleri yığma duvarlara kılıçlamasız olarak yük aktarmıştır; ikinci modelde ise ahşap döşeme kirişleri yığma duvarlara kılıçlamalar ile bağlanarak rijit diyafram oluşturması sağlanmıştır.

Bu binanın matematiksel modelinin oluşturulması için ETABS (Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems) yapısal analiz programından yararlanılmıştır.

Her iki modelde yığma duvarlar shell (kabuk) eleman olarak tanıtılmıştır. Kılıçlamasız modelde kirişlerin aktardığı yükler duvarlara yer çekimi yönünde yayılı olarak yüklenmiştir. Kılıçlamalı modelde kirişlerin duvarlara aktardığı yükler aynı şekilde duvarlara yer çekimi yönünde yayılı olarak yüklenirken, aynı zamanda x ve y yönünde düğüm noktalarından çubuk elemanlar ile kılıçlamalar modellenmiştir.



Şekil 4.2.1- Kılıçlamasız Analiz Modeli



Şekil 4.2.2- Kılıçlamalı Analiz Modeli

Yığma duvarlarda duvar-döşeme bağlantısında gergi demiri kullanıldığında ve kullanılmadığında duvarlardaki maksimum yer değiştirmeler Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Kılıçlama yöntemi uygulanan ve uygulanmayan modelde x yönündeki yer değiştirmeler

UX (X Yönündeki Yer Değiştirmeler) m		
Kat	**Kılıçlamalı Model**	**Kılıçlamasız Model**
3. Kat	0,100818	0,180716
2. Kat	0,074102	0,124083
1. Kat	0,049862	0,080552
Zemin Kat	0,025103	0,040037

Tablo 2. Kılıçlama yöntemi uygulanan ve uygulanmayan modelde y yönündeki yer değiştirmeler

UY (Y Yönündeki Yer Değiştirmeler) m		
Kat	**Kılıçlamalı Model**	**Kılıçlamasız Model**
3. Kat	0,016556	0,017286
2. Kat	0,012654	0,013179
1. Kat	0,008651	0,009032
Zemin Kat	0,004313	0,004507

Yığma duvarlarda duvar-döşeme bağlantısında gergi demiri kullanıldığında ve kullanılmadığında yapıların periyotları Tablo 3 ve Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 3. Kılıçlama yöntemi uygulanmayan modele ait periyot değerleri

TABLE: Modal Participating Mass Ratios				
Case	**Mode**	**Period(sec)**	**UX**	**UY**
Modal	1	0,403	0,271	0,00000355
Modal	2	0,275	0,316	0,00000421
Modal	3	0,251	0,0541	0
Modal	4	0,236	0,0041	0,0000311
Modal	5	0,166	0,0077	0

Modal	6	0,161	0,2203	0,0002
Modal	7	0,141	0,0001	0,8089
Modal	8	0,136	0,0137	0,0009
Modal	9	0,117	0,000009158	0,017
Modal	10	0,113	0,0039	0,0095
Modal	11	0,099	0,0001	0,0001
Modal	12	0,093	0,0041	0
Modal	13	0,084	0,0006	0,001
Modal	14	0,083	0,0008	0
Modal	15	0,08	0,0007	0,0038
Modal	16	0,074	0,0002	0,0004
Modal	17	0,067	0,0045	0,0002
Modal	18	0,067	0,0376	0,0019
Modal	19	0,059	0,0038	0,00001613
Modal	20	0,058	0,0163	0,009

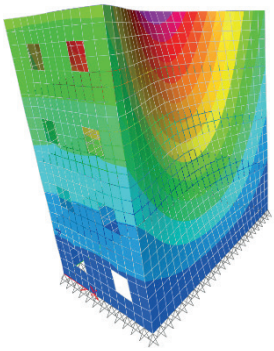
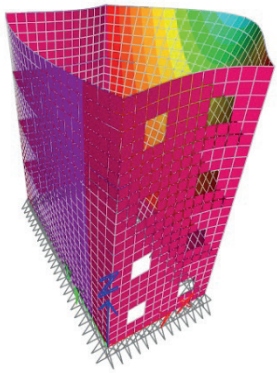
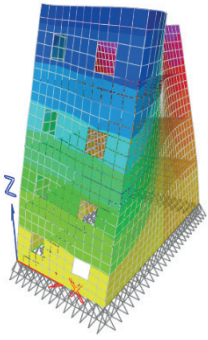
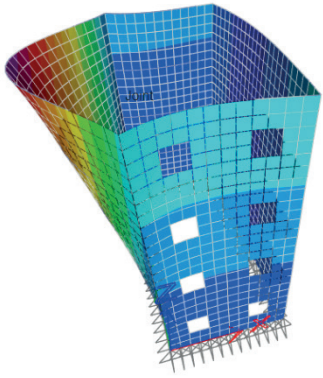
Tablo 4. Kılıçlama yöntemi uygulanan modele ait periyot değerleri

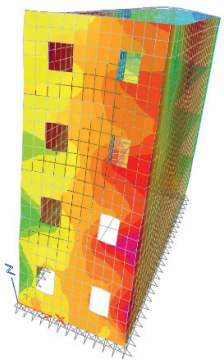
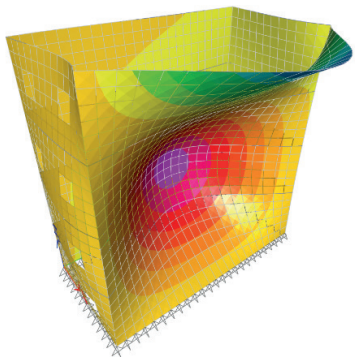
TABLE: Modal Participating Mass Ratios				
Case	**Mode**	**Period (Sec)**	**UX**	**UY**
Modal	1	0,295	0,6702	0
Modal	2	0,22	0,0001	0,00001901
Modal	3	0,182	0,0551	0
Modal	4	0,153	0,1543	0,0001
Modal	5	0,141	0,0000189	0,8374
Modal	6	0,113	0,0018	0,0002
Modal	7	0,11	0,0123	0
Modal	8	0,082	0,0007	0,000009351
Modal	9	0,078	0,0004	0
Modal	10	0,07	0,0009	0
Modal	11	0,067	0,0525	0,000005599
Modal	12	0,061	0,0001	0,000002207
Modal	13	0,058	0,0024	0,06
Modal	14	0,057	0,0258	0,005
Modal	15	0,051	8,078E-07	0,0098
Modal	16	0,049	0	0,000006287
Modal	17	0,047	0	0,004

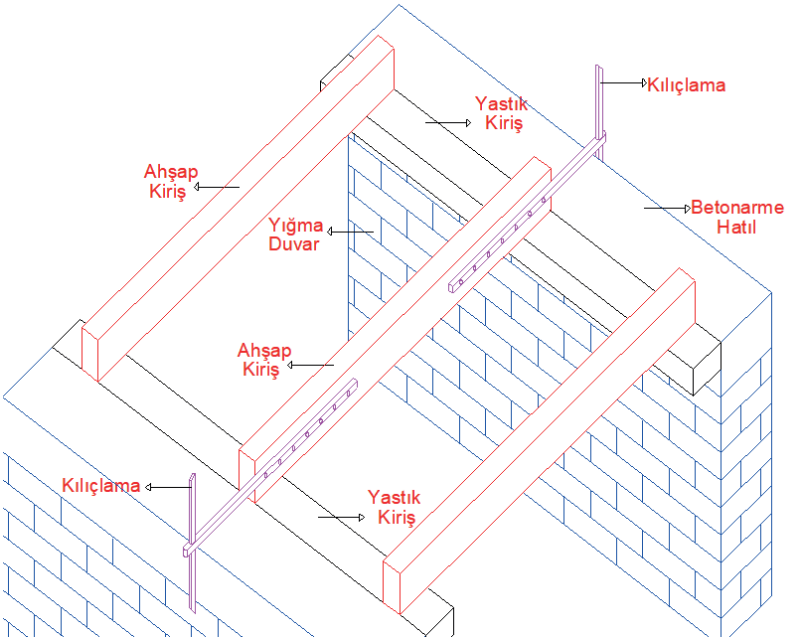
Modal	18	0,044	0,003	0,0002
Modal	19	0,044	0,0035	0,0002
Modal	20	0,042	0,0025	0,016

Duvar-döşeme bağlantısı kılıçlama yöntemi ile sağlandığında ilk 5 mod şekil değiştirmeleri Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Duvarların Döşeme ile Bağlantısında Kılıçlama Kullanıldığında ve Kullanılmadığında Duvarlarda Gerçekleşen Yer Değiştirmelerin İlk 3 Mod Şekiller

Mod	Duvar-Döşeme Bağlantısında Kılıçlama Kullanılan Model	Duvar- Döşeme Bağlantısında Kılıçlama Kullanılmayan Model
1		
2		

3		



Şekil 3.1.3- Kılıçlama Yöntemi Detayı

5. Sonuç

Bu çalışma, tarihi yapılarda gergi demiri kullanımının rijit diyafram oluşturma ve yapısal sünekliği artırma yöntemlerinin, özellikle kılıçlama tekniği aracılığıyla, tarihi ve kültürel değerlerin korunmasındaki önemine odaklanmaktadır. Araştırma, deprem gibi doğal afetlere karşı yapıların direncini artırmak için özgün malzeme ve metodların kullanılmasının yanı sıra, bu metotların gelecek nesiller tarafından unutulmamasının ve sürekli hafıza-

larda tutulmasının gerekliliğine vurgu yapmaktadır. Ahşap ve volta döşeme sistemlerinin iyileştirilmesi, duvar ve döşeme bağlantılarının güçlendirilmesi gibi özgün metotlar, yapıların sünekliğini artırarak deprem kuvvetlerine karşı dirençlerini önemli ölçüde yükseltmektedir. Mühendislik hesaplarında çoğu zaman yeterince dikkate alınmayan bir nokta ise, döşemelerin duvarlara nasıl bağlandığıdır. Bu bağlantıların incelenmesi ve doğru şekilde uygulanması, yapısal bütünlüğün ve depreme dayanıklılığın artırılmasında kritik bir öneme sahiptir. Yapıların artan sünekliği, deprem etkilerine karşı daha dirençli hale gelmelerini sağlayarak, estetik ve tarihsel değerlerin yanı sıra kültürel kimlik ve toplumsal hafızanın da korunmasına katkıda bulunmaktadır.

Tasarım esnasında yapılan hatalardan biri ise, döşemelerin duvarlara yalnızca bağlanmış olmasına odaklanılırken, bu bağlantıların yapısal etkileşimini ve davranışını yeterince irdelememektir. Tarihi yapıların ve geleneksel mimarinin korunmasında kullanılan teknikler ve metodlar üzerine bir inceleme sunarken, demirin rolü ve kılıçlama tekniği gibi geleneksel metotların yanı sıra modern tekniklerin entegrasyonunun, kültürel mirasın korunması ve sürdürülebilirliğini sağlama çabalarında önemli bir yer tuttuğunu belirtmektedir.

Kaynaklar

Celep, Z., Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depremde Dayanıklı Yapı Tasarımı,İstanbul,2018

Şentürk, C., Mühendislikte Yapısal sorular,İstanbul, 2023

Baytop, F., Yapı Sözlüğü, İstanbul, 1998

Tokyay, V., Mimarlık Ve Ahşap Yapı İlişkileri, İstanbul, 2017

Bayraktar, A., Yığma Yapı Mühendisliğinin Gelişim Tarihi, İstanbul, 2011

Kurugöl, S., Küçük, S. G., Tarihi Eserlerde Demir Malzeme Kullanım ve Uygulama Teknikleri, 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, Erzurum,2015

Yağcı, P., Yığma Duvarların Katı Cisim Ve Kabuk Olarak Modellenmesi ve Sismik Davranışının Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü,2022

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi, Sanat Ve Tasarım Araştırılmaları Dergisi, Niğde, 2022

Tüter, R., Demir ve Çelik Malzemenin Mimaride Kullanımı- Geleneksel Tarsus Yapıları Bağlamında Bir İnceleme, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018

Vakıflar Genel Müdürlüğü, Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu

Şentürk, C., Yığma Binaların Analitik Çözümlemesi İçin Bir Hesap Algoritması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016

TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI ANKARA ŞUBESİ
TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI DİYARBAKIR ŞUBESİ
ODEYA ENDAZYARÊN AVAHÎYÊ

19. YÜZYIL ANADOLU RUM ORTODOKS KİLİSELERİ: KROM VADİSİ ÖRNEĞİ

Merve ERTÜRK[1], Neslihan KULÖZÜ[2]

[1]Yüksek Lisans Öğrencisi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, merverturk@outlook.com.tr
[2] Prof. Dr., Atatürk Üniversitesi, Mimarlık Ve Tasarım Fakültesi, nkulozu@atauni.edu.tr

Özet

Bu çalışmanın amacı, 19. yüzyıl Anadolu Rum Ortodoks kiliselerinin araştırılması ve Gümüşhane il sınırları içinde yer alan Krom Vadisi kiliselerinin özelliklerinin ortaya konulmasıdır. Bu amaç doğrultusunda çalışma kapsamında, öncelikle Anadolu'da 19. yüzyılda yapılmış kiliseler araştırılarak mimari özelliklerine bağlı olarak kategorize edilecektir. Ardından çalışmanın örneğini oluşturan Krom Vadisi kiliseleri tarihsel süreç içerisinde ele alınarak mimari özellikleri ile sunulacaktır. Son olarak Anadolu'da 19. yüzyılda inşa edilmiş kiliseler ile çalışmaya konu olan Krom Vadisi kiliselerinin özellikleri karşılaştırmalı olarak analiz edilecektir. Bu yolla çalışmanın sonucunda 19. yüzyılda inşa edilmiş ve bugün koruma sorunları ile karşı karşıya olan Krom Vadisi kiliselerinin aynı yüzyılda Anadolu genelinde inşa edilmiş kiliseler ile ortaklık ve farklılık gösteren özellikleri ortaya konulmuş olacaktır.

Anahtar Sözcükler: Kilise Mimarisi, Anadolu 19. Yüzyıl Rum Ortodoks Kiliseleri, Krom Vadisi/Gümüşhane

Abstract

The aim of this study is to investigate the 19th century Anatolian Greek Orthodox churches and to reveal the characteristics of the Krom Valley churches located within the borders of Gümüşhane province. For this purpose, within the scope of the study, churches built in Anatolia in the 19th century will be researched and categorized in the context of their characteristics. Then, the Krom Valley churches, which constitute the example of the study, will be introduced. Finally, the characteristics of the churches built in Anatolia in the 19th century and the Krom Valley churches, which are the subject of the study, will be presented comparatively. As a result of this study, the common and different features of the Krom Valley churches, which were built in the 19th century and face conservation problems today, with the churches built throughout Anatolia in the same century, will be revealed.

Keywords: Church Architecture, Anatolian 19th Century Greek Orthodox Churches, Krom Valley/Gümüşhane

1. Giriş

İnsanlık tarihi boyunca toplumların yaşam tarzında belirleyici bir unsur olarak karşımıza çıkan inanç ve din sistemleri ile kentler kurulmuş veya yıkılmıştır [1]. Toplumlarla çok yönlü bir etkileşimde olan inanç sistemleri beraberinde getirdikleri kurallar ve ibadet şekli ile toplumların geliştirdikleri mekanları ve mimari özellikleri de etkilemektedir. Toplum ve inanç sistemleri arasındaki ilişki karşılıklıdır. Bu doğrultuda insanlığın kültürel ve biyolojik evrim sürecinde ortaya çıkan değişimlerin de inanç sistemlerini etkilediği görülmektedir. İnanç kavramının kendi içinde sistematik bir durum ortaya koyarak oluşturduğu din olgusu toplumun yaşam tarzını ve devletleşme sistemini etkileyen temel etmenlerden birisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bağlamda değerlendirildiğinde tarihsel süreçte tapınaklardaki bürokrasinin, halk üzerinde oluşturduğu hiyerarşik farklılaşma ile organik toplum yapısında sınıfsal farkların ortaya çıktığı görülmektedir. Dinin oluşturduğu hiyerarşik sistemin yanında, kült alanlar ve tapınak sistemi Gordon Childe'a göre kentleşme sürecinin yaşanmasında önemli bir faktör olmuştur [2].

Dinin ve dini ritüellerin gerektirdiği mimari ve yapı sistemi insan ölçeğinin çok üstünde, hem yapım tekniklerinde hem de üslup birliğiyle toplumun yaratıcı gücünü mekansal ölçekte temsil etmektedir. Bu bağlamda Mezopotamya ve Mısır'da kabul edilen inanç sistemlerindeki farklılığın dini yapılardaki üslup farklılığına yansımış olması inancın tasarım alanına etkisi ve ibadet mekanıyla bütünlüğünü ortaya koymaktadır [3]. Geçmişten bugüne Bu çerçevede farklı inanç sistemlerinin farklı dini yapı tipolojilerini beraberinde getirdiği görülmektedir.Bugüne kadar dinlerin gerektirdiği ritüelleri gerçekleştirmek için üretilmiş sinagog, kilise, cami, tapınak gibi farklı tipolojilere sahip mimari yapılar inşa edilmektedir. Bu farklı dini yapılardan her biri kendi inanç sisteminin getirdiği kurallar çerçevesinde, dinin gerekliliklerini karşılamak için yapılmaktadır.

Bu kapsamda ele alındığında ilk ritüel alanlarından ibadethanelerin üretimine ve oradan günümüze kadar geçen süreçte Anadolu, farklı inanç sistemlerine ve dolayısıyla dini mimari yapılara ev sahipliği yapmış ve yapıyor olması nedeniyle önemli bir coğrafyadır. Diğer taraftan yoğun toplumsal değişimlerin yaşandığı Anadolu gibi coğrafyalarda inşa edilen dini yapıların sürdürülebilirliğinin sağlamasında toplumun yaşam tarzı, etnik kökeni ve çoğunluğun dini önemli faktörler olmaktadır. Bu durum coğrafyanın ötesinde bir dini yapınn ancak onu benimseyenler tarafından inşa ediliyor ve

gelecek nesillere aktarmak için korunuyor olmasıyla açıklanmaktadır. Buradan hareketle, bu araştırma kapsamında mimari öğelerin kalıcı unsur olması açısından gelecek nesillere aktarımının ve kültürel mirasın korunmasının öneminden [4] hareketle Anadolu coğrafyasında yer alan 19. yüzyıl Rum Ortodoks kiliselerine Krom Vadisi Kiliseleri özelinde odaklanılmaktadır.

Bu doğrultuda çalışmanın amacı, 19. yüzyılda inşa edilmiş Anadolu Rum Ortodoks Kiliseleri ile Gümüşhane il sınırları içerisinde yer alan Krom Vadisinde 19. yüzyılda yapılmış kiliselerinin özelliklerinin karşılaştırmalı olarak ortaya konulmasıdır. Çalışmanın örnek alanını oluşturan Krom Vadisi, sahip olduğu maden yatakları sebebiyle Rum Ortodoks halkına uzun süre ev sahipliği yapmıştır. Ayrıca Tanzimat Fermanının (3 Kasım 1839) ilanından sonra gayrimüslimlere dini yapı yapma hakkının verilmesi ile bölgede farklı konumlarda kiliseler inşa edilmeye devam edilmiştir. Ancak izleyen yıllarda imzalanan Lozan Barış Antlaşması (1923) ile başlayan nüfus mübadelesi sonucunda bölgedeki Rum Ortodoks halk Krom Vadisinden ayrılmıştır. Bu nedenlerle araştırmanın örneğini oluşturan ve günümüzde koruma sorunlarının gözlemlenebildiği Krom Vadisi kiliselerinin 19. yüzyıl Rum Ortodoks Kiliseleri bağlamında özelliklerinin ortaya konulması önem taşımaktadır.

Bu çerçevede bu araştırmanın izleyen bölümü olan kuramsal çerçeve kapsamında dini yapı mimarlığı, Anadolu'da kilise mimarisinin tarihsel gelişimi ve 19. yüzyıl Rum Ortodoks kiliseler konularına odaklanılacaktır. Ardından araştırmanın materyalini oluşturan Krom Vadisi kiliseleri ile araştırmanın yöntemi sunulacaktır. Çalışmanın dördüncü bölümünde, araştırma bulgularının sunulmasının ardından çalışma sonuç bölümü ile tamamlanacaktır.

2. Kuramsal Çerçeve

Çalışmanın bu bölümünde; tarihte dini yapı mimarlığı, Anadolu'da kilise mimarisinin tarihsel gelişimi, 19. yüzyıl Anadolu Rum Ortodoks kiliseleri üç başlık altında ortaya konulacaktır. Bu yolla bölümün sonunda 19. yüzyıl Anadolu kilise mimarlığının genel özellikleri belirlenmiş olacaktır.

2.1. Tarihte Dini Yapı Mimarlığı

Mimarlık, doğanın insanoğlu üzerinde oluşturduğu sınırlayıcı etki ile ortaya çıkan bir sanat dalıdır. Modern mimarlığın öncülerinden olan Mimar Louis Kahn'a göre *"mimarlık doğanın yapamadığıdır"* [5]. Buradan da hareketle mimarlığın sadece temel ihtiyaçların bir parçası değil, bu çalışmanın konusu gereğince, aynı zamanda inanç sisteminden kaynaklanan gereksinimin de ortağı olduğu vurgulanmalıdır. Diğer bir ifadeyle bir mimari eser soyut verilerin ve inanışların somutlaştırılması için de üretilmektir [6]. Kısaca mimari toplumun folklorik değerlerini, demografik yapısını, inanış şeklini de yansıtacak şekilde bağlam bağımlı olarak şekillenir. Örneğin bir toplumun gömü şekli, mezar taşları, doğaüstü varlıklara inanma ritüeli mimari öğenin bir parçasıdır. Toplumların inanç sistemleri yaşadıkları çevreyi değiştirmekte ve şekillendirmektedir. [7]. Bu nedenle mimari unsurlar toplumların inanışları doğrultusunda farklılık göstermekte ve farklı coğrafyalardaki dini yapılar farklılaşmaktadır. Diğer bir ifadeyle farklı yaşam biçimleri ve inanışlara sahip toplumların imgeleri farklı simgelere dönüşür ve gelecek nesillere mimari unsur olarak aktarılır [8].

Kısaca ritüeller, mitler, mitoslar dini yapı mimarlığının kökenini oluşturmaktadır. Her kültürde kendine özgü olan dini yapı mimarisinin belirli bir standardı veya şekli yoktur; ritüellerin ve inanışların sınırları çevresinde gelişir. Klaus Shcmidt (2007)'in bir yapının tapınak olması için dini işlevinin olmasının yeterli olduğunu [1] ifadesinden hareketle dini yapı mimarlığının onu yapanların kültürü, inanışı, gömü geleneğinin hatta ticaret kültüründen etkilenen bir tipoloji olduğunu görülmektedir. Ayrıca inanılan doğaüstü güç yapının süslemesinde, yapımda, kullanımında belirleyici ana faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu doğrultuda da dini yapı mimarisi ortaya çıktığı günden bugüne farklı tipolojilerde varlığını sürdürmektedir. Kült alanları kent içerisinde belirgin, çoğu zaman zaman işaret öğesi olarak, diğer mimari yapılardan farklı biçim ve boyutla var olmaktadır. Anıtsallık boyutunun anlam kazandığı dini yapılarının iç mekanları, zeminleri, tavan ve duvar resimleri, yapının yüksekliği döneminin yapım teknolojisi ile ilgili olduğu gibi inanış şeklini de temsil eder [3].

2.2. Anadolu'da Kilise Mimarisinin Tarihsel Gelişimi

Anadolu önemli jeopolitik konumu ile kıtalar arası bağlantı noktasındadır. Dinler tarihi açısında değerlendirildiğinde Hıristiyanlığın ortaya çıkışından yayılması ve kabul edilmesine kadar geçen süreçte Anadolu coğrafyası önemli rol oynamıştır [9]. Anadolu topraklarında yerleşik olan Roma İmparatorluğunun MS. 303-313 yılları arası Hıristiyanlara karşı olan tutumu, geçmiş yıllarda izlediği politikalardan farklı olarak Hıristiyanlığı ve inananları yok etmek üzerine kurulmuştur [10]. İmparatorluk MS. 395 yılında bölünmesinde önce Hıristiyanlığı resmi din olarak kabul etmiştir. MS. 313 yılında I. Konstantinus Milano Fermanı'nı hazırlanıp Nikomedia'da (İznik) yayınlanması Anadolu'nun Roma İmparatorluğu döneminde tarihsel ve dini açısından önemini ortaya koymaktadır [11].

Anadolu'da Hıristiyanlık dininin imparator tarafından kabul edilmesi ile Hıristiyanlara olan bakış açısında yaşanan değişim paralelinde halkın dininde de değişim gerçekleşmiş ve dönemde Hıristiyan sayısında artış olmuştur [10]. Böylece devletin egemen dini ve çoğunluğun inancı haline gelen Hıristiyanlık dini ritüellerinin gerekliliği olan dini yapı ihtiyacı artmıştır. Dönemde bazilika tipolojisinin gelişme ve farklılaşması ile değişik tipolojilerde kiliselerde yapıları ortaya çıkmıştır (Tablo 1). Kilise mimarisinde belirleyici olan birlikte ibadet etmekken, dini eğitimin verilmesi ve vaftiz törenlerinin düzenlenmesi gibi farklı alanların ortaya çıkmasıyla büyük ölçekli kiliseler yapılmaya başlanmıştır [12]. Roma İmparatorluğu'nun Doğu ve Batı Roma olarak ikiye bölünmesiyle Doğu Roma'nın Anadolu merkezli yönetimi, Anadolu'daki hakimiyet alanının genişlemesine olanak sağlamıştır. Bu durum karşılıklı bir etki oluşturmuş ve Doğu Roma'nın egemenliğinin arttığı Anadolu'da kilise yapıları artış göstermiştir [12]. Roma'nın yayılma ve iskân politikası doğrultusunda Anadolu'da kilise yapımı farklı bölgelerde de sürdürülmüştür. Diğer taraftan Anadolu'da artan Hıristiyan sayısı ile birlikle rahip ve rahibe yetiştiren manastıralar ile kilise ölçekleri yere ve ihtiyaca göre yeniden şekillenmiştir. Kamu yapılardan hamam ve tiyatro gibi yapılar ihtiyaç duyuldukça kiliseye dönüştürülmüştür. Kısaca, Anadolu'da Doğu Roma hakimiyeti süresince kilise ve manastır yapımı devam etmiş ve Hıristiyanlık dini olarak özgürce yaşanmıştır [13].

2.3. 19. Yüzyıl Anadolu Rum Ortodoks Kiliseleri

Anadolu coğrafyası insanlık tarihi boyunca farklı medeniyetlere ve dolayısıyla farklı inanç sistemlerine ev sahipliği yapmıştır. Bunun sonucunda da Anadolu coğrafyası günümüze dek sürdürülebilirliği sağlanan farklı dinlere ait dini yapılara ev sahipliği yapmaktadır. Ancak bu çalışmanın odağını 19. yüzyıl Anadolu kiliseleri oluşturduğundan bu bölümde bu yüzyıla odaklanılarak bir anlatım yapılacaktır. 1453 yılında Fatih Sultan Mehmet'in İstanbul'u fethetmesi ve Osmanlı İmparatorluğunun başkenti ilan etmesi üzerine, Anadolu'nun sosyo-kültürel ve mekânsal yapısında değişiklikler meydana gelmeye başlamıştır [14]. Bu süreçte gayrimüslimlere dini inanç özgürlüğü tanınmış ancak dini yapı yapma kısıtlaması getirilmiştir. Dini yapıların sadece devlet kontrolünde restorasyon veya yeniden inşasına izin verilmiştir [15]. Diğer taraftan Fatih Sultan Mehmet, fetihten hemen sonra Rum Ortodoks Patriğine imtiyazlar sağlamış ve Ortodoks-Katolik kiliselerinin net bir şekilde ayrılmasına öncülük etmiştir [16].

19. yüzyılda Anadolu'da hakimiyeti devam eden Osmanlılar, dönemde devlet sisteminde köklü değişiklikler gerçekleştirmiştir. Osmanlı Devleti'nde gerçekleştirilen bu değişimler halkı ve gündelik hayatı da etkisi altına almış gayrimüslim tebaanın memnun kaldığı değişiklikler de gerçekleştirilmiştir [17]. Bunların içerisinde gayrimüslimlere verilen ayrıcalık ve eşitlik hakları ile birlikte imar faaliyetleri de yer almıştır. Böylece, Anadolu'da yaklaşık 400 yıldır yapılmayan kilise, manastır, çan kuleleri tekrar yapılmaya başlanmıştır. İzleyen süreçte, 1839 yılında Tanzimat Fermanı'nı yayınlayan Osmanlı yönetimi, 1856 yılında da Islahat Fermanını yayınlamıştır. Bu yolla dil, din, millet fark etmeksizin tüm halkın eşit olmasına ilişkin bir yaklaşım geliştirilmiştir [18]. Osmanlı Devleti'nin Tanzimat Fermanını yayınlaması ile verilen imtiyazlar sonucunda azınlık halk ibadethaneler yapmaya başlamıştır. Ancak kilise yapımına izin verilmemesi ve imarsız kilise yapma şikayetlerinin artması üzerine sonraki yıllarda çıkan Islahat Fermanı ile azınlık ve gayrimüslim halka dini yapı yapma özgürlüğü verilmiştir. Böylece Anadolu'da yaşayan ve büyük çoğunluğu Ortodoks olan halk kilise, manastır, şapel ve eğitim yapıları yapmaya başlamıştır [15].

19. yüzyılda ibadethane yapılarının kısa süre içinde yapılarak sayısının özellikle bazı bölgelerde artmasındaki önemli faktörlerden biri bölgesel malzemeler ve yapım teknikleridir. Bu araştırma kapsamında 19. yüzyıl Anadolu Rum kiliselerine ilişkin yapılan literatür taraması sonucunda Tablo 1'de or-

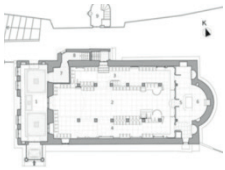
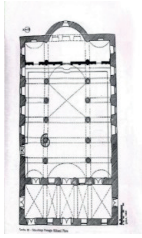
taya konulduğu gibi; dönemde inşa edilmiş Rum-Ortodoks kiliselerinin bölgesel olarak malzeme, yapım teknikleri ve yapı tipolojilerinin bölgesel olarak benzerlikler ve bölgeler arasında da farklılıklar gösterdiği görülmektedir.

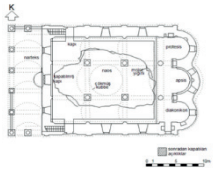
Tablo 1'de bu araştırma kapsamında incelenen 19. Yüzyıl Anadolu Rum-Ortodoks Kilise örneklerine ilişkin bilgiler sunulmuştur. Tablo 1'de yer verilen 1 no'lu kilise İstanbul Büyükdere'de bulunan Büyükdere Aya Paraskevi Kilisesi 17. yüzyılda bir yangın ile yok olmuş, 1830 yılında ise yeniden inşa edilmiştir. Kilise etrafı yüksek bir duvar ile çevrili avlu içinde bulunmaktadır. Bazilika planlı kilise üç nefle ve bir narteks bölümüne sahiptir. Kilisenin taşıyıcı sistemi ahşap ve kargir duvarlardan oluşmaktadır. Naosun zemini mermer kaplıdır ve duvarlarda sıva kullanılmıştır. Üç nefteki ahşap dikmeler kirişler ile birbirine bağlanmıştır [19]. Tablo 1'de yer alan 2 no'lu İstanbul Silivrikapı'da bulunan Silivrikapı Panagia Kilisesi'dir . Yapımı 1833 yılında başlayan bu kilisenin inşası 1835 yılında tamamlanmıştır. Bazilika plan ve üç neften oluşan kilisede, bir narteks vardır. Nefleri birbirinden ayıran sütunlar kemer ve tonoz ile birbirine bağlanarak kilisenin taşıyıcı sitemini oluşturmuştur. Kilise duvarı kaba yonu taş olarak kargir yapılmıştır. Duvarlarda tuğla ve taş birlikte kullanılmıştır. İç malzeme ve tefrişlerde mermer ve ahşap kullanıldığı bilinmektedir [20]. Tablo 1'de yer alan 3 no'lu İstanbul Fatih'te bulunan Edirnekapı Ayios Yeorgios Kilisesi 1836 yılında inşa edilmiştir. Bazilika planlı, üç nefli, yarım apsisli yapının batısında bir narteks bulunmaktadır. Dikdörtgen bir plana sahip olan yapının yan alanlarındaki dörtgen formlu çıkmalarda ikinci kata çıkan merdiven bulunur. Taşıyıcı sistemi ahşap dikme, ahşap tonoz ve kargir duvarlardan oluşmuştur. Duvarda kesme taş kullanılmış ve çatı Marsilya kiremitle kaplanmıştır [21]. Tablo 1'de bulunan 4 no'lu kilise Bursa, Mudanya'da bulunan Ayios Ioannes Kilisesidir. Bazilika planlı ve üç nefli bir kilisedir. Yapı 1846-1870 yılları arasında yapılmıştır. Nefleri ayıran sütunları tonoz ve kemer birbirine bağlayarak taşıyıcı sistemini oluşturur. İkinci katını galeri alanı oluşturur. Duvarda kireçtaşı ve moloz taş; söve, lento bölümlerinde mermer; pencerede vitray cam kullanılmıştır [22]. Tablo 1'de yer alan 5 no'lu Balıkesir, Cunda'da bulunan Taksiarhis Kilisesi 1844 yılında inşa edilmiştir. Kilisede narteks bulunur. Bazilika planlıdır ve sütunlarla ayrılan üç nefe sahiptir. Sütunlar kemer ile birbirine bağlanarak taşıyıcı sistemi oluşturur. Balıkesir'in yerel malzemesi olan sarımsak taşı kullanılmıştır. Duvarlar kargir moloz taştır. Sütunlar demir gergiler ile bağlanmıştır. Naosta beşik tonoz vardır ve çatı beşik çatıdır. İç malzeme ve tefrişte mermer ve ahşap kullanılmıştır [23]. Tablo 1'de yer alan 6 no'lu Kayseri, Merkez'de bulunan Yanartaş Rum Kilisesi

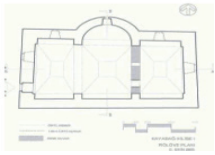
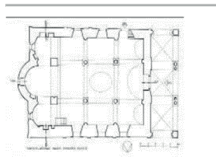
1837-1849 yılları arasında yapılmıştır. Bu kilisede yan apsislerde dışa doğru çıkmaktadır. Üç neflidir ve naosun ortasında bulunan dört sütun bir kubbeyi taşır. Sütunlar birbirine beşik tonoz ve kemer ile bağlanmıştır. Sütunların arasında demir gergiler bulunur. Duvarlar düzgün kesme taştan yapılmış, girişi sağlayan narteks vardır. Ayrıca üst kata çıkan merdivenleri bulunur [24]. Tablo 1 sunulan 7 no'lu Kayseri, Kayabağ'da bulunan Kayabağ Kilise I yapısı 1866 yılında inşa edilmiştir. Bazilika plana sahip kilise minyatür boyutlarda yapılmıştır. Üç nefli ve bir apsislidir. Sütunlar, yuvarlak kemer ve kubbe taşıyıcı sistemini oluşturur. Düzgün kesme taş ve monolit taşı yapı malzemesi olarak kullanılmıştır [25]. Tablo 1'de yer alan 8 no'lu kilise Kayseri, Merkez'de bulunan Hagios Prokopoios Kilisesi'dir. 1857 yılında tamamlanan kilise bazilika planlıdır. Bir narteksi bulunan kiliseye girişler buradan yapılır. Nefleri ayıran sütunlar beşik tonoz ile birbirine bağlanmıştır. Naosun üzerinde bir kubbe yer almaktadır. Duvarlarda düzgün kesme taş kullanılmıştır. Ayrıca mermer görünümlü stuko panolar mevcuttur [26]. Tablo 1'de yer alan 9 no'lu kilise Antalya, Kaleiçi'nde 1834 yılında yapımı tamamlanan Panhagia Kilisesidir. Kilise bazilika planlı ve ahşap kubbelidir. Duvarları moloz taştan yapılmıştır ve kargir olan bu sistemde ahşap hatıl kullanılmıştır. Taşıyıcı sistemi nefleri birbirinden ayıran sütunlar ve sütunları birbirine bağlayan çapraz tonozlardır. Kilise apsisi yuvarlak bir şekilde dışarı çıkmak yerine cephede çokgen görünümlü bir çıkma yapmıştır [27]. Tablo 1'de bulunan 10 no'lu Gümüşhane'nin Şiran ilçesindeki Çevrepınar Köyü Kilisesi'nin yapım tarihi belli olmamakla birlikte, 19. yüzyılda yapıldığı bilinmektedir. Kilise üç nefli ve bazilika planlıdır. Nefler birinden sütunlar ile ayrılır. Sütunlar kemer ve beşik tonoz ile bağlanarak taşıyıcı sistemini oluştururlar. Duvarlar düzgün kesme taştan yapılmıştır fakat bazı bölümlerde kaba yonu taş da bulunmaktadır. Ana apsis bir pencere ile ışık almaktadır. Yan apsisler cephede ana apsisin gerisinde kalmaktadır. Narteks bu kilisede bulunmaz ve giriş naosun sonundadır. Kilisenin tek cephesinde üç adet mazgal pencere bulunur [28]. Tablo 1'de yer alan 11 no'lu Ordu'nun Fatsa ilçesinde bulunan Yason Kilisesi 19. yüzyıl Rum Ortodoks kilisesidir. Narteksi bulunmayan kilisenin naosunun doğusunda bir apsis bulunur. Apsiste bir adet mazgal pencere yer alır. Naosun ortasında bir kubbe yer alır ve bu kubbeyi taşıyan sütunlar birbirine kemerler ile bağlanmıştır. Yapı düzgün kesme taş bloklardan yapılmıştır. İncelemeler sonucunda duvarda harç dolgusu olduğu gözlemlenmiştir. Tek girişi olan kilisenin her iki uzun cephesinde üç adet mazgal pencere bulunur [29]. Tablo 1'de yer alan 12 no'lu Erzurum, Yakutiye'de bulunan Demirciler Kilisesi tam tarih belli olmamakla birlikte 19. yüzyıl Rum Ortodoks Kilisesi olduğu düşünülmek-

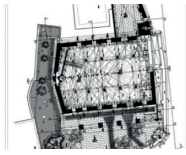
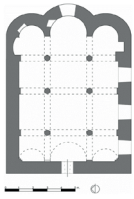
tedir. Bir ana apsis ve iki yan apsisi vardır. Büyük apsis üç cephelidir. Yan apsisler tek cephelidir. Kiliseye giriş narteksten sağlanır. Nefleri birbirinden ayıran sütunlar birbirlerine beşik tonoz ve kemer ile bağlanırlar. Yapı duvarında düzgün kesme taş ve moloz taş birlikte kullanılmıştır. Kilisenin her iki nef duvarında üç mazgal pencere bulunur [30].

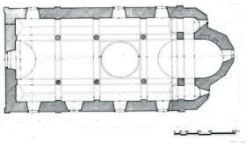
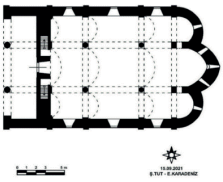
Tablo 1. 19. yüzyıl Anadolu Rum Ortodoks Kiliseleri ve Özellikleri

No	Kilise	Tipoloji	Yapım Yılı
1	Büyükdere Aya Paraskevi Kilisesi [19] Sarıyer, İstanbul	Bazilika Plan	1830
	Plan	**Taşıyıcı Sistem**	**Malzeme**
	 *Tablo 1. No 1*	Yığma Kargir Duvar Ahşap Dikme Ahşap Kiriş Ahşap Tonoz	Tuğla Kaba Yonu Taş Mermer Ahşap
No	**Kilise**	**Tipoloji**	**Yapım Yılı**
2	Silivrikapı Kilisesi [20] Silivrikapı, İstanbul	Bazilika Plan	1833-1835
	Plan	**Taşıyıcı Sistem**	**Malzeme**
	 *Tablo 1. No 2*	Yığma Kargir Duvar Sütun Kemer Tonoz	Düzgün Kesme Taş Ahşap Mermer Vitray
No	**Kilise**	**Tipoloji**	**Yapım Yılı**

	Edirnekapı Ayios Yeorgios Kilisesi [21] Edirnekapı, İstanbul	Bazilika Plan	1836
	Yıl	**Taşıyıcı Sistem**	**Malzeme**
3	 *Tablo 1. No 3*	Yığma Kargir Duvar Ahşap Tonoz Ahşap Dikme Ahşap Kemer	Düzgün Kesme Taş Ahşap Marsilya Kiremiti
No	**Kilise**	**Tipoloji**	**Yapım Yılı**
	Ayios Ioannes Kilisesi [22] Mudanya, Bursa	Bazilika Plan	1846-1870
	Plan	**Taşıyıcı Sistem**	**Malzeme**
4	 *Tablo 1. No 4*	Yığma Kargir Duvar Beşik Tonoz Kemer Kubbe	Moloz Taş Mermer Düzgün Kesme Kireçtaşı Vitray
No	**Kilise**	**Tipoloji**	**Yapım Yılı**
	Taksiarhis Kilisesi [23] Cunda, Balıkesir	Bazilika Plan	1844
	Yıl	**Taşıyıcı Sistem**	**Malzeme**
5	 *Tablo 1. No 5*	Yığma Kargir Duvar Çapraz Tonoz Kemer Kubbe Sütun	Demir Gergi Mermer Moloz Taş Düzgün Kesme Sarımsak Taşı
No	**Kilise**	**Tipoloji**	**Yapım Yılı**
	Yanartaş Rum Kilisesi [24] Merkez, Kayseri	Bazilika Plan	1837-1849
	Plan	**Taşıyıcı Sistem**	**Malzeme**
6	 *Tablo 1. No 6*	Yığma Kargir Duvar Beşik Tonoz Kemer Kubbe Sütun	Düzgün Kesme Taş Taş Duvar Demir Gergi
No	**Kilise**	**Tipoloji**	**Yapım Yılı**

	Kayabağ Kilise I [25] Kayabağ, Kayseri	Bazilika Plan	1866
	Yıl	**Taşıyıcı Sistem**	**Malzeme**
7	 *Tablo 1. No 7*	Yığma Kargir Duvar Yuvarlak Kemer Kubbe Sütun	Düzgün Kesme Taş Monolit Taşı
No	**Kilise**	**Tipoloji**	**Yapım Yılı**
	Hagios Prokopoios Kilisesi [26] Merkez, Kayseri	Bazilika Plan	1857
	Plan	**Taşıyıcı Sistem**	**Malzeme**
8	 *Tablo 1. No 8*	Yığma Kargir Duvar Beşik Tonoz Sütun Kubbe Kemer	Düzgün Kesme Taş Stuko Panolar Demir Gergi

No	**Kilise**	**Tipoloji**	**Yapım Yılı**
	Panagia Kilisesi [27] Kaleiçi, Antalya	Bazilika Plan	1834
	Yıl	**Taşıyıcı Sistem**	**Malzeme**
9	 *Tablo 1. No 9*	Yığma Kargir Duvar Ahşap Kubbe Çapraz Tonoz Sütun Kemer	Düzgün Kesme Taş Ahşap Hatıl Moloz Taş Duvar
No	**Kilise**	**Tipoloji**	**Yapım Yılı**
	Çevrepınar Köyü Kilisesi [28] Şiran, Gümüşhane	Bazilika Plan	19. Yüzyıl
	Plan	**Taşıyıcı Sistem**	**Malzeme**
10	 *Tablo 1. No 10*	Yığma Kargir Duvar Sütun Kemer Beşik Tonoz	Düzgün Kesme Taş Kaba Yonu Taş

No	Kilise	Tipoloji	Yapım Yılı
11	Yason Kilisesi [29] Fatsa, Ordu	Bazilika Plan	19. Yüzyıl
	Plan	**Taşıyıcı Sistem**	**Malzeme**
	 *Tablo 1. No 11*	Yığma Kargir Duvar Sütun Kemer Kubbe	Düzgün Kesme Taş Harç Dolgulu Duvar
No	**Kilise**	**Tipoloji**	**Yapım Yılı**
12	Demirciler Kilisesi [30] Yakutiye, Erzurum	Bazilika Plan	19. Yüzyıl
	Plan	**Taşıyıcı Sistem**	**Malzeme**
	 *Tablo 1. No 12*	Yığma Kargir Duvar Sütun Kemer Beşik Tonoz	Düzgün Kesme Taş Taş Duvar Moloz Taş

Bu araştırma kapsamında ikincil kaynaklara dayalı olarak 12 kilise ortaya konulmuştur. Çalışmanın izleyen bölümünde araştırmanın materyal ve yönteminin sunumunun ardından bu bölümde elde edilen bulgulardan (Tablo 1) karşılaştırmalı analiz sürecinde yararlanılacaktır. Bu çerçevede çalışma kapsamında oluşturulan Tablo 2'de, Tablo 1'de incelenen 12 kilise taşıyıcı sistem, malzeme ve tipoloji özelliklerine göre sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma kapsamında kiliselerin mimari özelliklerinden hareketle taşıyıcı sistem yığma kargir duvar, sütun-kemer, tonoz, kubbe, ahşap dikme-ahşap kemer olmak üzere 5 ana başlıkta gruplandırılmıştır. Tablo 2'de kiliseler malzemelerinden hareketle tuğla, moloz taş-kaba yonu taş, mermer, ahşap, düzgün kesme taş başlıkları altında sınıflandırılmıştır. Bu araştırma kapsamında incelenen 12 kilisenin de bazilika planlı olması nedeni ile tipoloji tek bir başlık olan bazilika plan altında toplanmıştır.

Tablo 2. 19. yüzyıl Anadolu Rum Ortodoks Kiliselerinin Özellikleri (Tablo 1'de kullanılan kaynaklar ile yazar tarafından oluşturulmuştur.)

Taşıyıcı Sistem		Malzeme		Tipoloji	
Yığma Kargir Duvar	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12 No'lu Kiliseler	**Tuğla**	1 No'lu Kilise	**Bazilika Plan**	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12 No'lu Kiliseler
Sütun Kemer	2-4-5-6-7-8-9-10-11-12 No'lu Kiliseler	**Moloz Taş Kaba Yonu Taş**	1-4-5-9-10-12 No'lu Kiliseler		
Tonoz	1-2-3-4-5-6-8-9-10-12 No'lu Kiliseler	**Mermer**	1-2-4-5 No'lu Kiliseler		
Kubbe	4-5-6-7-8-9-11 No'lu Kiliseler	**Ahşap**	1-2-3-9 No'lu Kiliseler		
Ahşap Dikme Ahşap Kemer	1 ve 3 No'lu Kiliseler	**Düzgün Kesme Taş**	2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12 No'lu Kiliseler		
		Demir	5-6-8 No'lu Kiliseler		

Diğer taraftan bu araştırmanın konusunu oluşturan ve Tablo 1'de yer verilmeyen Krom Vadisi Kiliseleri 19. Yüzyıl Rum-Ortodoks kiliseleri için önemli örnekler teşkil etmektedir. Bu araştırma kapsamında yapılan literatür taraması kapsamında Krom Vadisi ve kiliselerine ilişkin çalışmalar [31], [32], [33] olduğu görülmüştür. Ancak bugüne kadar alan ile ilgili üretilmiş çalışmalarda Krom Vadisi kiliseleri ve korunma sorunsalı detaylı olarak ele alınmamıştır. Bu nedenle bu araştırma kapsamında literatüre katkı yapmak ve gözlemler doğrultusunda koruma sorunları ile karşı karşıya oldukları okunabilen Krom Vadisi kiliseleri çalışılarak literatüre katkı yapılması amaçlanmıştır.

3. Materyal ve Yöntem

3.1. Materyal: Krom Vadisi Kiliseleri

Gümüşhane'nin Torul ilçesine bağlı Krom Vadisi; yerleşim tarihi içerisinde farklı uygarlıklar tarafından Kurum, Kromni, Gurom gibi isimler ile adlandırılmıştır. "Kromni" adı Yunanca dilinde kayalık anlamına gelmektedir. Buradan hareketle, 19. yüzyılda bölgede yaşayan Rum halkı bölgeye Kromni, Kromnainoi gibi isimler vermişlerdir. Krom Vadisi maden ocakları

açısından zengin bir yerleşim yeridir 19. yüzyılın ortalarına dek çalışan bu maden ocakları [31], bu tarihten sonra orman tahribatı ve nüfus mübadelesi sonucunda eski işlevini kaybederek kapanmıştır.

Bu araştırmanın materyalini oluşturan, kilise, şapel ve manastır yapıları Tanzimat ve Islahat Fermanlarının ardından 19. yüzyılda Krom Vadisi'nde, yapılmıştır. Krom Vadisi'nin konumu ve yoğun ticari faaliyetler nedeniyle dönemde büyük bir nüfusa ev sahipliği yaptığı bilinmektedir [31]. Krom Vadisinde görülen mimari üzerinde yerel halk belirleyici olmuştur. Bölgede diğer mimari yapılarda olduğu gibi kiliseler de yerel malzeme ile inşa edilmiştir [31].

Bu araştırma kapsamında çalışmanın örnek alanını oluşturan Krom Vadisi ve kiliselerine ilişkin yapılan literatür taraması kapsamında konu ile ilgili bugüne kadar üretilmiş sınırlı sayıda bilimsel çalışma olduğu görülmüştür. Bunlardan, Erüz (2009) doktora tezi kapsamında Krom Vadisi'nde 19. yüzyılda yapılan yapıları arazi çalışması ile belgeleyerek, yapı ve yerleşim envanterleri hazırlamıştır. Çalışmada maden ocaklarının tarih öncesi çağlardan bugüne kadar değişimini bölgedeki yerleşimi nasıl etkilediğini incelenerek, bölgedeki yerleşim ve yapılaşma ortaya konulmuştur. Ayrıca çalışmada İpek Yolu güzergahının Kurum Vadisi bölgesindeki yerleşimi nasıl etkilediğini de tartışılmıştır [32]. Türkfiliz (2023) ise "Nüfusunu Kaybetmiş Bir Kültürel Peyzajın Korunması İçin Prensipler Ve Stratejiler: Gümüşhane Krom Vadisi" başlıklı çalışmasında, 30 Ocak 1923 yılında imzalanan Lozan Barış Antlaşması ile gerçekleştirilen nüfus mübadelesinde yerleşim alanlarından ayrılan Rum halkına Krom Vadisi örneğinde odaklanmıştır. Çalışmanın sonucunda, Türkfiliz (2023) mübadeleden önce 15 mahalle ve yaklaşık 6000 nüfusa sahip olan ancak Krom Vadisi'nin mübadele sonucunda terk edilmiş Krom Vadisi yerleşim alanlarının değerlendirilmesi ve korunması için öneriler sunmuştur [33].

Bu araştırma kapsamında ise literatürde yer alan Krom Vadisi örneğindeki diğer çalışmalardan farklı olarak örnek alanda bulunan dini yapılardan 10 kilise incelenmiştir. Bu araştırmanın sınırlılığı da bu noktada ortaya çıkmıştır. Krom Vadisi'nin arazi koşulları ve kiliselerin erişilebilirliği araştırma kapsamında odaklanılan kiliselerin seçiminde belirleyici olmuştur.

3.2. Yöntem

Bu araştırma kapsamında Krom Vadisi 19. Yüzyıl kiliselerinin ortaya konulması ve Anadolu'da aynı dönemde inşa edilmiş kiliseler ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda çalışmada, öncelikle 19. Yüzyıl Anadolu kiliselerinden literatür taraması sonucunda seçilen örnekler üzerinden ikincil kaynaklara dayalı olarak bilgi üretilmiştir. Krom Vadisi kiliseleri ile aynı dönemde inşa edilmiş diğer Anadolu kiliselerinin karşılaştırılmasında kullanılacak ve bu araştırma kapsamında üretilen bilgi Tablo 1 ve özet olarak Tablo 2'de sunulmuştur. Karşılaştırmalı analiz tekniği kullanılarak kiliselerin ortak ve farklı yönlerinin ortaya konulması amaçlandığından bu araştırma kapsamında Anadolu genelinde 19. Yüzyıl Rum Ortodoks kiliseleri için yapıldığı gibi Krom Vadisi kiliselerine ilişkin de ikincil kaynaklardan yararlanarak ve saha çalışmasıyla elde edilen bulguların sunulmasının ardından (Tablo 3), karşılaştırmalı analiz sonucunda elde edilen bulgular Tablo 4'de sunulacaktır. Çalışmanın yöntemi doğrultusunda kuramsal çerçevede sunulan 19. yüzyıl Anadolu kiliseleri (Tablo 1) ve materyal kısmında sunulan 19. yüzyıl Krom Vadisi kiliseleri (Tablo 3) karşılaştırmalı analiz yolu ile bulgular bölümünde bir tabloda değerlendirilmiştir (Tablo 4).

4. Bulgular

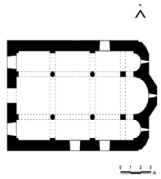
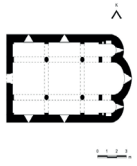
Bu araştırmanın örneğini oluşturan ve maden kaynakları ile tanınan Krom Vadisi, maden kaynaklarının yanı sıra kireç taşı yataklarına da sahiptir. Kireç taşının yerel malzeme olarak kullanıldığı bölgelerde inşa edilen yapılarda genellikle kireç taşı kullanılmaktadır. Kireç taşının özelliklerinden biri, kolay işlenebilir olmasıdır ve zamanla sertleşmesidir. Tablo 1 ve Tablo 2'de de görüldüğü gibi dönemde Anadolu'da inşa edilmiş kiliselerde yaygın olarak yerel malzeme ve yapım teknikleri kullanılmıştır. Bu durumun Krom Vadisi Kiliseleri içinde geçerlidir. Bölgedeki kiliseler incelendiğinde, Tablo 3'de de görüldüğü gibi, yapıların beden duvarlarında kullanılan bir diğer malzemenin moloz taş olduğu görülmüştür. Krom Vadisi kiliseleri yaygın olarak su basman seviyesine kadar moloz taş üzerine düzgün kesme taş duvar yapılarak inşa edilmiştir. Araştırma kapsamında incelenen kiliselerde ise düzgün kesme kireç taşı kullanıldığı görülmüştür. Sadece kiliselerde değil, Krom Vadisinde bulunan diğer yapılarda da kireç taşı kullanılmıştır. Diğer tarafta bölgenin coğrafi konumu ve iklim koşulları sebebiyle ahşap kaynaklarına erişimin kolay olduğu bilinmektedir. Bu nedenle yapılarda kapı, pencere,

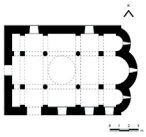
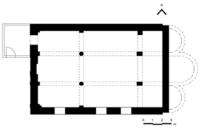
çatı gibi yerlerde ahşap kullanılmıştır. Yapıların taşıyıcı sistemi yığmadır. Beden duvarlarında kargir duvar kullanılmıştır. İç taşıyıcı sistemde sütun, ahşap dikme, kemer, tonoz gibi yapı elemanları vardır. Kiliselerin genel olarak üç nefli ve apsisli oldukları görülmüştür.

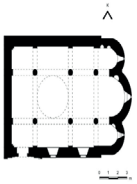
Krom vadisinde bulunan ve bu çalışmada örnek olarak incelenen 10 kiliseyi tek tek ele aldığımızda, Tablo 3'de de görüldüğü gibi 1 nolu kilise Alikinos Kilisesi'dir. Kilise bazilika planlı ve üç neflidir. Taşıyıcı sistemi kemer, sütun ve kemerden oluşmaktadır. Yığma yapı olan kilisede ahşap, kesme ve moloz taş kullanılmıştır. 2 nolu kilise olan Zemberek Kilisesi'nde iç taşıyıcı örtü tamamen yıkılmıştır. Kilisenin sadece beden duvarları vardır ve taşıyıcı sistem olarak sütun kaideleri bulunur. Alikinos Kilisesi gibi Zemberek Kilisesi'nde de ahşap ve düzgün kesme taş kullanılmıştır. Düzgün kesme taş bölgedeki kireç taşı ocaklarından elde edilmiştir. Tablo 3'te görülen 3 no'lu kilise Mohora Kilisesi'dir. Bazilika planlı kilise üç neflidir. Taşıyıcı sistemi sütun ve beşik tonozdur. Ahşap, kesme taş ve moloz kireç taşı kullanılmıştır. 4 no'lu kilise olan Şamanlı Camii bugün camii olarak kullanılmaktadır. 19. yüzyıl kilisesi olan Şamanlı Camii üç neflidir. Doğu cephesinde bulunan üç apsis yıkılmıştır. Kilise camiye dönüşme sırasında restorasyon geçirerek batı cephesine bir minare eklenmiştir. 5 no'lu İmera Manastır Kilisesi'nde manastır yapısı günümüze ulaşamamıştır. Manastırın kilise yapısı restorasyon geçirerek bugüne ulaşmıştır. Bazilika planlı olan kilise kubbeli bir kilisedir. Üç nefli ve bazilika planlıdır. Tablo 3'te yer alan bir diğer kilise 6 no'lu Gavalak Büyük Kilisesidir. Bazilika planlı ve üç nefli kilisede, yer yer freskler görülmektedir. Kilisenin batı cephesinde narteks bulunur. Malzeme olarak ahşap, moloz ve kesme kireç taşı kullanılmıştır. 7 no'lu kilise Sarıoğlu Kilisesi'dir. Kilise bazilika planlıdır ve üç neflidir. İç taşıyıcı sistemi ve üst örtüsü tamamen çökmüştür. Malzeme olarak ahşap, kesme ve moloz kireç taşı kullanılmıştır. 8 no'lu Şamanlı Kilise Krom Vadisi'nde yer alan tek haç planlı kilisedir. Dörtgen şekilli iki penceresi ve apsiste bir mazgal penceresi vardır. Taşıyıcı sistem olarak yığmadır. Malzeme olarak ahşap, kesme ve moloz kireç taşı kullanılmıştır. Tablo 3'te yer alan 9 no'lu Livama Kilisesidir. Yuvarlak kemerli bir girişi bulunur, Fresklerdeki bazı resimler bugün okunabilmektedir. İç taşıyıcı sistem ve üst örtü tamamen yıkılmıştırç Kilise içinde sütun kaideleri bulunur. Malzeme olarak ahşap ve kireç taşı kullanulmıştır. 10 no'lu Kayaaltı Kilisesi bazilika planlıdır ve üç neflidir. Kilise kemerli bir girişe sahiptir. Pencereler güney cephesindedir. Yığma sistemden oluşan kilisede, diğer kiliselerde olduğu gibi ahşap ve kireç taşı kullanılmıştır.

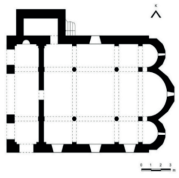
Krom Vadisinde incelenen kiliselerin mimari özellikleri dışında, araştırma kapsamında elde edilen veriler topoğrafyanın erişilebilirliği zorlaştırması ve arazi şartları nedeniyle her mahallede kilise inşa edildiğini göstermektedir. Kiliselerin mevcut durumlarına bakıldığında ise çok sayıda kilise bulunan bir yerleşim alanı olmasına karşın, bu araştırma kapsamında incelenen kiliselerin birçoğunda çatı örtüsünün yıkılmış olduğu görülmüştür. Bu durum Krom Vadisi kiliselerinin koruma sorunları ile karşı karşıya olduklarını diğer bir ifade ile sürdürülebilirliklerinin tehdit altında olduklarını göstermektedir. Krom Vadisinde yer alan ve çatısı sağlam olan kilise yapılarında ise genelde içten kemer veya tonozlu beşik çatı kullanıldığı görülmüştür.

Tablo 3. 19. yüzyıl Krom Vadisi Rum Ortodoks Kiliseleri ve Özellikleri

<table>
<tr><th>Görsel</th><th colspan="2">Kilise Adı - Mahalle</th><th>Tipoloji - Bazilika</th></tr>
<tr><td rowspan="5">
Tablo 3. Şekil 1. Alikinos Kilisesi (Yazarın Arşivinden)</td><td colspan="2">Alikinos Kilisesi - Alikinos Mahallesi</td><td rowspan="5">
Tablo 3. No 1. Alikinos Kilisesi Rölöve Çizimi</td></tr>
<tr><td>Taşıyıcı Sistem</td><td>Malzeme</td></tr>
<tr><td>Kemer
Sütun
Tonoz
Yığma</td><td>Ahşap
Kesme ve Moloz
Kireç Taşı</td></tr>
<tr><td>Kullanım Durumu</td><td>Koruma Durumu</td></tr>
<tr><td>Kullanılmıyor</td><td>İyi</td></tr>
<tr><th>Görsel</th><th colspan="2">Kilise Adı - Mahalle</th><th>Tipoloji - Bazilika</th></tr>
<tr><td rowspan="5">
Tablo 3. Şekil 2. Zemberek Kilisesi (Yazarın Arşivinden)</td><td colspan="2">Zemberek Kilise - Zemberekli Mahallesi</td><td rowspan="5">
Tablo 3. No 2. Zemberek Kilisesi Rölöve Çizimi</td></tr>
<tr><td>Taşıyıcı Sistem</td><td>Malzeme</td></tr>
<tr><td>Sütun
Yığma</td><td>Ahşap
Kesme Ve Moloz
Kireç Taşı</td></tr>
<tr><td>Kullanım Durumu</td><td>Koruma Durumu</td></tr>
<tr><td>Kullanılmıyor</td><td>Kötü</td></tr>
</table>

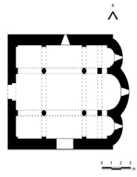
Görsel	Kilise Adı - Mahalle		Tipoloji - Bazilika
 *Tablo 3. Şekil 3. Mohara Kilisesi (Yazarın Arşivinden)*	Mohora Kilisesi – Mohora Mahallesi		 *Tablo 3. No 3. Mohara Kilisesi Rölöve Çizimi*
	Taşıyıcı Sistem	**Malzeme**	
	Sütun Beşik Tonoz Yığma	Ahşap Kesme Ve Moloz Kireç Taşı	
	Kullanım Durumu	**Koruma Durumu**	
	Kullanılmıyor	Kötü	
Görsel	**Kilise Adı - Mahalle**		**Tipoloji - Bazilika**
 *Tablo 3. Şekil 4. Şamanlı Camii (Yazarın Arşivinden)*	Şamanlı Camii - Şamanlı Mahallesi		 *Tablo 3. No 4. Şamanlı Camii- Kilisesi Rölöve Çizimi*
	Taşıyıcı Sistem	**Malzeme**	
	Sütun Kemer Yığma	Ahşap Kesme Ve Moloz Kireç Taşı	
	Kullanım Durumu	**Koruma Durumu**	
	Cami	Orta	

Görsel	Kilise Adı - Mahalle		Tipoloji - Bazilika
 *Tablo 3. Şekil 5. İmera ManastırKilisesi (Yazarın Arşivinden)*	İmera Manastır Kilisesi - Olucak Mahallesi		 *Tablo 3. No 5. İmera Manastır Kilisesi Rölöve Çizimi*
	Taşıyıcı Sistem	**Malzeme**	
	Sütun Beşik Tonoz Yığma	Ahşap Kesme ve Moloz Kireç Taşı	
	Kullanım Durumu	**Koruma Durumu**	
	Kullanılmıyor	İyi	

Görsel	Kilise Adı - Mahalle		Tipoloji - Bazilika
	Gavalak Büyük Kilise - Bulutyayla Mahallesi		
	Taşıyıcı Sistem	**Malzeme**	
	Sütun Beşik Tonoz Yığma	Ahşap Kesme Ve Moloz Kireç Taşı	
	Kullanım Durumu	**Koruma Durumu**	
	Kullanılmıyor	Kötü	

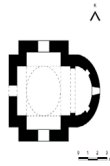
Tablo 3. Şekil 6. Gavalak Büyük Kilise (Yazarın Arşivinden)

Tablo 3. No 6. Gavalak Büyük Kilise Rölöve Çizimi

Görsel	Kilise Adı - Mahalle		Tipoloji - Bazilika
	İmera Manastır Kilisesi - Olucak Mahallesi		
	Taşıyıcı Sistem	**Malzeme**	
	Sütun Beşik Tonoz Yığma	Ahşap Kesme Ve Moloz Kireç Taşı	
	Kullanım Durumu	**Koruma Durumu**	
	Kullanılmıyor	Kötü	

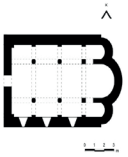
Tablo 3. Şekil 7. Sarıoğlu Kilisesi (Yazarın Arşivinden)

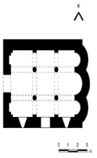
Tablo 3. No 7. Sarıoğlu Kilisesi Rölöve Çizimi

Görsel	Kilise Adı - Mahalle		**Tipoloji** – Haç Plan
	Şamanlı Kilisesi – Ortayayla Mahallesi		
	Taşıyıcı Sistem	**Malzeme**	
	Yığma Kubbe	Ahşap Kesme Ve Moloz Kireç Taşı	
	Kullanım Durumu	**Koruma Durumu**	
	Kullanılmıyor	Kötü	

Tablo 3. Şekil 8. Şamanlı Kilisesi (Yazarın Arşivinden)

Tablo 3. No 8. Şamanlı Kilisesi Rölöve Çizimi

Görsel	Kilise Adı - Mahalle		Tipoloji - Bazilika
 *Tablo 3. Şekil 9. Livana Kilisesi (Yazarın Arşivinden)*	Livana Kilisesi – Livana Mahallesi		 *Tablo 3. No 9. Livana Kilisesi Rölöve Çizimi*
	Taşıyıcı Sistem	**Malzeme**	
	Yığma Sütun	Ahşap Kesme Ve Moloz Kireç Taşı	
	Kullanım Durumu	**Koruma Durumu**	
	Kullanılmıyor	Kötü	

Görsel	Kilise Adı - Mahalle		Tipoloji - Bazilika
 *Tablo 3. Şekil 10. Kayaaltı Kilisesi (Yazarın Arşivinden)*	Kayaltı Kilisesi - Mohara Mahallesi		 *Tablo 3. No 10. Kayaaltı Kilisesi Rölöve Çizimi*
	Taşıyıcı Sistem	**Malzeme**	
	Yığma Sütun	Ahşap Kesme Ve Moloz Kireç Taşı	
	Kullanım Durumu	**Koruma Durumu**	
	Kullanılmıyor	Kötü	

Tablo 4. 19. yüzyıl Anadolu Kiliseleri ve Krom Vadisi Rum Ortodoks Kiliseleri Özellikleri

Anadolu 19. yüzyıl Kiliseleri	**Kullanımı**	**Koruma Duruma**	**Tipolojisi**	**Taşıyıcı Sistem**	**Malzeme**
Büyükdere Aya Paraskevi Kilisesi	Kullanılmıyor	İyi - Niteliksiz ek	Bazilika	Yığma	Taş, tuğla, ahşap
Silivrikapı Panagia Kilisesi	Kullanılmıyor	Kötü	Bazilika	Yığma	Taş, ahşap, mermer
Edirnekapı Ayios Yeorgios Kilisesi	Restore edildi	İyi	Bazilika	Yığma	Taş, ahşap, kiremit
Ayios Ioannes Kilisesi	Kullanılmıyor	Kötü	Bazilika	Yığma	Taş, mermer
Taksiarhis Kilisesi	Restore edildi Önceden depo	İyi Kötü	Bazilika	Yığma	Demir, mermer, taş
Yanartaş Rum Kilisesi	Kullanılmıyor	Kötü	Bazilika	Yığma	Taş, demir
Kayabağ Kilise I	Kullanılmıyor	Kötü	Bazilika	Yığma	Taş
Hagios Prokopoios Kilisesi	Kullanılmıyor	Kötü	Bazilika	Yığma	Taş, demir
Panagia Kilisesi	Camii	İyi	Bazilika	Yığma	Taş, ahşap
Çevrepınar Köyü Kilisesi	Kullanılmıyor	Kötü	Bazilika	Yığma	Taş
Yason Kilisesi	Kullanılmıyor	İyi	Bazilika	Yığma	Taş, harç
Demirciler Kilisesi	Camii	İyi	Bazilika	Yığma	Taş
Krom Vadisi 19. yüzyıl Kiliseleri	**Kullanımı**	**Koruma Duruma**	**Tipolojisi**	**Taşıyıcı Sistem**	**Malzeme**
Alikinos Kilisesi	Kullanılmıyor	İyi	Bazilika	Yığma	Kireç Taşı, ahşap
Zemberek Kilisesi	Kullanılmıyor	Kötü	Bazilika	Yığma	Kireç Taşı, ahşap
Mohora Kilisesi	Kullanılmıyor	Kötü	Bazilika	Yığma	Kireç Taşı, ahşap
Şamanlı Camii	Camii	Orta - Niteliksiz ek	Bazilika	Yığma	Kireç Taşı, ahşap
İmera Manastır Kilisesi	Kullanılmıyor	İyi - Restore edildi	Bazilika	Yığma	Kireç Taşı, ahşap
Gavalak Büyük Kilise	Kullanılmıyor	Kötü	Bazilika	Yığma	Kireç Taşı, ahşap
Sarıoğlu Kilisesi	Kullanılmıyor	Kötü	Bazilika	Yığma	Kireç Taşı, ahşap
Şamanlı Kilisesi	Kullanılmıyor	Kötü	Haç Plan	Yığma	Kireç Taşı, ahşap
Livana Kilisesi	Kullanılmıyor	Kötü	Bazilika	Yığma	Kireç Taşı, ahşap
Kayaaltı Kilisesi	Kullanılmıyor	Kötü	Bazilika	Yığma	Kireç Taşı, ahşap

Son olarak, Tablo 1 ve 2'de sunulan 19. Anadolu Rum Ortodoks kiliseleri ile Tablo 3'de sunulan Krom Vadisi kiliseleri karşılaştırıldığında (Tablo 4); çalışılan yirmi iki kilise de iki farklı plan tipolojisi olduğu saptanmıştır. Kiliselerin yirmi biri bazilika planlıdır, bir tanesi ise haç planlıdır. İncelenen kiliselerde bazilika planın yaygın olduğu görülmektedir. Sunulan kiliselerin taşıyıcı sistemi tüm kiliselerde yığma tekniği ile inşa edilmiştir. Çalışmada ele alınan yirmi iki kilise malzeme malzeme anlamında değerlendirildiğinde ahşap kullanımının benzer özellikler gösterdiği, mermer, taş ve demirin farklı özellikler gösterdikleri görülmektedir. Kiliselerde kullanılan malzemeler yerel malzemelerden seçilmesi sebebi ile yere ve bölgeye göre değişmektedir. Kiliseler Koruma durumları bağlamında değerlendirildiğinde ise yirmi iki kiliseden sekizinin iyi durumda olduğu fakat iyi durumda olan kiliselerden ikisinde niteliksiz ekler olduğu saptanmıştır. Bir kilise ise orta durumdadır fakat niteliksiz ek ile müdahale edilmiştir. Kalan on üç kilise kötü durumdadır. Kötü durumda olan tüm kiliseler kullanılmıyor veya mübadele sonrasında depo, ahır yapıları olarak kullanılmıştır. Çalışmada sunulan yirmi iki kiliseden üç kilise bugün kullanılmakta olup, kalan yirmi bir kilise kullanılmamaktadır.

5. Sonuç

Bu çalışma kapsamında 19. yüzyıl Anadolu kiliselerinin ve Krom Vadisi kiliselerinin özeliklerinin ortaya konularak, karşılaştırmalı analiz yapılarak-Krom Vadisi kiliselerinin 19. yüzyıl Anadolu kiliseleri ile benzerlik ve farklılıklarının saptanması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, 19. yüzyıl Anadolu kiliselerine örnek olarak bu çalışma kapsamında sunulan on iki kilise incelendiğinde, (Tablo 1 ve 2), bu çalışmanın sonucunda ortak özelliklerinin bazilika planlı ve yığma olmaları olduğu görülmüştür. Ayrıca kiliselerin beden duvarlarının genellikle moloz ve düzgün kesme taş ile yapıldığı anlaşılmaktadır. Ahşap genellikle hatıllarda ve kapı pencerelerde kullanılan bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu araştırma kapsamında incelenen 19. Yüzyıl Anadolu kiliselerinde pencere, kapı ve köşelerde düzgün kesme taş veya mermer kullanıldığı ortaya konulmuştur. Ayrıca dönem kiliselerinin genellikle üç nefli ve apsisli oldukları görülmüştür. Yaygın olarak nefler birbirinden sütunlar ile ayrılmıştır ve apsisler yarım kubbe ile kapatılmıştır. Araştırma kapsamında incelenen on iki kiliseden ikisi bugün halen kullanılmakta olup, iyi durumdadır. İki kilise restore edilmiştir ve kullanılmayan iki kilise de iyi durumdadır. Kalan altı kilise ise günümüzde kullanılmamakta

ve kötü durumdadır. Kiliselerin malzeme olarak ortak yönlerinin taş olduğu fakat ahşap, demir, mermer de kullanılan malzemeler arasında yer aldığı görülmüştür. 19. yüzyıl Anadolu kiliseleri kapsamında incelenen on iki kilisede dönemin yapım ve malzeme tekniklerinin kullanıldığı belirlenmiştir. Malzeme olarak bölgesel taş ve mermer ocakları kullanılmıştır bu sebeple Anadolu'nun farklı bölgelerinde kullanılan malzemeler farklılaşmaktadır.

Diğer taraftan çalışma kapsamında 19. yüzyıl Krom Vadisi kiliselerininden on kilise üzerinde çalışılmıştır. Çalışmaya konu olan bu kiliselerin dokuzu bazilika planlı ve üç neflidir. Bir kilise haç planlıdır. Krom Vadisi kiliseleri yapım tekniği olarak yığma kargirdir. Taşıyıcı sistem olarak sütun, kemer, tonoz kullanımı yaygındır. Yapı malzemeleri bölgedeki kireç taşı ocaklarından elde edilen düzgün kesme ve moloz kireç taşıdır. Ayrıca pencere ve kapı hatıllarında ahşap kullanıldığı belirlenmiştir. Kiliselerin hepsine batı yönünden giriş vardır. İncelenen Krom Vadisi Kiliselerinden sadece birinde narteks bölümü bulunmaktadır ve. kiliseler apsislidir. Günümüzdeki durumları bağlamında değerlendirildiğinde çalışılan on kiliseden ikisinin iyi, birinin orta durumda olduğu anlaşılmıştır.Orta durumda olan kilise bugün kullanılmaktadır. İyi durumda olan iki kiliseden biri restore edilmiştir. Diğer bir kilise bölge halkının koruması ile bugüne gelmiştir. Kalan yedi kilise ise kullanılmamaktadır ve kötü durumdadur.

Çalışmada incelenen toplam yirmi iki kilisenin orjinal işlevleri veya Anadolu genelinde olduğu gibi Krom Vadisinde bulunan kiliselerinde sürdürülebilirliğinin risk altında olması, büyük ölçüde kiliselerin, aktif olarak kullanılmamasından ve/veya farklı dini inanışlara sahip yerel halkın kilise malzemelerini yerinden alarak başka yapıların inşasında kullanıyor olmalarından kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda Krom Vadisi'nde birçok kilise yapısının halk tarafından depo ve/veya hayvan barınağı olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışma kapasmında Tablo 4'de de ortaya konulduğu gibi, bu araştırmaya konu olan Anadolu genelindeki yirmi iki kiliseden üçü camii olarak kullanılmaktadır. Bu kiliselerin mevcut durumları, farklı bir dinin ibadet mekanı olarak kullanılmasına karşın aktif olarak kullanıldıkları için, iyi veya orta olarak değerlendirilebilir. Bu noktada yeniden işlevlendirmenin tarihi yapıların korunması ve sürdürülebilirliklerinin sağlanmasında hiç kullanılmayarak yok olmaya terk edilmesinden daha iyi bir uygulama olduğu görülmektedir. Bu çerçevede çalışmaya konu olan Büyükdere Aya Paraskevi Kilisesi'nin iyi ve Şamanlı Camii olarak kullanılmakta olan Şamanlı Kilise'nin ise orta durumda olduğu değerlendirilmiştir. Bu iki örnekte old-

uğu gibi yapılar aktif olarak kullanıldıkları sürece bakımları yapılmaktadır. Diğer taraftan kullanım amaçlarının değişmesi ve koruma ilkelerinden uzak bir biçimde sadece kullanımlarını sağlamak için yapılan niteliksiz ekler ile yapıların özgünlüğü bozulmaktadır. Krom Vadisi özelinde dini yapıların korunma sorunsalı değerlendirildiğinde, her ne kadar Anadolu'nun birçok bölgesinde 19. Yüzyıl Rum-Ortodoks kiliselerinin korunması noktasında sorunlarla karşılaşılıyor olunsa da, Krom Vadisinde sorunun derinleştiği görülmektedir. Bunun arkasındaki nedenin ise Krom Vadisi kiliselerinin herhangi bir amaçla aktif olarak kullanılmıyor ve sürdürülebilirlik kaygısı ile korunmuyor olmaları bulunmaktadır.

Sonuç olarak, Anadolu'da değişen hakim inanç sistemi nedeniyle kilise gibi farklı dinlerin ibadet mekanlarının koruma sorunları ile karşı karşıya oldukları görülmektedir. Diğer taraftan sürdürülebilirlikleri daha fazla tehdit altında olan yapıların aktif olarak kullanılmayan ve/veya yeniden işlevlendirilmeyen yapılar oldukları da bu çalışma kapsamında yapılan karşılaştırmalı analiz sonucunda ortaya konulmuştur. Buradan hareketle bu araştırmanın önerisi; korunması gerekli kültür varlıklarının koruma kullanma dengesi ve koruma ilkeleri dikkate alınarak yeniden işlevlendirilmeleri yönündedir. Yeniden işlevlendirme sürecinde ise yapılara yapılacak müdahalelerin, koruma odaklı olarak yönlendirilmesi ile restorasyon ve rekonstruksiyon süreçlerinde önceliğin yapıların özgünlüğünü korumak olmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Ancak bu yolla bugün dünyasında miras olarak devralınan korunması gerekli kültür varlıklarının gelecek nesillere aktarılacak tarihsel belgeler olarak sürdürülebilirlikleri sağlanabilecektir.

Kaynaklar

[1] Schmidt, K. (2007). *Göbekli Tepe En Eski Tapınağı Yapanlar.* İstanbul: Arkeoloji ve Sanat Yayınları.

[2] Toprak, B. (2022). *Gordon Childe Arkeolojisinde Dinin Problematik Rolü.* Mukaddime(13(2)), 467-489.

[3] Turani, A. (1990). *Dünya Sanat Tarihi.* İstanbul: Remzi Kitapevi.

[4] Ahunbay, Z. (2010). *Arkeolojik Alanlarda Koruma Sorunları Kuramsal Ve Yasal Açılardan Değerlendirme*. TÜBA-KED Türkiye Bilimler Akademisi Kültür Envanteri Dergisi, 8 , 103-118.

[5] Roth, L. M. (2002). *Mimarlığın Öyküsü.* İstanbul: Kabalcı Yayınevi.

[6] Şimşek, E. (2019). *Anadolu Coğrafyası Bağlamında Prehistorya Mimarlığı ve Mimarlıkta Ritüelin Yeri.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Arel Üniversitesi.

[7] Özmenli, M. (2014). *Tapınak Medeniyet İlişkisi.* Turkish Studies, 9(10), 1281-1292.

[8] Yılmaz, M. (2017). İnanç, Mimarlık ve Algı Üzerine Mülahazalar. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi(18(2)), 67-69.

[9] Erbilgin, Ş. H. (2017). *Erken Dönem Kilise Mimarisi ve Dinsel Dramın İlk Örneklerinde Mekan.* Sahne ve Müzik Eğitim - Araştırma e-Dergisi, 5 , 156-171.

[10] Ertekin, E. (2011). *Roma Devletinin Hıristiyanlığı Ortadan Kaldırmaya Yönelik Son Hamlesi: Büyük Takibat*. Olba Kazısı Yayınları Selevcıa Ad Calycadnvm I, 1, s. 91-109.

[11] Ross, A. Ç. (2017). *Hoşgörü Başkenti Nikomedia ve Galerius'un Hoşgörü.* Kocaeli Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Sosyal Bilimler Araştırma Dergisi, 6, s. 135-145.

[12] Mango, C. (2006). *Bizans Mimarisi.* Ankara: Rekmay.

[13] Alp, A. O. (2021). *Erken Hıristiyan ve Bizans Mimarlığına Giriş* (Birinci b.). Ankara: Dorlion Yayınları.

[14] Metin, T. (2019). Malazgirt Zaferinden Sonra Anadolu'da Türk Yerleşimi. *4. Tarihî Roman ve Romanda Tarih Bilgi Şöleni Bildirileri*, s. 114-119. Ankara.

[15] Pekak, M. S. (2009). Osmanlı İmparatorluğu Döneminde Gayrımüslim Vatandaşların İmar Faaliyetleri ve Mustafapaşa. *Bilig Dergisi*, 21, 171-204.

[16] Işık, H. (2001). İstanbul›un Fethinin Hıristiyanlık Üzerindeki Etkileri. Dinî

Araştırmalar, 4(10), 187-208.

[17] Aktel, M. (1998). *Tanzimat Fermanını Toplumsal Yansıması. İdari ve İktisadi Bilimler Fakültesi Dergisi*, 3, 177-184.

[18] Aydoğdu, N. (2020). *Tanzimat Dönemi Türk Basınında Islahat Fermanı ve Siyasi Vatandaşlık Politikaları: Eleştiri ve Tepkiler. İnsan ve Toplum Bilimleri Araştırmaları Dergisi*(9), 636-662.

[19] Sönmez, E., & Mazlum, D. (2015). *Büyükdere Aya Paraskevi Kilisesi İçin Bir Koruma Önerisi. 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu,* s. 43-57. Erzurum.

[20] Karaca, Z. (1996*). İstanbul›da Osmanlı Dönemi Rum Kiliseleri*. 2. b. , İstanbul: Yapı Kredi Yayınları.

[21] Ceylan, O. (2017). *Edirnekapı Ayios Yeorgios Kilisesi ve Meşrutaları (Okul Binası, Papaz Evi, Bekçi Evi, Çan Kulesi, Bahçe Duvarları, Çeşme) 2014-2015-2016-2017 Yılları Restorasyon Uygulaması.* Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu, s. 47-59. Trabzon.

[22] Aydın, E., & Özügül, A. (2019). *Mudanya'nın 19. Yüzyıl Rum Kiliseleri*. Sanat Tarihi Dergisi, 28(2), 631-673.

[23] Uçar, H. (2013). *Taksiarhis Kilisesi'nin Mimari Özellikleri*. Ege Mimarlık Dergisi, 82, 58-64.

[24] Açıkgöz, Ş. G., & Ahunbay, Z. (2008). *19. Yüzyıl Kayseri Kiliseleri İçin Koruma Önerileri. İTÜDERGİSİ/a, 7*(2), 26-37.

[25] Ekin, C. (2015). *Kayabağ (Darsiyak) Ortodoks Kiliseleri.* Tarih Okulu Degisi ,24,, 683-715.

[26] Pekak, M. S. (2014). *Kappadokia Bölgesindeki (Özellikle Kayseri Ve Çevresindeki) Osmanlı Dönemi Hıristiyan Dini Mimarisi.* Turkish Studies, 9(10), 885-928.

[27] Eroğlu Bilgin, S., & Özdemir, S. (2021). *Antalya Panagia Kilisesi'nin (Alaeddin Cami) Kalemişi Süslemeleri.* Sdü Fen-Edebiyat Fakültesi Sosyal Bilimler Dergisi,52, s. 1-19.

[28] Okuyucu, D. (2023). Şiran'da 19.Yüzyıla Ait Dört Rum Ortodoks Kilisesi. Turcology Research, 78, 422-437.

[29] Buyruk, H. (2019). *Ordu Yason Burnu ve Kilisesi*. Akdeniz Sanat,13, 465-476.

[30] Tut, Ş. (2021). *Erzurum Fetih Camii (Demirciler Kilisesi).* Ordu Üniversitesi Sosyal Bilimler Entitüsü Sanat Tarihi Anabilim Dalı.

[31] Erüz C. & Erüz G. & Kandemir R. & Üçüncüoğlu G. (2010). *Antik Çağdan Günümüze Gümüşhane- Torul- Kurum (Gorom- Kromni) Vadisi Demografik Değişimi.* İl Oluşunun 85. Yılında Gümüşhane Tarihi Ve Ekonomisi Sempozyumu. Gümüşhane.

[32] Erüz, G. (2009). *Gümüşhane Kurum Vadisi Maden Köyü Yerleşmeleri.* Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Doktora Tezi.

[33]. Türkfiliz, M. A. (2023). *Nüfusunu Kaybetmiş Bir Kültürel Peyzajın Korunması İçin Prensipler Ve Stratejiler: Gümüşhane Krom Vadisi. Ortadoğu Teknik Üniversitesi. Yüksek Lisans Tezi.*

28 EYLÜL 2024

7. ULUSLARARASI TARİHİ YAPILARIN GÜÇLENDİRİLMESİ VE GELECEĞE GÜVENLE DEVRİ SEMPOZYUMU

7. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRENGTHENING HISTORICAL BUILDINGS AND TRANSFERRING THEM SAFELY TO THE FUTURE

7. SEMPOZYÛMA NAVNETEWEYÎ LI DERBARÊ QEWÎKIRIN Û PARASTINA AVAHÎYÊN DÎROKÎ

DİYARBAKIR, SEZAİ KARAKOÇ KÜLTÜR MERKEZİ

A SALONU - 3A OTURUMU

Oturum Başkanları
Elizabeth Vintzileou, Nusret Suna

Lefkoşa Selimiye Camii'nin (Lefkoşa Ayasofya Kilisesi) Devam Eden Restorasyon Projesinin Yapısal ve Deprem Mühendisliği Yönlerine Odaklanan Kısa Bir Öyküsü
Alper İlki, Ömer F. Halıcı, Pınar İnci, Cem Demir, Esin Yaren, Mustafa Uzun, Soner Uğurlu

Düzlem İçi Yüklü Yığma Duvarların Lif Takviyeli Polimer ile Optimum Güçlendirilmesi
İsmail Hakkı Tarhan

Donatılı Harçlar ile Güçlendirmede Farklı Bileşen Etkilerinin Araştırılması
Mustafa Esat Güneş, Zehra Canan Girgin

Bergama Bedesteni'nin Strüktürel Analizi ve Deprem Performansı
Hatice Ayşegül Demir, Mine Hamamcıoğlu Turan, Kutay Yücetürk, Engin Aktaş

A SHORT STORY OF ON-GOING RESTORATION PROJECT OF LEFKOŞA AYASOFYA (SELIMIYE) MOSQUE (NICOSIA HAGIA SOPHIA CHURCH) FOCUSING ON STRUCTURAL AND EARTHQUAKE ENGINEERING ASPECTS

Alper İLKİ[1], Ömer F. HALICI[2], Pınar İNCİ[3], Cem DEMİR[4], Esin YAREN[5], Mustafa UZUN[6], Soner UĞURLU[7]

[1]Professor, Istanbul Technical University, ailki@itu.edu.tr
[2]Assistant Professor, MEF University, halicio@mef.edu.tr
[3]PhD, RISE Engineering, pinar@riseproje.com
[4]Assistant Professor, Istanbul Technical University, demirce@itu.edu.tr
[5]Architect, MSc, Directorate General of Foundations of Türkiye, eyaren@gmail.com
[6]Civil Engineer, MSc, Directorate General of Foundations of Türkiye, omerrua@gmail.com
[7]Restorator, Directorate General of Foundations of Türkiye, sonerugurlu@gmail.com

Abstract

The Ayasofya (Selimiye) Mosque, which is also historically known as Saint Sophia Cathedral, is located in the city of Nicosia (Lefkoşa), Turkish Republic of Northern Cyprus. The construction of the structure began in 1193 during the Lusignan rule and various extensions and post-earthquake repairs were executed by the subsequent conquerors of the island: Venetians and Ottomans. Restoration project studies were initiated by the General Directorate of Foundations of the Republic of Turkey in 2016, with the aim of documenting the structure using advanced techniques and determining interventions for its preservation. It was completed in 2018 and approved by the Cyprus High Council for Monuments. This article covers the project, which

was launched in 2020, during the implementation process. This paper presents the structural characteristics of the building, along with the structural performance analyses and the iterative processes involved in developing the seismic strengthening strategies from both engineering and administrative perspectives.

KeyWords: Assessment, Heritage, Restoration, Seismic, Strengthening

1. Introduction

Türkiye, which is one of the most earthquake-prone countries in Europe, has a significant number of historic buildings from ancient and medieval times including Hellenistic, Roman, Byzantine, Seljuk and Ottoman periods. Site investigations after earthquakes (e.g., Kocaeli 1999, Duzce 1999, Elazig 2010, Van 2011, Izmir 2020 and Kahramanmaraş 2023) indicated that the historic buildings might be immensely vulnerable to seismic actions. In order to evaluate the seismic vulnerability of historic buildings, the seismic performance analyses need to be performed. Having evaluated the structural performance, if necessary, structural interventions addressing the structural deficiencies are envisioned.

The Ayasofya (Selimiye) Mosque, historically referred to as Saint Sophia Cathedral, is located in Nicosia (Lefkoşa), in the Turkish Republic of Northern Cyprus. As a catholic church, the construction of the building initiated in 1193 and completed in 1326 and the consecration took place [1]. Also after this date, additions were made to the structure. During this construction period, the completion of the edifice was hindered due to the earthquakes that took place in 1267 and 1303. In addition, the attempts and the success of Frederick II to take over Cyprus in 1232 suspended the construction [2]. The plan layout and a section of the building is presented in Figure 1. The eastern part of the building consists of apsis with four flying buttresses. The two chapels located on the north and south sides of the building provide structure a perpendicular orientation forming a transept. Narthex is located on the western part of the building, where two towers were intended to be constructed, but claimed to be never finished [1], or collapsed due to past earthquakes. After its construction, the building suffered from earthquakes in 1491 and 1547 and comprehensive repair works were performed [1, 2]. The top of the southwestern part of the structure was reported to be damaged during these earthquakes. In 1570, the Ottomans took the control of Cyprus and the building was converted to a mosque. Two minarets reaching 40.2 meters height (excluding the height of the spire) were added to the north and south façade of the building by increasing the height of the existing towers (Figure 1). During this period, the building served as the grand mosque for the islanders. Also in this period, the building continued to live its earthquake fate. By around 1740, another earthquake hit the building which resulted in the collapse of one of the minarets and causing extensive damages throughout the structure [2, 3]. Under the supervision of the UNESCO experts: Professor P. Gazzola and Dr. C. Musso, restoration works were carried

out between 1969 and 1974 [4]. It was reported that during this restoration period, an appropriate mortar for the masonry composition was used instead of cement-based mortar. The general views of the edifice are presented in Figure 2. Together with the application projects that were initiated in 2019, a restoration project which covers the structural repair and rehabilitation of the edifice was initiated in 2020 and necessary revisions were made. This paper presents the performance analyses to evaluate the current condition of the building and the subsequent processes in the development of seismic strengthening methodologies.

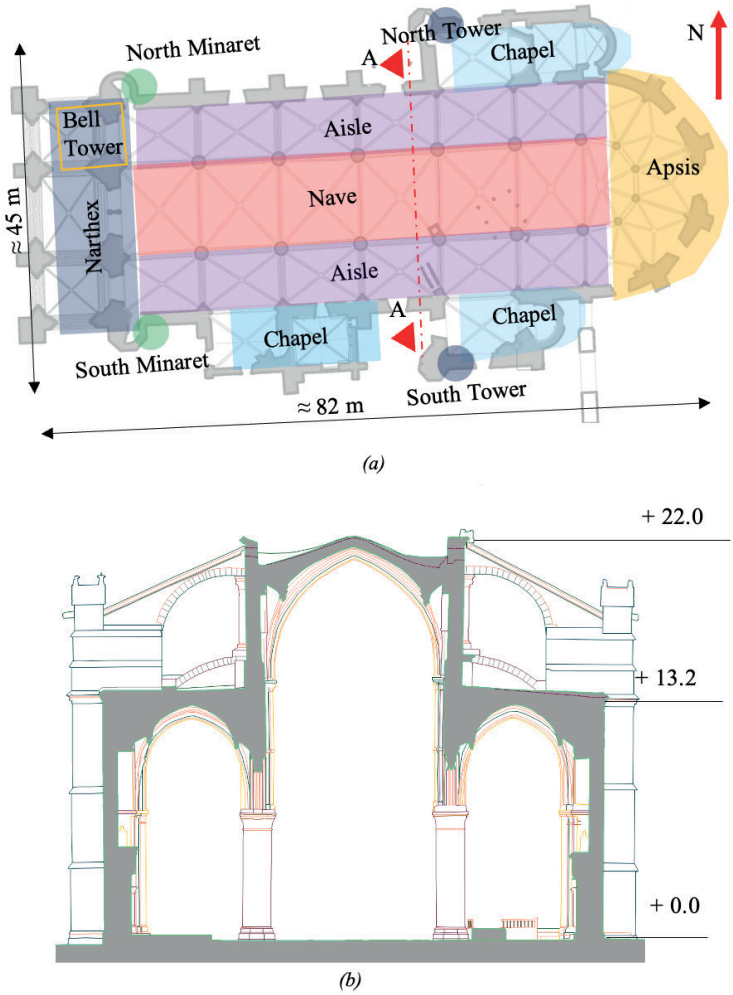


Figure 1: Ayasofya Mosque: (a) plan view; (b) A-A section cut



Figure 2: Photos of the edifice: (a) western façade; (b) northern façade; (c) southern flying buttress; (d) eastern flying buttress

2. Structural System And The Existing Damages

The distance between the eastern and western ends of the structure is nearly 82 meters, while it is nearly 45 meters between the northern and southern ends. The nave vaults are reaching 21.5 m height which are supported by flying buttresses. The aisle vaults are nearly 13 meters above the ground. The structural elements of the edifice are made of cut-stone masonry with lime mortar. The masonry units are made of sandstone and the mortar thickness varies between 5 to 20 mm. The narthex contains 8 great piers which cross-shaped in the plan with end-to-end distance reaching to more than 4 meters (Figure 3a). There is a bell tower located on the northern vault of the narthex (Figure 1a, Figure 2a). The height of the top of the bell tower is nearly 22.0 meters. The nave consists of two rows of 6 circular piers with a

diameter of 1.5 meters (Figure 3b). The piers in the apsis have a diameter of 0.8 meter. The external walls in the aisles, which are reaching up to +13.2 m height, have a thickness of nearly 1.5 meters. The walls in the nave region have a thickness of 0.8 meter. The roof covering of the structure consists of rib vaults. During the restoration of the edifice, the covering material over the vaults were removed and the thickness of the rib vaults were measured as 35 cm. In the nave vaults, the leveling thickness around the top region of the vaults ranging from 10 to 40 centimeters; while in the hem region of the vaults, the thickness reaches to 90 centimeters. In the aisle vaults, the leveling material thickness reaches to 170 centimeters at the springing regions. There are two towers on the northern and southern façade of the building (Figure 1a). The height of the north tower is 19.6 meters, while it is 12.2 meters for the south tower.

Throughout its service life, the edifice has been exposed to numerous seismic actions. As a result of this and other environmental and aging effects, the structure exhibits widespread deformations and cracks. The precise measurements that were taken from the structure in order to prepare the drawings of the structure revealed that both north and south main walls supporting the nave rib vaults exhibit leaning in the out of plane directions up to 2°. As the top of the main walls lean outwards, the bottom of the walls, together with the vaults of the aisles move inwards (Figure 5).



(a) *(b)*

Figure 3: (a) piers of narthex; (b) view of the nave



Figure 4: Rib vaults of the sturcutre

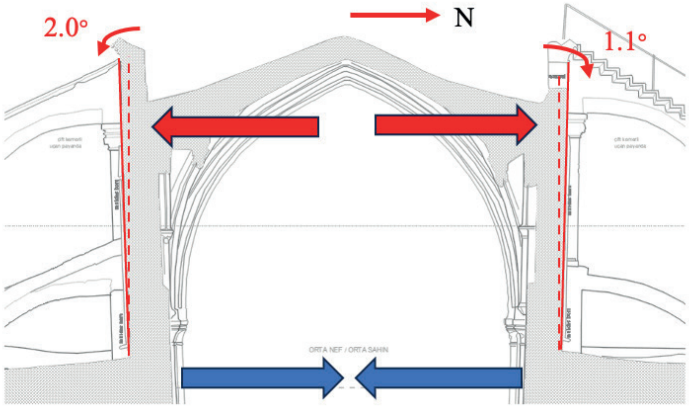


Figure 5: Out-of-plane displacement of the main walls of nave

During the restoration works the plasters on the interior surfaces of the rib vaults were scraped which revealed the cracks and separations at the wall interfaces of the nave vaults (Figure 6). The majority of the cracks are measured to be wider than 10 mm. There are other parts in the structure which exhibit relatively wide cracks. Vertical cracks were observed at the window openings of the north and western façade of the bell tower (Figure 7a). The width of the cracks was determined to be greater than 10 mm. Also, the interface of the perpendicular walls of the southeastern chapel (Figure 1a) exhibits wide crack and the southern façade of the chapel exhibits 1.2°

out-of-plane leaning. The vertical crack initiated from the ground level and continues to the top of the wall. In addition, an interface between different masonry techniques is visible from the outer surface of the wall indicating the southern chapel added later to the structure (Figure 7b).



Figure 6: Out-of-plane displacement of the main walls of nave

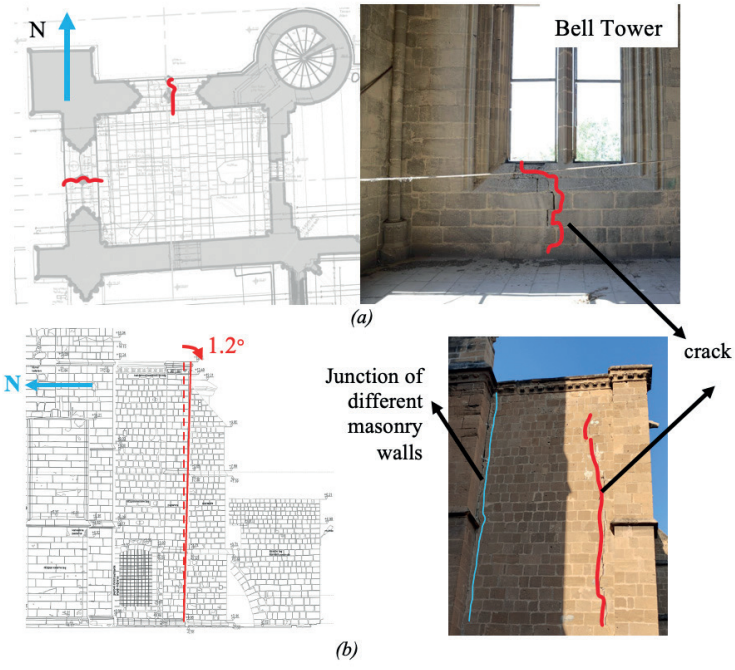


Figure 7: (a) Eastern side of the bell tower; (b) The separation in the southeastern chapel

3. Structural Assessment

3.1. Numerical Model

A numerical Finite Element Model of the structure was formed by taking into account the obtained drawings and site observations. SAP2000 [5] software was benefitted in the formation of the model. Macro modeling approach was used where the masonry unit and mortar compositions are idealized to behave like a homogeneous material. Four-node and three-node shell elements were used in the modeling of all masonry members, including main walls, vaults, buttresses, towers and minarets. Frame elements were used in the modeling of piers, minaret cores and masonry arches. The general view of the model is presented in Figure 8. The structural performance of the structure was evaluated through linear response spectrum analyses. Although an effort was made to reflect the current geometric details of the structure together with the deformations on the vaults and walls, the model lacks the ability to reflect the response of the members with the existing damages and cracks. The aim was to determine the degree of the internal forces and to obtain significant auxiliary elements to support the engineering predictions and judgements. The horizontal and vertical movement of the bottom nodes of all structural members at the ground level were restrained in the model.

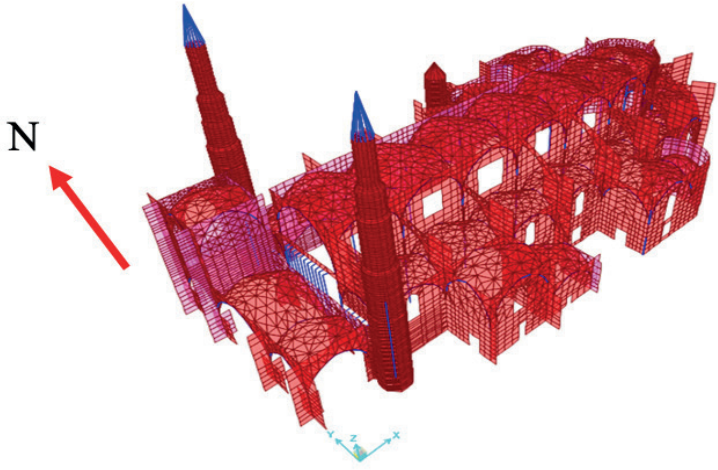


Figure 8: Finite element model of the structure

Initially, the Guideline for Earthquake Risk Management of Historical Structures in Turkey (GERMHS) [6] was used to determine the mechanical properties of the masonry materials. Accordingly, at first, the modulus of

elasticity of cut-stone masonry was taken as 2500 MPa. With the aim of calibration of the numerical model, ambient vibration tests were conducted on the edifice. Four triaxial accelerometers were placed on the nave rib vaults and four triaxial accelerometers were placed on the southern aisle vaults aiming for determining the natural vibration frequencies of the vaults in the vertical direction (Figure 9). The sampling frequency was 125 Hz. The vibration recordings in the time-domain were transformed into the frequency domain using power spectral density functions. Accordingly, the natural vibration frequencies of the structure were determined. In the southern aisle vaults, the first two vibration periods in the vertical direction were determined as 7.51 Hz and 9.34 Hz, respectively. In the nave vaults, one natural vibration mode was determined in the vertical direction with a frequency of 3.42 Hz. When the modulus of elasticity of cut-stone masonry was taken as 2500 MPa, the first two vertical modes of the southern vaults were calculated as 7.40 Haz and 9.18 Hz, respectively. The calculated and the measured frequencies were considerably coherent with a variation of 1.7%. Therefore, the modulus of elasticity of aisle vaults was kept as 2500 MPa. The frequency for the vertical mode of the nave vaults calculated from the model was 2.52 Hz, which has a variation of nearly 36%. After that, the modulus of elasticity of the nave vaults was altered to 3500 MPa and the frequency was calculated as 2.80 Hz. After the model calibration, the first two mode shapes dominating in the north-south and east-west directions and the corresponding natural vibration periods are presented in Figure 10.

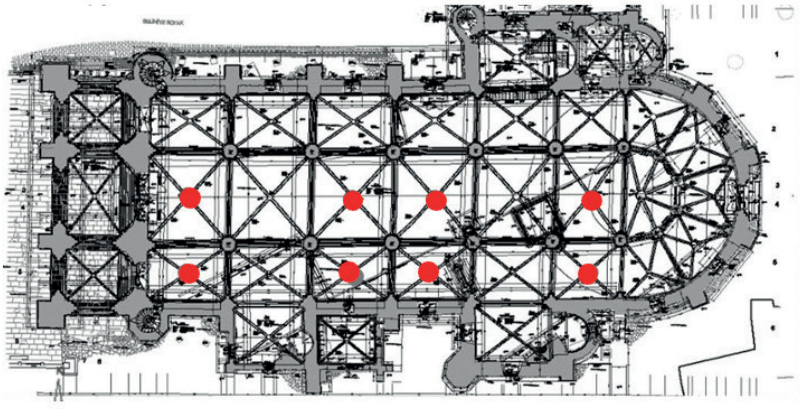


Figure 9: Plan view of the location of the accelerometers

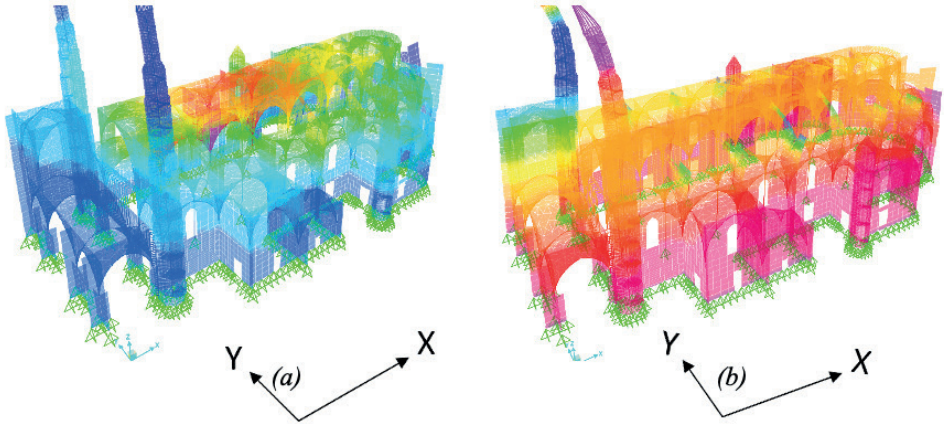


Figure 10: Mode shapes of the building: (a) Dominant in Y direction T=0.45 s; (b) Dominant in X direction T=0.35 s

According to GERMHS [6], the building was expected to satisfy the Controlled Damage performance level under 475-year return period earthquake. If linear assessment techniques are used, the Controlled Damage performance level entails that the internal forces under the gravity loads and 475-year return period earthquake, with a behavior factor of 3, shall not exceed the corresponding strength of the members. In addition, the actual drift ratio values shall not exceed 0.007. In order to minimize the structural interventions and reach a more refined seismic demand, site specific seismic hazard analysis was performed through the use of the earthquake catalogue, area source and line source models developed by SHARE (Seismic Hazard Harmonization in Europe) project [7]. Three ground-motion prediction models [8-10] were used to determine a horizontal acceleration spectrum for structural systems with 5% critical damping ratio under 475-year return period earthquake level (Figure 11). The maximum spectral acceleration (S_S) was calculated as 0.68 g and the spectral acceleration for systems having period of 1.0 second (S_1) was determined as 0.26 g. The spectral accelerations corresponding to the first two modes of the edifice are determined as 0.60 g and 0.68 g for Y and X directions, respectively (Figure 11).

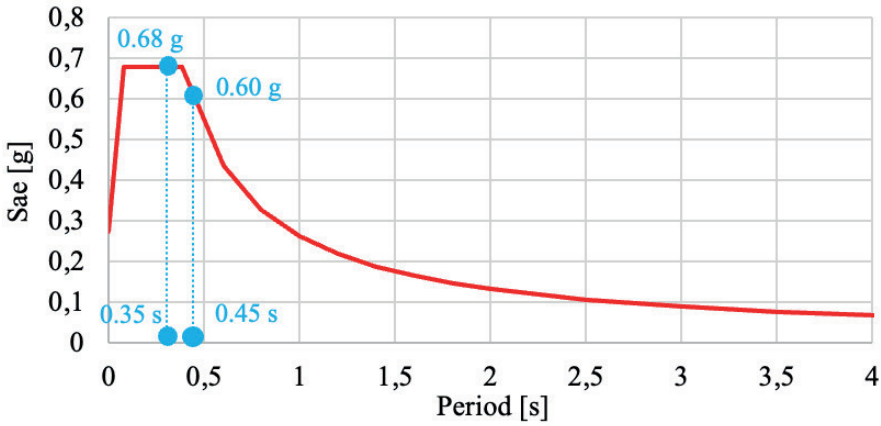


Figure 11: Elastic horizontal acceleration spectra

In order to evaluate the foundations of the structure and the soil condition, 11 inspection pits were dug. The locations of the pits are presented in Figure 12. From these inspections, plan dimensions and the offset of the foundations were determined. In the excavations around the main walls, either no foundation offset or varying offset widths were measured. In pit 4, no foundation offset was encountered, while in pits 1, 2, 5, and 8, offsets varying between 0.9 meters and 2 meters were measured. In pits 6 and 7, an offset of 2 meters wide was observed only on the outer surface of the retaining wall, and in pit 9, an offset 1.1 meters wide was found under the walls. Based on the inspections and verifications conducted, to remain on the safe side, it was assumed that the thickness of the foundations under the retaining walls and buttresses was the same as the dimensions of the elements (the offsets were ignored). In pit 3, only one edge of the pier foundation was revealed, and the edge length was measured as 2.8 meters. Based on this observation, in the analyses, the foundation geometry under the piers was defined as 2.8 m x 2.8 m in plan. It was determined that the foundations of the structure are seated on clay and gravel units. Also, geotechnical tests were performed to determine the soil bearing capacity. Accordingly, the soil bearing capacity was calculated as 1122 kPa and the vertical bedding coefficient was determined as 30000 kN/m^3.



Figure 12: Location of the inspection pits

3.2. Performance Evaluation

Linear response spectrum analyses were carried out for the performance evaluation of the structure. The load combinations defined in the Turkish Seismic Design Code 2018 [11] were used. Accordingly, together with the gravity loads, horizontal and vertical seismic actions were applied. To represent the vertical earthquake actions, 66% of the maximum horizontal spectral acceleration value was additionally applied in the vertical direction to the structure. The internal forces demand was compared with the capacities of the structural members. In the determination of member capacities, the compressive strength of the cut stone masonry was considered as 3.50 MPa. The initial shear and tensile strength of the masonry were taken as 0.09 and 0.13 MPa. The material capacities were taken from GERMHS [6]. The performance analyses indicated that the maximum axial stress in the piers of the nave was calculated as 2.41 MPa, corresponding to a Demand/Capacity (D/C) ratio of 0.69. The maximum in-plane shear stress calculated in the load-bearing walls of the structure is at a D/C ratio of 1.40 (Figure 13a). The shear stress distribution calculated for southwestern chapel and bell tower are coherent with the existing damages on the structure.

The out-of-plane bending moment distribution on the masonry walls were also evaluated. The vertical and horizontal bending moment capacities of the walls were determined by section analyses. The contribution of the axial forces in the members were considered in the determination of bending mo-

ment capacity, which creates bending stress in the vertical direction (M22). For the moment causing bending stress in the horizontal direction (M11), the moment capacity was calculated through only considering the material tensile strength. The D/C ratios that are calculated for a number of locations are presented in Figure 14. The walls exhibited insufficient moment capacities at a number of locations. The bending moment D/C ratios for the rib vaults are presented in Figure 15a. In the determination of the bending moment capacities of the 35 cm thick vaults, the contribution of the axial forces was considered. The shear stress distribution of the vaults is presented in Figure 15b.

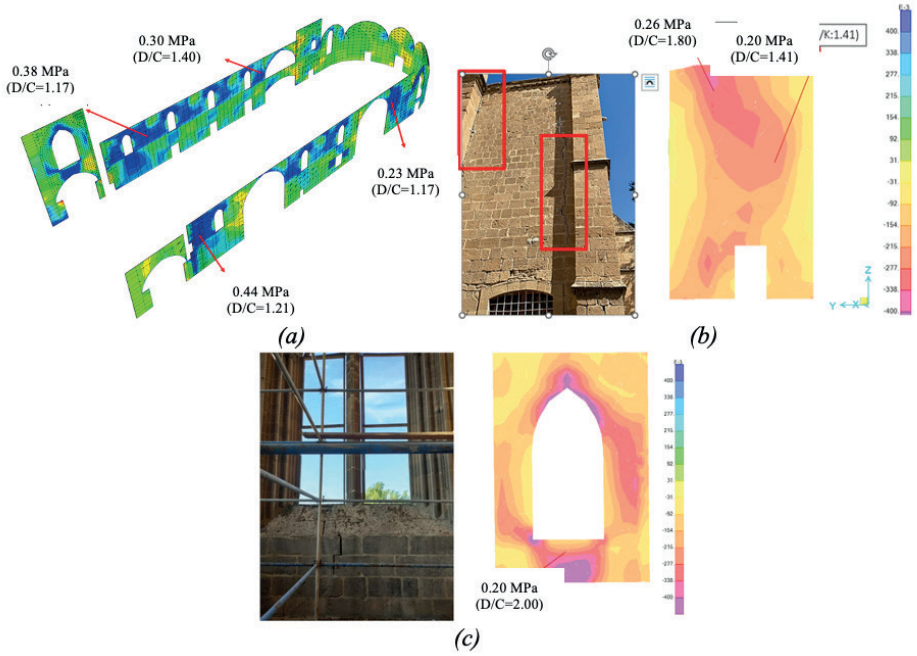


Figure 13: The in-plane shear stress distribution: (a) main walls; (b) chapel; (c) bell tower

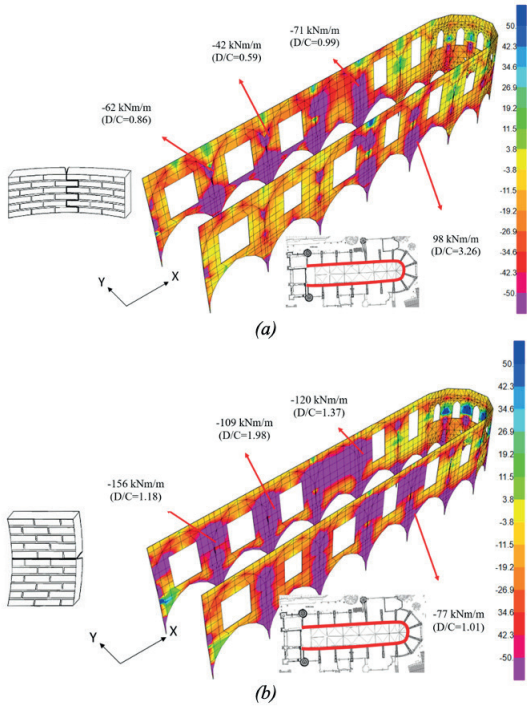


Figure 14: Bending moment D/C ratios: (a) M11; (b) M22

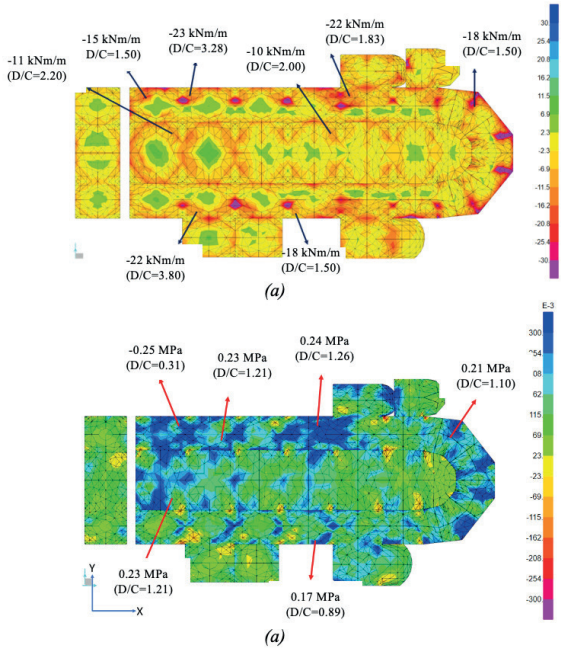


Figure 15: D/C ratios for rib vaults: (a) bending moment; (b) shear stress

The soil stresses resulting from the load combinations, including vertical loads and the 475 years return period earthquake effects are shown in Figure 16. According to this, the maximum soil pressure stress obtained under the building's foundation has been calculated to be around 1050 kN/m². This value is very close to the soil bearing capacity (1122 kN/m²) but remains below the bearing capacity limit. In the calculations, no tensile stress has been observed under the foundation.

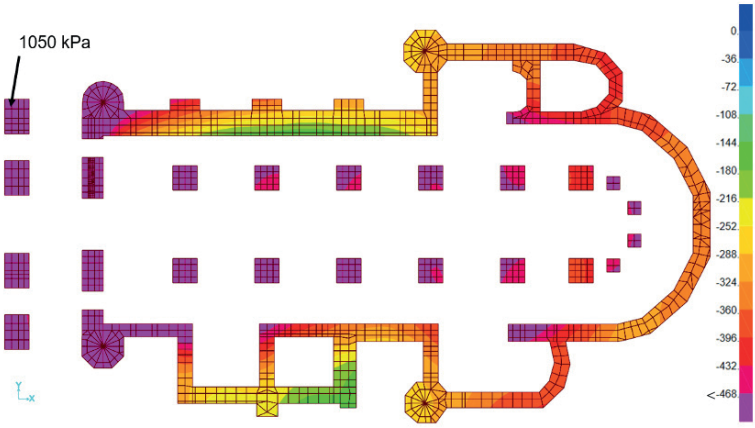


Figure 16: Soil stresses under the most unfavorable condition [kPa]

4. Intervention Strategies

The structure, in its current state, does not meet the target earthquake performance level stated in GERMHS [6] since it contains internal force demands greater than the corresponding capacities. In the following subsections, the recommended interventions are presented together with the iterative design processes. Considering the architectural elements of the Ayasofya (Selimiye) Mosque, which holds significant historical and cultural importance, the proposed interventions have been kept as limited as possible, agreeing with the opinions of the scientific committee of the edifice.

4.1. Reducing The Thickness of the Covering Material of Nave Vaults

Due to the high out-of-plane bending moment D/C ratios in the load-bearing walls of the Nave, it has been decided to reduce the thickness of the covering material to 10 cm in order to reduce the dead load and the attracted seismic forces on the structure. The thickness of the covering material was ranging

between 10 and 30 cm. The structural analyses with reduced covering material showed that the proposed intervention has a potential to reduce the bending moment D/C ratios in the nave walls by nearly 10% (Figure 17). In addition, according to the numerical analyses, reducing the covering thickness may also lead to reduce the moments in the rib vaults by nearly 40%.

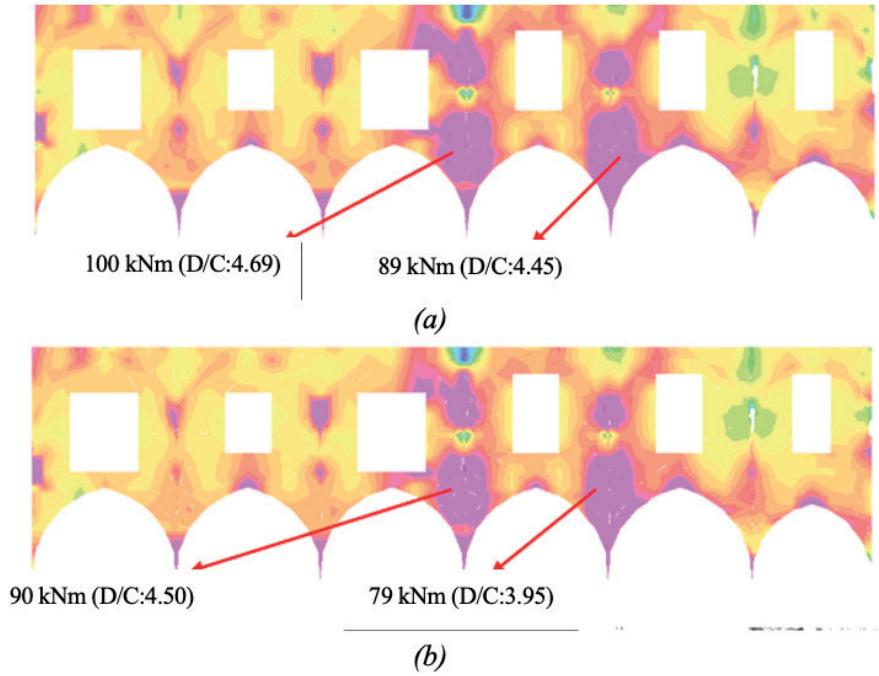


Figure 17: D/C ratios for nave walls: (a) current state; (b) after reducing the covering thickness

4.2. Implementation of Horizontal Ties to Chapel and Bell Tower

The perpendicular walls of the southeastern chapel exhibit extensive vertical crack through the height of the structure and out-of-plane leaning of the southern wall (Figure 7b and Figure 13b). In order to increase the integrity of the perpendicular walls and restrain the out-of-plane leaning of the southern wall, horizontal tie reinforcements with head plates were proposed to be added at various elevations (Figure 18a). Also, cracks exist in the northern and western façade walls of the bell tower (Figure 13c). Adding perpendicular horizontal ties at the northwestern corner of the bell tower contributes the integrity between the two sides of the displaced joints (Figure 18b).

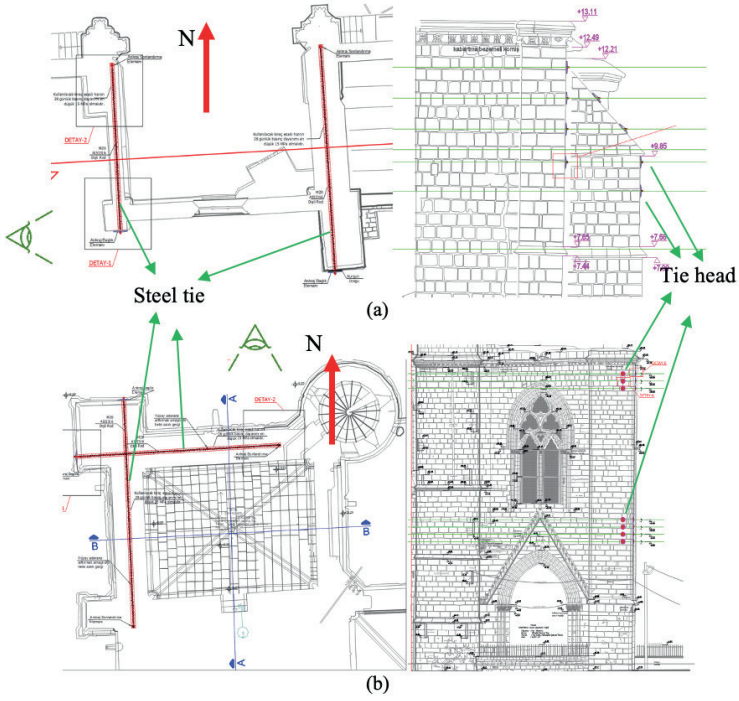


Figure 18: Plan and façade views of horizontal tie implementation: (a) southeastern chapel; (b) bell tower

Kinematic analysis approach was used in the determination of the diameter and the height of the tie reinforcement. In this approach, the masonry wall was assumed to exhibit rigid body rotation around its foundation toe under the peak ground acceleration. The acceleration value was reduced by 2, according to GERMHS [6]. The weight of the masonry contributes to the stability of the wall. While the horizontal inertial forces, which are assumed to be formed at the mid-height level of the wall, try to rotate the wall around its toe. Under these forces, a moment equilibrium taken at the toe of the masonry determines if the wall will be overturned or not. Both bell tower and southern chapel walls were determined to have insufficient balancing forces under the seismic action according to the kinematic analysis approach. Accordingly, horizontal tie reinforcements, which contributes to the balancing forces, were proposed to be added to the structure. During the preparation of the application details of the tie heads, two alternative solutions were proposed to the scientific committee. The first solution was hiding the tie heads under the masonry units that are located at the surface of the wall, which would require scraping of the masonry unit as much as necessary for the tie

head to be placed under. The second solution was placing the anchor heads on the external surface of the walls. After the discussions, the scientific committee decided to leave the anchor heads on the surface of the walls.

4.3. Textile Reinforced Mortar Application on the Rib Vaults

In its current form, as presented in Figure 15, the performance analysis indicates that the bending moment D/C ratios for the rib vaults exceed 1.0 at the hem regions of the vaults. In order to improve the behavior and resist against hinge mechanisms [12], the addition of tensile members to the rib vaults was decided. In accordance with the principles of conservation and preservation of the historic structures, an intervention which is detachable and removable from the edifice was to be selected. Accordingly, textile reinforced mortar (TRM) was one of the most adequate methodologies serving this purpose. Since the aim of the additional tensile member was to avoid the formation of hinge mechanism, preventing the development of one hinge would be theoretically sufficient. Because of this and the fact that the ribs on the internal surfaces of the vaults form discontinuity lines for TRM (Figure 4), the TRM application was designed to be only applied on the external surfaces of the vaults. In order to benefit from this intervention as a tension member between the nave vaults, rope-spike anchors on the TRM surfaces which would improve the connection between the main walls and the vaults are arranged. Views of the proposed application are presented in Figure 19.

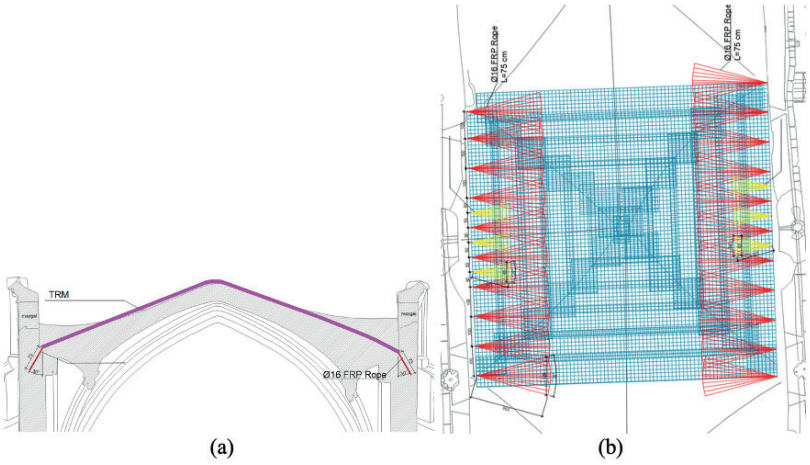


Figure 19: TRM and rope-spike application on the nave vaults: (a) section view; (b) plan view

4.4. Compression Struts between Nave Piers

The main walls carrying the vaults of the nave exhibit leaning in the out-of-plane direction (Figure 5). In order to restrict the inward movement of the aisle rib vaults and to reduce the out-of-plane moment demand on the main walls under earthquake, compression struts were proposed to be arranged around 12.0 m elevation. The intervention would also serve the purpose of increasing the structural integrity and redundancy. In order not to disturb the colonnades beneath the springing points of the ribs, the struts were planned to pass by both sides of colonnades and to be embedded in the covering material of aisle vaults (Figure 20). At first, the struts were planned to be made of structural timber with cross-section dimensions of 300x300 mm [13]. Due to architectural concerns, this proposal was rejected by the scientific and preservation committee. After this decision, optimization works were carried out to obtain the maximum benefit with minimum impact on the architectural texture. It was decided to use box-shaped steel profiles in order to reduce the cross-section dimensions and the disturbance to the architecture. Then, instead of arranging the strut members at each pier row, from east to west, the first two and the last strut pairs were eliminated as the moment demands on the main walls around where the third to fifth strut pairs were planned to be located were higher compared to the rest (Figure 17). Later, considering the model was not able to represent the local damages, weaknesses and the material degradation; and in the light of the post-earthquake site experiences of 2023 Kahramanmaraş earthquakes, it was decided to arrange the compressions struts at each pier row, as proposed originally. Accordingly, two box shaped steel profiles with 125x125 mm outer dimensions with 15 mm wall thickness were added to each row of piers and the obtained contribution to the moment D/C ratios of the nave walls were numerically determined for a number of control locations (Table 1). In order to enhance the integrity between the added struts and the structure, additional connection plates were arranged on the outer surfaces of the piers. The struts were extended over the aisle vaults to the north and south main walls.

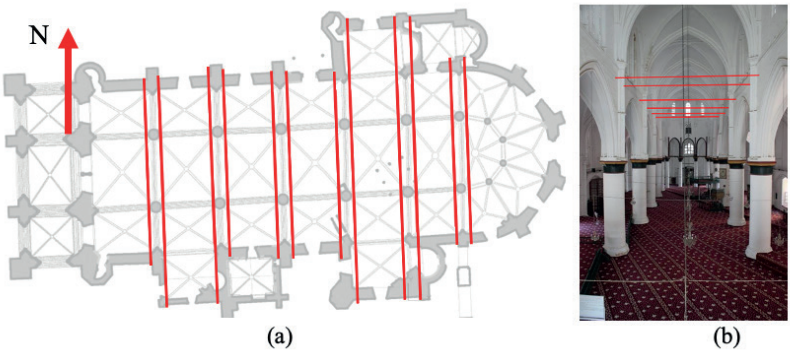


Figure 20: Compression strut intervention: (a) plan view; (b) schematic view from inside

table 1: Flexural Moment D/C ratios for nave walls after strut intervention

Control Location		Current D/C Ratio	After Proposed Strut Intervention D/C Ratio	Normalized WRT Current D/C Ratio
M11	1	2.50	1.44	0.58
	2	1.39	0.51	0.37
	3	1.96	0.86	0.44
	4	1.70	0.80	0.47
	5	1.46	1.29	0.88
M22	1	1.67	1.20	0.72
	2	1.89	1.18	0.62
	3	1.33	0.97	0.72
	4	2.31	1.80	0.78
	5	1.71	0.83	0.48

4.5. Tension Ties between Nave Main Walls

Another intervention to restrict the out-of-plane leaning of the main walls of the nave (Figure 5) was the implementation of tension ties between the main walls. As the upper regions of the walls exhibit outward rotation, the ties were added to the upper elevations (i.e., +15.25 m and 17.75 m) so that they provide balancing forces against outward leaning of the wall (Figure 21). The use of 32 mm tie bars with AISI316L grade stainless steel was proposed. Kinematic analysis approach was utilized in the determination of the diameter and the material grade. Since the walls are not on the ground, ins-

tead of peak ground acceleration (PGA), the maximum spectral acceleration value (0.68g) was considered in the calculations. Accordingly, arrangement of four tension ties (2 at +15.25m and 2 at +17.75 m) was found to provide sufficient balancing moment for the masonry walls.

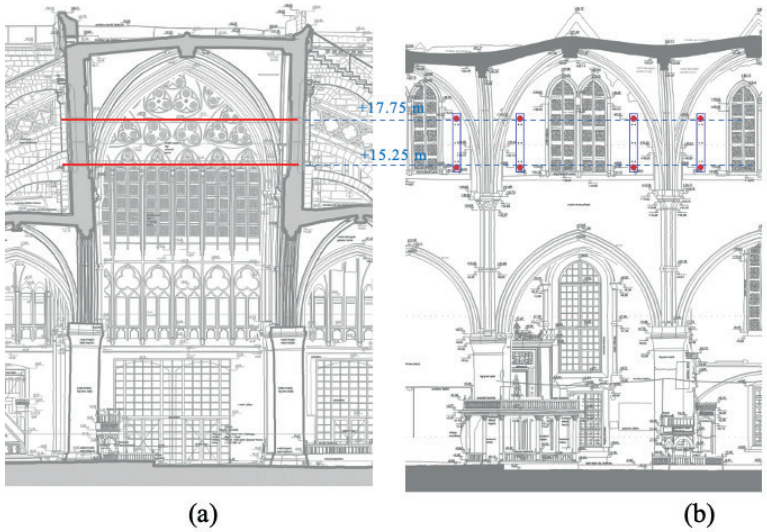


Figure 21: Tension ties between the nave walls: (a) section view; (b) profile view inside from the structure

5. Concluding Remarks

The ongoing restoration project of Aysofya (Selimiye) Mosque (formerly the Saint Sophia Cathedral) in Nicosia, which focuses on structural and earthquake engineering aspects, provides significant insights into preserving historic buildings in earthquake prone regions. Through detailed structural assessments and performance evaluation studies, it was identified that the building, in its current state, does not meet the seismic safety demands. The existence of the architectural texture and historical significance necessitated a careful design of minimally invasive yet maximum effective structural interventions.

To improve the structure's seismic performance while maintaining its architectural integrity, a number of significant interventions were suggested: reducing the nave vault covering thickness; adding horizontal ties; compression struts; the application of textile-reinforced mortar (TRM). The collaborative efforts between engineers, architects, and preservation committees highlighted the complexity of finding a balance between the requirement for

structural safety and the necessity of preserving the historical authenticity of such cultural heritages.

This project exemplifies the challenges and opportunities faced in the restoration of historical monuments with seismic risks. The techniques and intervention methodologies presented might be helpful for similar projects aimed to protect the cultural heritages from seismic events for future generations.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere gratitude to the scientific committee of Ayasofya (Selimiye) Mosque, The High Council of Antiquities and Monuments of Cyprus, Directorate General of Foundations of Türkiye, The Administration of Foundations of Cyprus, for their generous supports during the study. The invaluable contributions of the members of the scientific committee and all other colleagues working on the project and the contractor of the restoration project of the Ayasofya (Selimiye) Mosque: Bil-Sa Construction are also acknowledged.

References

[1] Enlart, C. and Hunt, D., 1987. Gothic Art and the Renaissance in Cyprus.

[2] Arslangazi, H., 2007. Lefkoşa Kent Dokusunda Mimari Üsluplar, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.

[3] Atun, A., 2005. Kıbrıs Tarihi Üzerine Belgeler, III.

[4] Limboruri, E., 2011. The restorations of ancient monuments of Cyprus from the establishment of the Department of Antiquities of Cyprus in 1935 until 2005.

[5] SAP2000 v22, 2020. Integrated software for structural analysis and design program, Computers and Structures Inc., Berkeley, California.

[6] Republic of *Türkiye* Directorate General of Foundations, 2017, Guideline for Earthquake Risk Management of Historical Structures in Turkey

[7] Woessner, J., Danciu L., Giardini D. and the SHARE consortium, 2015, The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results, Bull. Earthq. Eng., doi:10.1007/s10518-015-9795-1.

[8] Kale, Ö., Akkar, S. Anooshivaran, A. and Hamzehloo, H., 2015. A Ground Motion Predictive Model for Iran and Turkey for Horizontal PGA, PGV and %5 Damped Response Spectrum: Investigation of Possible Regional Effects. Bulletin of the Seismological Society of America 105(2), 963–980.

[9] Boore, D.M. and Atkinson, G., 2008, Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s. Earthquake Spectra 24(1), 99 138.

[10] Chiou, BS-J. and Youngs, RR., 2008, An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. Earthquake Spectra 24(1), 173-215.

[11] Turkish Seismic Design Code, 2018, AFAD

[12] Rossi, M., Calderini, C., and Lagomarsino, S, 2016, Experimental testing of the seismic in-plane displacement capacity of masonry cross vaults through a scale model. Bulletin of Earthquake Engineering, *14*, 261-281.

[13] Alan, T. and İlki, A., 2024, Lefkoşa Selimiye Camii Yapısal Özellikleri ve İyileştirilmiş Deprem Performansı İçin Bir Ön Çalışma. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 15(2), 541-557

DÜZLEM İÇİ YÜKLÜ YIĞMA DUVARLARIN LİF TAKVİYELİ POLİMER İLE OPTİMUM GÜÇLENDİRİLMESİ

İsmail Hakkı TARHAN [1]

Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 60150, Tokat, Türkiye,
ismailhakki.tarhan@gop.edu.tr

Özet

Bu çalışma, güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş yığma duvarların doğrusal olmayan sismik davranışını, optimum Lif Takviyeli Polimer (LP) güçlendirme konfigürasyonlarına odaklanarak araştırmaktadır. Çalışmada topoloji optimizasyonu, literatürde düzlem içi yükler altında test edilen bir duvar için en iyi LP düzenini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Güçlendirmenin etkinliğini değerlendirmek için hem güçlendirilmemiş hem de optimum LP serinimi ile güçlendirilmiş numuneler üzerinde doğrusal olmayan sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, düzlem içi performansta önemli gelişmeler olduğunu ortaya koymakta ve tarihi yapıların korunmasında optimize edilmiş LP konfigürasyonlarının potansiyelini göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Düzlem içi yükleme, Yığma duvar, Güçlendirme, Lif takviyeli polimer, Doğrusal olmayan sayısal analiz

Abstract

This study investigates the nonlinear seismic behaviour of unreinforced and reinforced masonry walls, focusing on the optimum Fibre Reinforced Polymer (FRP) reinforcement configurations. In this study, topology optimisation is used to determine the best FRP layout for a wall tested under in-plane loads in the literature. Nonlinear numerical analyses are performed on unreinforced and optimally FRP-reinforced models to evaluate the effectiveness of the retrofit. Results reveal significant improvements in in-plane performance and demonstrate the potential of optimised FRP configurations to preserve historic structures.

Keywords: In-plane loading, Masonry wall, Strengthening , Fibre reinforced polymer, Nonlinear numerical analysis

1. Giriş

Duvarlar gibi tarihi yığma yapı bileşenleri, inşaat teknikleri nedeniyle sismik hareketlere karşı savunmasızdır. Tarihi yapıların sismik davranışı, genellikle düşük çekme mukavemeti, heterojen doğası ve zayıf harç-blok bağlantısı nedeniyle komplekstir ve bu yapılar, deprem yüklerine karşı ciddi riskler taşımaktadır. Dahası, yüzyıllar boyunca maruz kaldıkları çevresel etkiler ve malzeme yaşlanması nedeniyle daha da zayıflamışlardır [1,2]. Koruma faaliyetlerinde mevcut yapısal kapasitelerini artırmak ve olası deprem hasarlarını minimize etmek amaçlarıyla güçlendirme faaliyetleri önemli bir yer tutmaktadır. Buna ek olarak, önceki çalışmalar, tarihi yığma yapıların sismik yükler altında karmaşık doğrusal olmayan davranışlar sergilediğini ve bu kompleks davranışın güçlendirme faaliyetlerini zorlu bir görev haline getirdiğini göstermiştir. Lif Takviyeli Polimerler (LP), son yıllarda tarihi yapıların güçlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan malzemeler haline gelmiştir. LP'nin popülaritesi, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, korozyon direnci, esneklik ve kolay uygulanabilirlik gibi birçok avantajına dayanmaktadır [3,4].

Pek çok çalışma [5–9] LP ile güçlendirilmiş yapıların performansının önemli ölçüde iyileştiğini göstermiştir. LP'nin en etkili şekilde uygulanabilmesi için, çoğunlukla çalışmaların odak noktası olan en uygun malzeme yerleşimlerinin belirlenmesi malzeme tasarrufu ve performans gelişimi bakımından önemli bir odak noktasıdır. Ancak, optimum LP serinimi nadiren bir optimizasyon problemi olarak ele alınmıştır. Belirli bir yük altında en iyi yapısal performansı elde etmek için malzemenin en uygun şekilde dağıtılmasını sağlayan matematiksel bir yöntem olan topoloji optimizasyonu havacılık ve makine endüstrilerinde sıklıkla kullanılmaktadır [10]. Son yıllarda, sınırlı sayıda çalışmada yığma [6,11–13] ve beton [14–16] yapısal elemanların güçlendirilmesinde optimum LP serinimi araştırmalarında topoloji optimizasyonundan yararlanılmaktadır.

Bu çalışma, tarihi yığma yapıların önemli bileşenlerinden yığma duvarların düzlem içi yük altında optimum LP güçlendirme düzenlemelerini topoloji optimizasyonu ile araştırmayı, bulunan düzenlemelerle güçlendirilmiş duvar modellerin düzlem içi yükleme altındaki doğrusal olmayan davranışını sayısal analizlerle ortaya koyarak optimal güçlendirmenin sismik kapasite gelişimine katkısını incelemeyi ve böylelikle ileri çalışmalar için bir temel oluşturmayı hedeflemektedir.

2. Yöntem

2.1. Sayısal Model

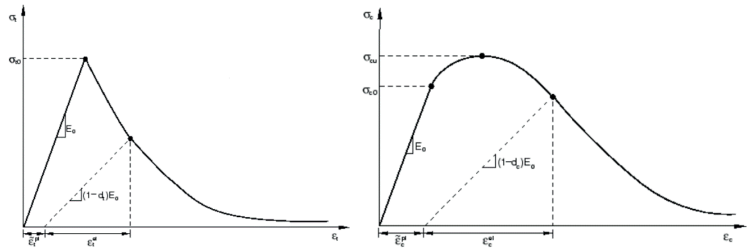
Nümerik modelleme, sonlu elemanlara dayalı bir yazılım olan Abaqus kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Abaqus, beton gibi yarı-gevrek malzemelerin modellenmesi için "Concrete smeared cracking", "Cracking model for concrete", ve "Concrete damaged plasticity (CDP)" gibi çeşitli seçenekler sunar. Bu çalışmada, yarı-gevrek malzemeler için uygun kabul edilen CDP modeli kullanılmıştır. CDP, esas olarak beton için geliştirilmiş olup izotropik elastik davranışı temsil eder. Bu durum, özellikle ortotropi önemli bir rol oynadığında, CDP'nin yığma yapılar için kullanımında bir sınırlamadır. Ancak, CDP yığma yapıların modellenmesinde sıkça kullanılmakta olup hesaplama süresi ve doğruluğu açısından iyi bir seçenektir. Bu nedenle, bu çalışmanın sayısal modelleme aşamasında yığma yapı, makro modelleme yöntemi esas alınarak sürekli bir yapı olarak ele alınmıştır.

Sayısal kararsızlıkları önlemek için yüzey, eksantriklik adı verilen bir parametre uygulanarak düzenlenmiştir. Çekme ve basınçtaki farklı davranışlar, çekmede üssel veya doğrusal yumuşama ve basınçta parabolik yumuşama ile tanımlanmıştır. Elastik rijitliğin azalması, plastik deformasyonun fonksiyonları olan d_t ve d_c adı verilen iki değişken tarafından yönetilir. Bu değişkenler, 0 - hasarsız durumdan 1 - tam mukavemet kaybı durumuna kadar değişir.

Model, beton için süreklilik esaslı, plastik davranışa dayalı bir hasar modelidir. Ana iki hasar mekanizmasının beton malzemesinin çekme çatlaması ve basınç ezilmesi olduğu varsayılır. Akma (veya kırılma) yüzeyinin evrimi, sırasıyla çekme ve basınç yüklemesi altındaki hasar mekanizmaları ile bağlantılı olan iki pekleşme değişkeni, ⟦ ε⟧_t^pl ve ε_c^pl tarafından kontrol edilir. ⟦ ε⟧_t^pl ve ε_c^pl, sırasıyla çekme ve basınç eşdeğer plastik deformasyonları olarak adlandırılır.

Tek eksenli çekme ve basınç altında betonun gerilme-şekil değiştirme davranışı, hasar plastikliği ile karakterize edilir (Şekil 1.). Tek eksenli çekmede gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, kırılma gerilmesine kadar doğrusal elastiktir. Bu noktadan sonra mikro çatlakların oluşumu, makroskopik olarak yumuşama ile temsil edilir. Tek eksenli basınç altında ise davranış başlangıçta

doğrusal olup, plastik rejimde gerilme pekleşmesi ve nihai gerilmeden sonra yumuşama ile karakterize edilir. Boşaltma sırasında elastik rijitlik azalır ve bu durum iki hasar değişkeni (d_t ve d_c) ile tanımlanır. Bu değişkenler, plastik deformasyonların, sıcaklık ve alan değişkenlerinin fonksiyonları olarak kabul edilir.

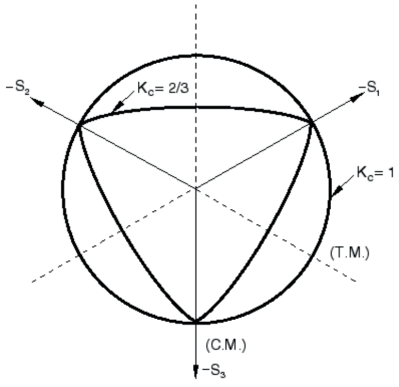


a) b)

Şekil 1. a)çekme ve b)basınç altında bünye kanunları [17]

CDP modeli, gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinde Lubliner vd. [18] tarafından geliştirilen akma fonksiyonunu kullanır. Bu model, çekme ve basınç altında mukavemetin farklı evrimini hesaba katan Lee ve Fenves [19] tarafından yapılan geliştirmeleri içerir. Akma yüzeyinin evrimi, pekleşme değişkenleri olan ⟦ ε⟧_t^pl ve ε_c^pl tarafından kontrol edilir.

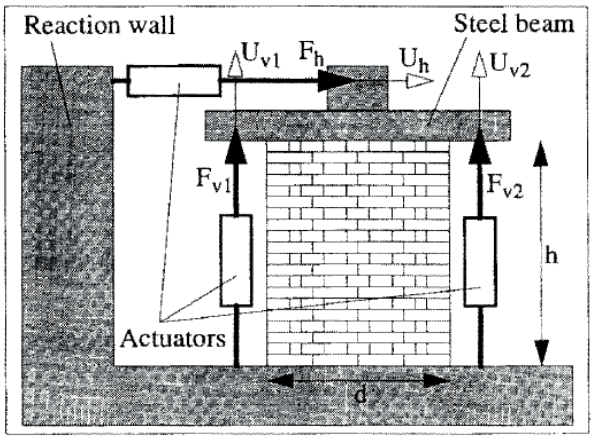
Sonuç olarak, CDP modelinin kullanımı, çekme çatlaması ve basınç ezilmesi gibi ana hasar mekanizmalarını başarılı bir şekilde temsil eder ve yığma yapıların sayısal modellemesinde etkili bir araçtır. CDP modelinin uyumlu olduğu Mohr-Coulomb ve Drucker-Prager kriterleri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Mohr-Coulomb ve Drucker-Prager kriterleri için akma yüzeyleri

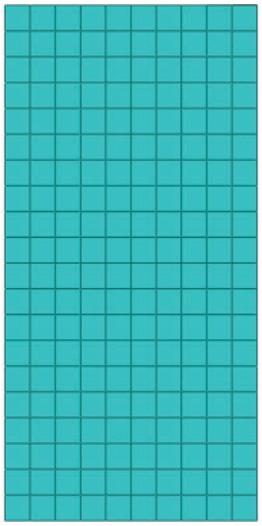
2.2. Referans Duvar Örnek ve Modellenmesi

Anthoine vd. [20] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, deneysel değerlendirmeler için 1000x2000x250 mm^3 boyutlarında bir duvar örnek hazırlanmıştır. Slender Panel_Ispra olarak isimlendirilen duvar, alt kısımdan tabana sabitlenmiş ve üst kısmın düzlem içi ve düzlem dışı dönmesine izin vermeyecek şekilde gerekli sınır koşulları sağlanmıştır. Deney için hazırlanan duvar modeli ve sınır koşulları Şekil 3. de gösterilmiştir. İlk olarak, duvarın üst kısmına yerleştirilen aktüatörler yardımıyla 0,6 MPa'lık düşey bir basınç uygulanmıştır.



Şekil 3. Slender Panel_Ispra ve test düzeneği [20]

Ardından, yatay aktüatörler yardımıyla her iki yönde 12 mm yer değiştirme sağlayacak şekilde döngüsel yatay yer değiştirme uygulanmıştır. Duvar yıkılmadığı için, yeniden test edilerek 0,8 MPa'lık düşey basınç altında 15 mm yanal yer değiştirme uygulanmıştır. Bu güncel çalışmada, ikinci yükleme senaryosu takip edilerek 0.8 MPa bir düşey basınç ardından da 15 mm yer değiştirme uygulanarak simülasyonlar gerçekleştirilmektedir. Sonlu eleman ayrımında, genel amaçlı doğrusal bir katı eleman olan C3D8R eleman tipi kullanılmıştır. Sayısal modelleme için, duvar boyutları göz önünde bulundurularak ve hesaplama yükünü azaltma gerekliliği dikkate alınarak 100 mm'lik bir sonlu eleman boyutu uygun bulunmuştur. Sayısal model ve ağ yapısı Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. Sonlu elemanlara ayrılmış sayısal model

Duvar modelinin alt düğüm noktaları için tüm öteleme ve dönmeler sabitlenmiştir. Başlangıçtaki düşey basınç, duvarın üst yüzeyine tüm dönmelerin kısıtlanmasının yanı sıra uygulanmıştır. Daha sonra duvarın üst kısmına yanal yer değiştirme uygulanmıştır. Deneysel olarak döngü yüke maruz bırakılmış olsada hesapsal yükü azaltmak amacıyla sayısal model monotonik olarak yüklenmiştir.

Yığma duvar model için kullanılan parametreler Tablo 1. ‘de sunulmuştur. Tablo 1. ‘de sunulan ana değerlerin kalibrasyonuna gerek duyulmamış, referans çalışmada verildiği gibi kullanılmıştır. Bu parametrelere ek olarak, CDP modeli viskozite parametresinin tanımlanmasını gerektirir. Referansta bu parametreler hakkında bilgi bulunmamaktadır. Bu nedenle, bir dizi kalibrasyon çalışmasının ardından, dilatasyon açısı (ψ) ve viskozite parametresi sırasıyla 30º ve 0,003 olarak kabul edilmiştir. Kalınlığı 0.223 mm olan Karbon LP kumaş malzemenin birim hacim ağırlığı 1790 kg/m^3, liflerin Elastisite Modülü 265 GPa ve çekme dayanımı 3200 MPa olarak varsayılmıştır [6]. Sonuçlar kapasite kavisleri ve hasar formları bakımından Bölüm 3.1 de tartışılmaktadır.

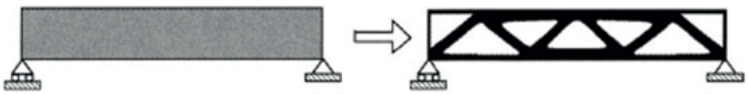
Tablo 1. Slender Panel_Ispra için kullanılan parametreler

Parametreler	Değer	Nitelik
ρ	1652 kg/m^3	Birim hacim ağırlık
E	1491 MPa	Young's Modülü
ν	0,15	Poisson oranı
f_c	6,2 MPa	Basınç Dayanımı
f_t	0,25 MPa	Çekme Dayanımı

2.3. Topoloji Optimizasyonu

Yapısal optimizasyon, belirli yükler altında bir tasarım alanında malzeme dağılımını optimize ederek yapının en iyi performansını araştırır [21]. Malzeme kaynaklarının sınırlı olması, çevresel etkiler, teknolojik rekabet ve hafiflik gereksinimleri nedeniyle optimum yapısal tasarım giderek daha önemli hale gelmektedir.

Sürekli yapılar için topoloji optimizasyonu, tasarım alanındaki boşlukların sayısını ve geometrisini, alanın bağlantısını ve en iyi lokasyonları belirleyerek en uygun tasarımları bulmayı amaçlar [10]. Topoloji optimizasyonunun görsel bir temsili Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. Bir kiriş yapının topoloji optimizasyonu [10].

Topoloji optimizasyonu, doğası gereği 0-1 programlama problemi olarak tanımlanabilir. Klasik bir formülasyon olan 0-1 enerji tabanlı problem, hacim sınırına tabi olarak dış kuvvetler tarafından yapılan işi (uyumu) en aza indiren "siyah-beyaz" bir dağılım bulmayı hedefler [22].

Bu çalışmada topoloji optimizasyonu Abaqus Tosca aracı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Optimum düzenlemeleri bulmak için SIMP yöntemi takip edilmiştir. Optimum takviye düzenlemesi arayışı, belirli bir hacim sınırı altında toplam yapısal uyumu en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Probleme konu olan 3D tasarım alanı, düzlem içi yüklemeye maruz kalan doğrusal elastik izotropik bir cismi dikkate almaktadır. Takviye malzemesi, duvarın

her iki yüzeyine uygulanmış , her iki yüzdeki serinimin ve sismik salınımda dikkate alınarak her bir yüzeyin kendi içinde simetrik olması sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Optimizasyon süreci aşağıdaki matematiksel ifadelerle (1-2) tanımlanmaktadır. Genel enerji tabanlı topoloji optimizasyonu takip edilmesine rağmen LP yerleşiminde plastik davranışın dikkate alınmasını sağlamak amaçlarıyla birim yükleme yerine duvarın elastik ötesi davranış gösterdiği deplasman yükü altında optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

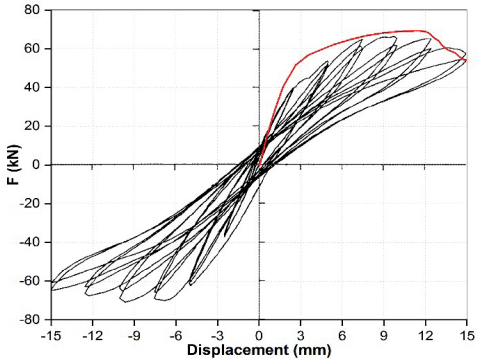
$$\text{Hedef} \qquad min_x c(x) = F^T U \tag{1}$$

$$\text{Sınır Şart} \qquad 0 \le x_i \le V_f - \sum_{i=1}^{N} V_i x_i \Big/ V_0 \ge 0, \ : \ \text{Ku} = F, \ : \ 0 \le x_i \le 1 \tag{2}$$

c, U ve F sırasıyla şekil değiştirme enerjisi, küresel yer değiştirme ve kuvvet vektörleridir; K ise küresel rijitlik matrisidir. Denklem (2), kullanılan LP miktarının, toplam tasarım alanı hacminin (V_0), belirlenmiş bir hacim kesiri (V_f) altında kalmasını sağlayan bir kısıtlamadır. Kullanılan FRP miktarı, tasarım değişkenleri vektörü x_i ile ilgili hacim V_i 'nin çarpımı ve tasarım alanını ayrıştıran toplam eleman sayısı N ile belirlenir. Güç çarpanı (p) genel varsayım ile uyumlu olarak 3 alınmıştır. Optimum LP serinimi için hacim kesiri $V_f = 0.5$ seçilmiştir, böylelikle Karbon LP serinimi duvar yüzeyinin %50 sine karşılık gelmektedir.

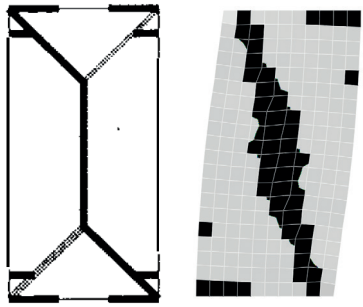
3. Sonuçlar

Güçlendirilmemiş duvar örneğinin sayısal modelinin analizinden elde edilen kapasite eğrisi, referans deneysel döngü yük eğrileriyle birlikte Şekil 6. da verilmektedir. Eğrinin başlangıç kısmında rijitliği ifade eden bölüm sayısal olarak fazla tahmin edilmiştir. Bunun nedeni, deneysel çalışmanın zaten hasar görmüş, yani rijitliği azalmış numune üzerinde gerçekleştirilmiş olmasıdır. Maksimum yük, %1 hata payı ile oldukça doğru tahmin edilmiştir ve yumuşama davranışı da mükemmel bir benzerlik göstermektedir. Bu, sayısal modelin tanımlanan koşullar altında deneysel sonuçları iyi bir şekilde yansıttığını kanıtlamaktadır. Yumuşama davranışının benzer olması, modelin gerçek dünya uygulamalarında güvenilir sonuçlar verebileceğinin bir göstergesidir. Bu nedenle, modelin gelecekteki çalışmalarda kullanılabilirliği ve geçerliliği konusunda önemli bir doğrulama sağlamaktadır.



Şekil 6. Referans deneysel ve güncel sayısal çalışmadan elde edilen kavisler

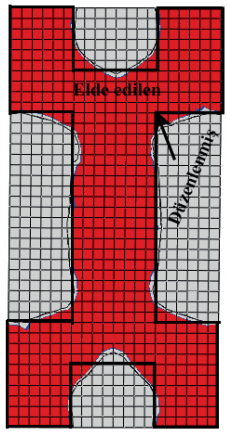
Sayısal olarak elde edilen hasar durumu ile referans verilerin karşılaştırılması Şekil 7 de sunulmaktadır. Sayısal modelleme, deneysel çatlak gelişimine çok yakın bir görünüm elde edebilmiştir. Deneysel çalışmada döngüsel yükleme uygulanırken, sayısal modellemede monotonik yükleme kullanıldığı göz önünde bulundurulduğunda, sayısal olarak elde edilen hasar biçiminin referans deneysel ve sayısal sonuçlarla mükemmel bir uyum gösterdiği görülmüştür. Eğriler ve hasar durumu, deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içindedir. Bu, sayısal modelin, deneysel çalışmalarda gözlemlenen çatlak ve hasar gelişimini başarılı bir şekilde tahmin edebildiğini göstermektedir. Ayrıca, sayısal modelin bu kadar yüksek doğrulukla referans sonuçlarla uyum sağlaması, modelin geçerliliğini ve güvenilirliğini vurgulamaktadır. Bu uyum, gelecekteki analizlerde sayısal modellemenin güvenle kullanılabileceğini göstermektedir.



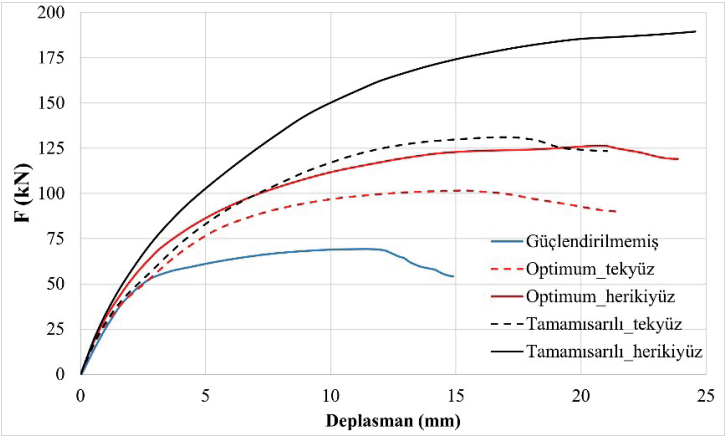
a) *b)*

Şekil 7. a)deneysel hasar formu, b) güncel sayısal modelle elde edilen hasar formu

Karbon LP kumaş model 50 mm boyutunda elemanlara ayrılarak daha detaylı yerleşim eldesi hedeflenmiştir. Topoloji optimizasyonu sonucu optimum LP serinimi Şekil 8.de verilmektedir. Beyaz elemanlar tasarım alanından çıkarılan kırmızı elemanlar ise LP yerleşiminin gerekli olduğu bölgelerdir. Elde edilen optimum LP yerleşiminin referans deneysel ve sayısal hasar formu ile uyumlu olduğu görülmüştür ki bu da topoloji optimizasyonu algoritmasının niyetlenildiği gibi plastik davranışı dikkate aldığını göstermektedir. Pratik açıdan uygulanabilir olması bakımından siyah bir çerçeve ile önerilen nihai LP alanı gösterilmektedir ve bu düzenlenmiş form modellenerek güçlendirilmiş duvar modeller oluşturulmuştur. Optimum LP serinimi duvar her iki yüzüne uygulandığı bir model ve duvar tek yüzüne uygulandığı bir modele ilave referanslar oluşturmak için duvar her iki yüzünün tamamen LP ile sarıldığı ve duvar tek yüzünün tamamen LP ile sarıldığı modeller de analiz edilmiştir. Güçlendirilmiş modellerde 25 mm yatay deplasman uygulanmış ve yük düşüşünün gerçekleştiği deplasman değerinden hemen sonrası için Şekil 10. da verilen kapasite kavisleri elde edilmiştir. Güçlendirilmiş modeller duvar rijitliğini kaydadeğer derecede geliştirmiştir. Yine genel bir sonuç olarak güçlendirilmiş modeller daha sünek davranış göstermiş ve maksimum yük %53-%176 aralığında artmıştır. Optimum güçlendirme düzenlemelerinin kullanıldığı modeller tamamen LP ile sarılı modellerin yarısı kadar malzeme içermesine rağmen önemli kapasite artışı sağlamıştır. Dahası, aynı malzeme miktarına sahip olan duvar tek yüzünün tamamen sarılması ve her iki yüzünün optimum miktarda sarılmasını içeren modellerin sonuçları mukayese edildiğinde yaklaşık aynı maksimum yük kapasitesine sahip olmalarına rağmen optimum güçlendirilmiş olan model sadece daha rijit değil aynı zamanda daha sünek davranış göstermiştir.

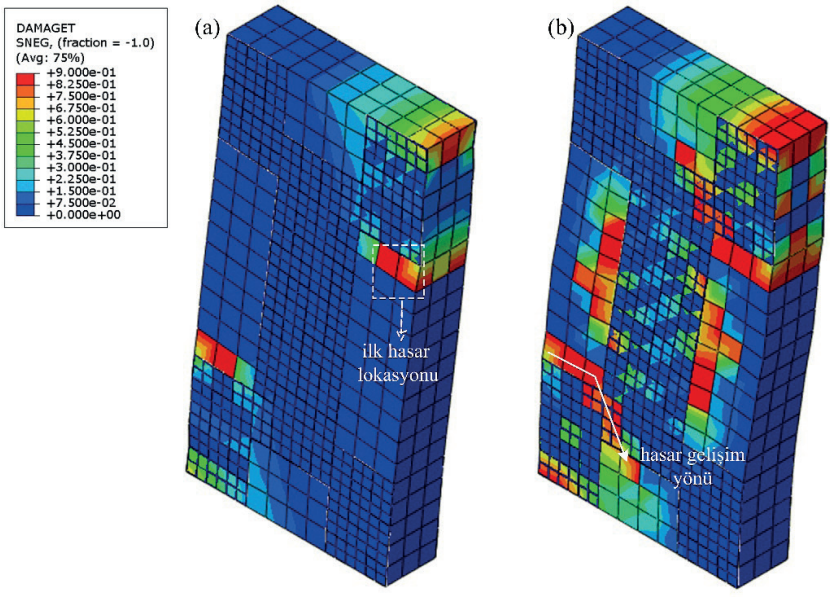


Şekil 8. Optimum LP güçlendirme konfigürasyonu



Şekil 9. Modellerin kapasite kavisleri mukayesesi

Şekil 10. da optimum LP serinimi ile güçlendirilmiş duvar modellerin hasar formları sunulmuştur. Şekil 10.a ilk hasar oluşumunun duvar sağ üst köşesindeki lokasyonuna göre yerdeğiştirerek gerçekleştiği yeni lokasyonu göstermektedir. Beklenildiği gibi hasar formları LP yerleşimlerinin hemen bitişiğinde meydana gelmiştir. İlave olarak duvar üst kısmında hareket etmek yerine duvar çekirdek bölgesine doğru ilerlemektedir. Hasar gelişimi Şekil 10.b de gösterildiği gibi çapraz bir yolu takip etmektedir.



Şekil 10. Optimum LP ile güçlendirilen duvar modellerin (a) hasar başlangıcı, (b) yük düşüşüne karşılık gelen hasar formu

4. Çıkarımlar

Bu çalışma yığma duvarları güçlendirmek için kullanılan Lif takviyeli polimerlerin (LP) optimum yerleşimini, optimum LP düzenlemeleri ile güçlendirilen modellerin düzlem içi yük altındaki doğrusal olmayan davranışlarını ve kapasite gelişimini referans güçlendirilmemiş ve LP'nin tüm duvar yüzeyine uygulanması durumları ile karşılaştırarak araştırmaktadır.

Bulgular gösteriyor ki topoloji optimizasyonu, tarihi yığma duvarların güçlendirilmesi için en uygun LP konfigürasyonlarını etkili bir şekilde belirleyebilir. Güçlendirilmiş örneklerin doğrusal olmayan sismik davranışı, performansta önemli gelişmeler olduğunu göstermekte ve özel güçlendirme stratejilerinin öneminin altını çizmektedir. Optimum güçlendirme düzenlemeleri ile önemli malzeme azaltımına ilave olarak yüksek yapısal performansın eldesi ortaya konulmuştur. Ortaya konulan LP serinimi duvar kenarlarında ve orta kısmında kullanılması gerekli malzeme miktarını, yani LP kumaş uzunluğunun da ortaya konulması bakımından düzlem içi yük altındaki yığma duvarlarda bir çapraz serinim gerekliliği bilgisinin ötesine geçmektedir. Böylelikle yapısal güvenlik yeterli seviyede sağlanırken bir mühendislik gereği olarak gereksiz malzeme kullanımından da hesapsal yöntem yetenekleri sayesinde kaçınılmıştır.

Farklı boyutlardaki duvarlar için farklı oranlarda malzeme kullanımına bağlı olarak optimum güçlendirme yerleşimlerinin belirlenmesi, etkinliklerinin mukayese edilerek en iyi alternatiflerin malzeme miktarı-performans tabanlı bir indeksle ortaya konulması, ulusal ve uluslararası güçlendirme faaliyetlerine rehberlik etmesi bakımından kritik öneme sahiptir ve gelecek çalışma olarak kapsamlı bir şekilde ele alınması planlanmaktadır. Özellikle, Türkiyede yaşanan son depremler, mevcut deprem yönetmeliğinde yüzeysel olarak ele alınan yığma yapıların LP ile güçlendirilmesi hususunda ileri ve kapsamlı yönlendirmelere olan acil ihtiyacı vurgulamaktadır.

Kaynaklar

[1] P.B. Lourenço, Recommendations for restoration of ancient buildings and the survival of a masonry chimney, Constr Build Mater 20 (2006) 239–251. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.026 .

[2] M.R. Valluzzi, L. Binda, C. Modena, Mechanical behaviour of historic masonry structures strengthened by bed joints structural repointing, Constr Build Mater 19 (2005) 63–73. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.036 .

[3] T.C. Triantafillou, Strengthening of Masonry Structures Using Epoxy-Bonded FRP Laminates, Journal of Composites for Construction 2 (1998) 96–104. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:2(96) .

[4] F. Clementi, V. Gazzani, M. Poiani, S. Lenci, Assessment of seismic behaviour of heritage masonry buildings using numerical modelling, Journal of Building Engineering 8 (2016) 29–47. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2016.09.005 .

[5] D. V. Oliveira, I. Basilio, P.B. Lourenço, Experimental Behavior of FRP Strengthened Masonry Arches, Journal of Composites for Construction 14 (2010) 312–322. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000086 .

[6] İ.H. Tarhan, Seismic Capacity of Masonry Arches Optimally Strengthened With Fibre-Reinforced Polymer: Experimental and Numerical Investigation, PhD, Ataturk University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, 2022. https://www.proquest.com/dissertations-theses/seismic-capacity-masonry-arches-optimally/docview/2892801785/se-2?accountid=8403.

[7] M.R. Valluzzi, M. Valdemarca, C. Modena, Behavior of Brick Masonry Vaults Strengthened by FRP Laminates, Journal of Composites for Construction 5 (2001) 163–169. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2001)5:3(163).

[8] V. Alecci, S. Barducci, A. D'Ambrisi, M. De Stefano, F. Focacci, R. Luciano, R. Penna, Shear capacity of masonry panels repaired with composite materials: Experimental and analytical investigations, Compos B Eng 171 (2019) 61–69. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2019.04.013.

[9] F.G. Carozzi, C. Poggi, E. Bertolesi, G. Milani, Ancient masonry arches and vaults strengthened with TRM, SRG and FRP composites: Experimental evaluation, Compos Struct 187 (2018) 466–480. https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2017.12.075.

[10] M.P. Bendsøe, O. Sigmund, Topology Optimization:Theory, Methods, and Applications, Springer Berlin Heidelberg, 2004. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05086-6.

[11] M. Bruggi, A. Taliercio, Optimal strengthening of no–tension structures with

externally bonded reinforcing layers or ties, Structural and Multidisciplinary Optimization 55 (2017) 1831–1846. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00158-016-1625-9.

[12] M. Bruggi, G. Milani, Optimal FRP reinforcement of masonry walls out-of-plane loaded: A combined homogenization–topology optimization approach complying with masonry strength domain, Comput Struct 153 (2015) 49–74. https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUC.2015.02.004.

[13] İ.H. Tarhan, H. Uysal, Topology Optimization of the FRP for strengthening of masonry barrel vaults, Eng Fail Anal 151 (2023). https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107390.

[14] M. Bruggi, A. Taliercio, Optimal strengthening of concrete plates with unidirectional fiber-reinforcing layers, Int J Solids Struct 67–68 (2015) 311–325. https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2015.04.033.

[15] J. Cunha, L.P. Chaves, The use of topology optimization in disposing carbon fiber reinforcement for concrete structures, Structural and Multidisciplinary Optimization 49 (2014) 1009–1023. https://doi.org/10.1007/S00158-013-1036-0 .

[16] M. Bruggi, A. Taliercio, Topology optimization of the fiber-reinforcement retrofitting existing structures, Int J Solids Struct 50 (2013) 121–136. https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2012.09.009.

[17] Abaqus, ABAQUS [Computer software].Dassault Systèmes, Waltham, MA., (2022).

[18] J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller, E. Oñate, A plastic-damage model for concrete, Int J Solids Struct 25 (1989) 299–326. https://doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4.

[19] J. Lee, G.L. Fenves, Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures, J Eng Mech 124 (1998) 892–900. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892).

[20] A. Anthoine, G. Magonette, G. Magenes, Shear-compression testing and analysis of brick masonry walls, in: In Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering , Duma, 1995: pp. 1657–1662.

[21] E. Andreassen, A. Clausen, M. Schevenels, B.S. Lazarov, O. Sigmund, Efficient topology optimization in MATLAB using 88 lines of code, Structural and Multidisciplinary Optimization 43 (2011) 1–16. https://doi.org/10.1007/s00158-010-0594-7.

[22] K. Liu, A. Tovar, An efficient 3D topology optimization code written in Matlab, Structural and Multidisciplinary Optimization 50 (2014) 1175–1196. https://doi.org/10.1007/s00158-014-1107-x.

TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI ANKARA ŞUBESİ
TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI DİYARBAKIR ŞUBESİ
ODEYA ENDAZYARÊN AVAHÎYÊ

DONATILI HARÇLAR İLE GÜÇLENDİRMEDE FARKLI BİLEŞEN ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Mustafa Esat GÜNEŞ[1], Zehra Canan GİRGİN[2]

Dr. Öğr. Üyesi, Karabük Üniversitesi, esatgunes@karabuk.edu.tr
[2]Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, zcgirgin@yildiz.edu.tr

Özet

Donatılı sıva ile mantolama yığma duvar güçlendirmede inovatif bir teknik olarak yaygınlaşmaktadır. Literatürde, bu yöntemin performansı yüksek maliyet ve uzun zaman gerektiren orta/büyük ölçekli deneysel çalışmalar ile değerlendirilmektedir. Sektörde bu alanda artan malzeme çeşitliliği, uygulamada tercih edilecek kompozit bileşenlerinin uyumluluğunun ve sistem veriminin pratik olarak belirlenmesini gerektirir. Bu çalışmada, tekstil donatılı harçlarla güçlendirilmiş yığma kirişlerin düzlem-dışı davranışı eğilme testleri ile araştırıldı. Donatı olarak beş farklı tekstille yürütülen testlerde matris olarak doğal hidrolik kireç ve çimento esaslı harç kullanıldı. Donatı-matris arayüzündeki etkileşim ve matris-yüzey uyumunun güçlendirme kapasitesi üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Bu deneysel yöntemin bu kompozitlerin katkısını araştırmak için uygun olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Tekstil Donatılı Harçlar, Yığma Duvar Güçlendirme, Düzlem-dışı Davranış, Çimentolu Kompozitler.

Abstract

Sheathing with reinforced plaster is becoming widespread as an innovative technique for strengthening masonry walls. In the literature, the performance of this method is evaluated by medium/large scale experimental studies that require high cost and long time. Increasing material diversity in this field in the industry requires practical determination of the compatibility and system efficiency of the composite components to be preferred in practice. In this study, the out-of-plane behavior of masonry elements reinforced with textile-reinforced mortars was investigated by bending tests. In the tests carried out with five different textiles as reinforcement, natural hydraulic lime and cement-based mortar were used as matrix. The effects of interaction at the reinforcement-matrix interface and matrix-surface compatibility on the reinforcement capacity were observed. This experimental method was found to be suitable for investigating the contribution of these composites.

Keywords: Textile Reinforced Mortars, Masonry Wall Strengthening, Out-of-plane Behaviour, Cementitious Composites.

1. Giriş

Narinliği yüksek yığma duvarlar, sismik titreşimler sırasında burkulma etkisi ile düzlem dışı göçmeye hassastır. Bu tip yapılarda yaşayan insanların can ve mal kayıplarını en aza indirme amacının yanında, büyük çoğunluğu yığma olan tarihi yapıların güçlendirilmesi kültürel mirasın korunması açısından önemlidir.

Mevcut yığma duvarların hafif fiber takviyeli kompozitler yoluyla dışarıdan güçlendirilmesi son yıllarda giderek yaygınlaşan bir güçlendirme yöntemidir. İnorganik matrisli TRM (Tekstil Donatılı Harç) uygulamaları, polimer matrisli FRP (Fiber Takviyeli Polimer) uygulamalarına alternatif olarak ortaya çıkmıştır. TRM kompozitleri, buhar geçirgenliği, yığma yüzeye uyumluluğu, basit işçiliği, yüksek sıcaklık dayanımı, ıslak yüzeylerde uygulanabilmesi, geri döndürülebilirliği, yapıya zarar vermeden değiştirilebilmesi gibi avantajları sayesinde tarihi yığma yapıların korunması/güçlendirilmesi ile ilgili prensipleri karşılamaktadır.

TRM, matris ve takviye tekstili olmak üzere iki ana bileşeni olan kompozit bir malzemedir. 1990'lı yıllardan bu yana cephe uygulamaları için bilinen endüstriyel bir ürün olan alkaliye dayanıklı ve uygun maliyetli alkali dayanımlı cam (AR-Glass) elyafları, bugüne kadar TRM sistemlerinde en çok vurgulanan kumaş türüdür [1,2]FRCM. Bazalt ve karbon tekstiller günümüzde TRM uygulamalarında popüler hale gelmiştir. AR-cam kumaşlarla mekanik olarak rekabet edebilen bazalt kumaşlar [3], son on yılda yeni bir yapısal güçlendirme malzemesi olarak ortaya çıkmıştır. Karbon fiberler, henüz çok uygun maliyetli olmasa da, yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk özelliklerinin yanı sıra agresif çevre koşullarındaki dayanıklılıkları nedeniyle son zamanlarda ilgi çekmektedir [4–6]. Ayrıca tekstil endüstrisinin çeşitli hammaddelerden lif üretebilme kabiliyeti, farklı lif türlerinden iplik üretimi ve birbirine bağlanma şekilleri ile iplikler üzerine uygulanan kaplamalar takviye kumaşı çeşitliliğini artırmaktadır. Diğer taraftan, TRM uygulamalarında genellikle çimento ya da kireç esaslı harçlar kullanılsa da karışımlara eklenen mineral katkı gibi puzolanik bileşenler matris fazını çeşitlendirmektedir. Değişken sayısının fazlalığına karşılık, bu konudaki standartlar ve kılavuzlar bu yöntemin kullanımı konusunda ne kullanıcıları ne de kullanımına izin/onay verecek mercileri yönlerdirmede yeterlidir. Çevresel etkenler ve farklı lif türlerinin dayanıklılığı konusu, üzerinde en az çalışılmış konudur ve yeterli bilgi birikimi yoktur.

TRM ile güçlendirilmiş yığma duvarların düzlem-dışı davranışını araştıran mevcut literatürde; düşey yüklere maruz kalan yatay olarak konumlandırılmış orta ölçekli yığma duvar numuneleri üzerinde eğilme testleri [7–9], düzgün yatay yükler altında hava yastıkları aracılığıyla düzlem dışı eğilme [10,11]such as interior or exterior walls. URM walls are typically deficient in flexural capacity when subjected to out-of-plane loading caused by high wind pressure or earthquakes. Retrofitting masonry walls with novel materials, such as fiber-reinforced polymer (FRP ve tam ölçekli yığma duvarların sarsma tablası testleri [12,13] gibi çeşitli test yöntemleri mevcuttur. Bu çalışmada küçük ölçekli çeşitli TRM sistemleri ile güçlendirilmiş yığma kirişlerde eğilme testleri uygulanarak güçlendirmenin katkısı araştırılmıştır. Bu test yönteminin maliyetli büyük duvar numuneleri yerine düşük maliyetli numuneler üzerinden düzlem dışı eğilme için hızlı bir ön değerlendirme imkanı sunacağı düşünülmektedir.

2. Deneysel Program

Deneysel çalışmada yığma elaman yüzeylerini güçlendirmek üzere tasarlanan kompozitlerin matris fazı olarak doğal hidrolik kireç esaslı ve çimento esaslı olmak üzere iki farklı harç tipi kullanılmıştır. Kompozitlerin donatı fazı için ise piyasada tarihi yapıların güçlendirilmesi amacıyla satışta bulunan beş farklı tekstil türü seçilmiştir. Böylece toplamda on adet güçlendirme seçeneği elde edilmiştir.

2.1. Bileşenlerin Mekanik Karakteristikleri

Birinci harç türü, yığma binaların yenilenmesinde kullanılan, doğal hidrolik kireç (NHL) (M10 sınıfı, BS-EN 998-2 [28]) içeren kuru karışımlı ticari bir harçtır. Çatlak gelişimini önlemeye yardımcı olmak için kuru karışımda mikrofiberler bulunur. Agrega dağılımı 0-200 μm ve 200-1000 μm olmak üzere iki kısım olan harcın işlenebilir olması ve hedef mukavemeti sağlaması için su/kuru karışım oranı 0.18 olarak belirlenmiştir. İkinci harç tipi olan çimentolu harç; Portland çimentosu (CEM I 42,5 R), kum (maks. boyut 1.0 mm) ve sudan oluşur. Bu harcın karşım tasarımında RILEM TC 203-RHM (Repair Mortars for Historic Masonry) [14] raporu dikkate alınarak; çimento/kum oranı 1/3 ve su/bağlayıcı oranı 0.8 olarak belirlenmiştir.

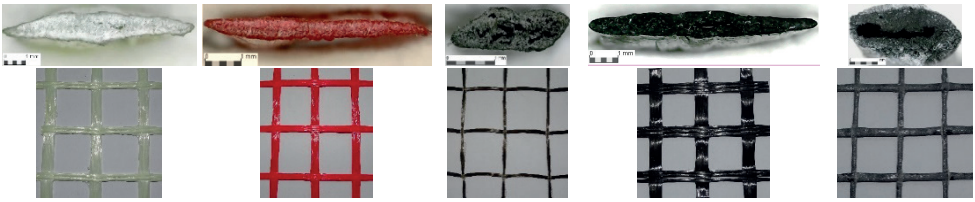
Harçların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla BS EN 1015-11'e [15]

uygun olarak 4x4x16 cm harç prizmaları üzerinde basınç ve eğilme testleri yapılmıştır. Tablo 1'de harç türlerinin 7 ve 28 günlük ortalama basınç (f_c) ve eğilme dayanımları (f_b) verilmiştir.

Tablo 1 Harçların mekanik özellikleri

	$f_{c,7}$ (MPa)	$f_{c,28}$ (MPa)	$f_{b.7}$ (MPa)	$f_{b,28}$ (Mpa)
Çimento	6.19	11.63	1.75	1.87
Doğal Hidrolik Kireç (NHL)	11.13	13.91	1.82	2.54

Güçlendirme kompoziti tasarımında donatı olarak piyasada yaygın olarak kullanılan çift yönlü beş farklı tekstil tipi seçilmiştir. Bu tekstil tipleri; iki tür alkaliye dayanıklı cam (GF1, GF2) tekstili, bir tür bazalt (BF) tekstili ve iki tür karbon (CF1, CF2) tekstilini içermektedir. Şekil 1›de, yukarda tanımlanan her tekstilden bir adet lif demetinin mikro görüntüsü ile tekstil örneklerinin düzlemsel fotoğrafları bulunmaktadır.



Şekil 1 Lif demetlerinin kesit görünümleri (üstte) ve tekstil düzlemsel fotoğrafları (altta)

Tekstillerin mekanik özellikleri, eksenel çekme testi kullanılarak belirlenmiştir. Her tekstil tipine ait çözgü ve atkı yönlerinden kesilmiş olan altı adet 150 mm uzunluğundaki elyaf demeti, ASTM D6637'ye [16] göre 15 mm/sn hızla deplasman kontrollü MTS Kriter Modeli'nde test edilmiştir. Test sonuçları, çözgü ve atkı elyaf demetleri arasında çekme mukavemeti açısından önemli bir fark olmadığını göstermiştir. Kumaşların fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2 Tekstil tiplerinin fiziksel ve mekanik özellikleri

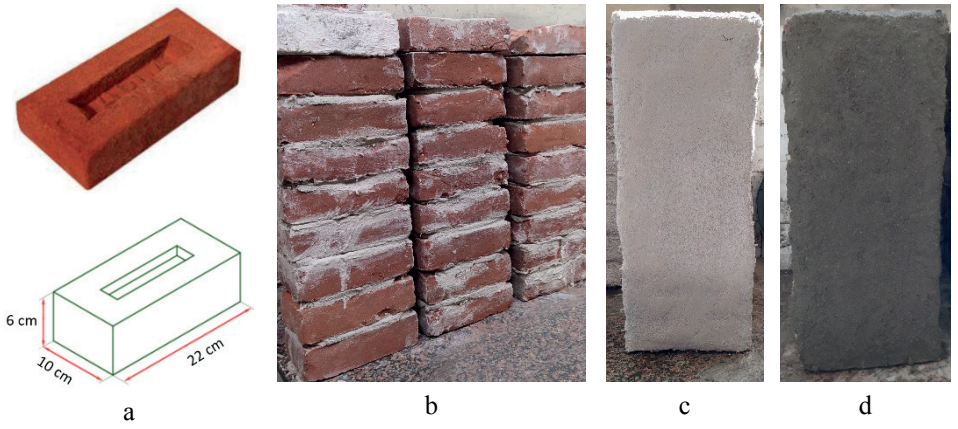
	Lif Tipi	Nominal ağırlık (g/m²)	Grid Aralığı (mm)		Dayanım (kN)		Maks. ş.d. (%)		Kaplama
			Çözgü	Atkı	Çözgü	Atkı	Çözgü	Atkı	
GF1	AR-Cam	670	35.0	39.0	2.92	2.84	2.63	2.03	SBR
GF2	AR-Cam	340	34.5	27.6	1.92	1.86	2.23	1.98	SBR
BF	Bazalt	153	36	36	0.81	0.63	2.03	2.02	-
CF1	Karbon	408	21.1	21.6	3.4	3.1	1.93	1.03	SBR
CF2	Karbon	370	25	25	4.5	3.8	2.32	1.81	SBR+Micro silika

Bu çalışmada test edilen tekstiller arasındaki önemli farklar şunlardır: (I) Tekstil üretimi öncesinde lif demetlerinin üretim aşamasında ön kaplama (boyutlandırma) uygulanır; (II) BF tipi tekstil dışında, lif demetlerinde SBR (stiren-bütadien kauçuğu) kaplama mevcuttur. BF tekstilini oluşturan lif demetlerinde, ön kaplama olarak yalnızca silan (SiH_4) bulunmaktadır; (III) Diğerlerinin aksine, CF2 tekstilinde, kumaş-matris arayüzünde yapışmayı teşvik etmek için SBR kaplamada SF parçacıkları bulunmaktadır; (IV) Daha yüksek kaplama oranına sahip GF1 ve CF2, diğer tekstil tiplerinin yaklaşık iki katı kalınlığa sahiptir; (V) Aynı lif tipine ve aynı kaplama tipine sahip olmalarına rağmen; kaplama miktarındaki artışa bağlı olarak, GF1 tekstili GF2'ye kıyasla daha rijit bir yapıya sahiptir.

2.2.Numunelerin Hazırlanması ve Test Düzeneği

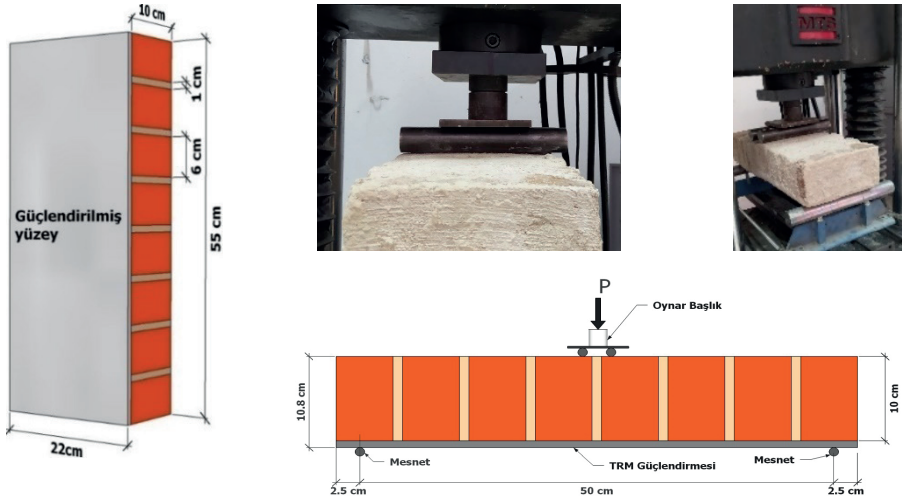
Suya doygun hale getirilmiş sekiz adet tuğlanın aralarında 1.0 cm derz olacak şekilde düşeyde üst üste dizilmesiyle 55x10x22 cm ölçülerinde yığma kirişler üretilmiştir (Şekil 2). Yığma kirişlerin üretiminde 22 cm x 10 cm x 6 cm boyutlarında, Eskişehir'de geleneksel yöntemlerle üretilen 22'lik antik harman tuğlaları kullanılmıştır (Şekil 2a). Bu tuğlaların üst yüzünde 10 mm derinliğinde bir harç cebi bulunmaktadır. Yukarıda belirtilen yığma kiriş boyutları, ASTM E-518'de [17] belirtilen sınır değerlere (mesnet açıklığı/numune derinliği ≥ 2.5) uygun olarak belirlenmiştir. Böylece, kısa kiriş oluşumu önlenmiş ve kirişlerin eğilmeye çalışması sağlanmıştır.

İki farklı harç türü ve beş farklı tekstil ile yığma kirişlere güçlendirme yapılarak on farklı seri oluşturulmuştur. Bu serilere ek olarak, tekstil donatının düzlem dışı davranışa katkısını görebilmek için her iki harç türü ile sıvanmış, ancak güçlendirilme yapılmamış referans serileri üretilmiştir. Her seri için üç adet yığma kiriş üretilmiş ve güçlendirme uygulamasından önce en az bir ay laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. Güçlendirme işlemi yığma birimlerin tek yüzeyine uygulanmıştır.



Şekil 2 a) Türkiye'deki geleneksel pişmiş toprak tuğlalar, b) Donatısız yığma birimler, TRM ile güçlendirilmiş yığma birimler: c) NHL esaslı harç d) Çimento esaslı harç

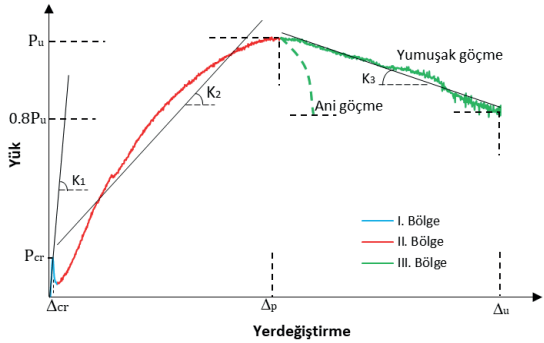
Güçlendirilen yığma birimler, laboratuvar koşullarında 28 gün bekletildikten sonra eğilme testine tabi tutulmuştur. Güçlendirilen yüzeyleri altta kalacak şekilde yan yatırılarak yığma bir kiriş gibi çalışması sağlanmıştır (Şekil 3). Kirişler, kenarlardan 2.5 cm uzaklıkta, bir ucu sabit diğer ucu mafsallı, açıklığı ayarlanabilir test aparatı üzerine yerleştirilmiş, 50 cm mesnet açıklığı elde edilmiştir.



Şekil 3 Güçlendirilmiş numune şematik görünümleri ve test düzeneği

3. Test Sonuçları

Eğilme testleri sırasında kaydedilen verilerden, yük-yer değiştirme (P-Δ) eğrileri oluşturulmuştur. Numunelerin genel davranışını temsil eden tipik P-Δ eğrisi üç bölgeden oluşmaktadır (Şekil 4). Doğrusal elastik davranışın gözlendiği I.Bölge, test başlangıcından numunede ilk çatlağın oluştuğu noktaya (P_{cr} , Δ_{cr}) kadar olan bölgeyi ifade eder. İlk çatlak oluştuktan sonra genellikle yük değerinde ani bir azalma meydana gelir. Bu ani azalma sonrası, maksimuma ulaşıncaya kadar (P_u, Δ_p) yük artışının devam ettiği kısım II. Bölge olarak tanımlanmıştır. III. Bölge ise, artan yer değiştirmeye rağmen yük değerinin azaldığı kısımdır. Maksimum yük değerine ulaştıktan sonra başlatılan bu son bölgede, ya çok hızlı dayanım kaybı ile ani göçme gerçekleşir ya da yük değerinin nispeten yavaş azalması ile sistem enerji sönümlemeye devam eder.



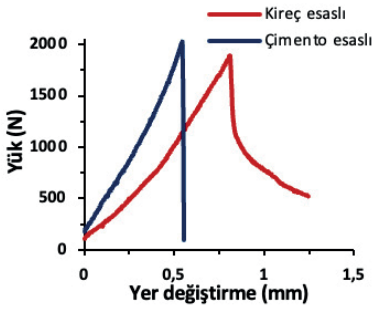
Şekil 4 Eğilme testlerinde P-Δ (yük-açıklık ortasındaki çökme) anahtar eğrisi

Güçlendirilmiş yığma kirişlerden oluşan her bir seriye ait deney sonuçlarının özeti Tablo 3'te verilmiştir. Bu tablodaki parametreler Şekil 4 üzerinde tanımlanan kritik noktaları, yutulan enerji miktarını, rijitlik ve süneklik değerlerini içerir. Tabloda verilen değerler ilgili seriyi temsil eden ortalama yük-yer değiştirme (P-Δ) eğrilerinden alınmıştır.

Tablo 3 Test sonuçlarının özeti

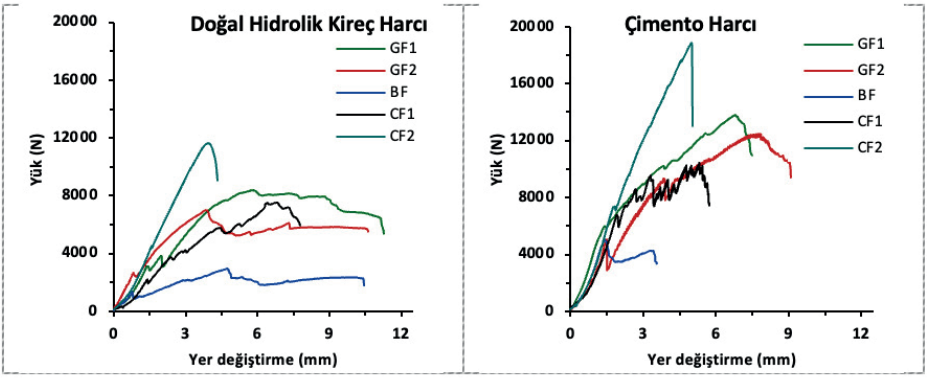
	P_{cr} (N)	Δ_{cr} (mm)	K_1 (N/mm)	P_u (N)	Δ_p (mm)	E_p (N.mm)	K_2 (N/mm)	0.8*P_u (N)	Δ_u (mm)	E_u (N.mm)	K_3 (N/mm)	Δ_u/Δ_p	(E_u-E_p) / E_p
GF1-L	3156	1.44	2140	8420	5.8	39196	1427	5403	11.3	69900	458	1.95	0.78
GF1-C	5978	1.40	4569	13834	6.8	59619	1419	10946	7.5	68326	4137	1.10	0.15
GF2-L	2644	0.82	3064	6977	3.9	16134	1566	5500	10.6	54619	10	2.74	2.39
GF2-C	5045.0	1.49	3275	12483	7.8	59823	1332	9403	9.1	74754	1655	1.17	0.25
BF-L	1388	0.80	1520	2931	4.8	8107	519	1785	10.5	20530	78	2.21	1.53
BF-C	3469	2.12	3641	4276	3.4	5684	639	3290	3.6	11259	7408	1.05	0.98
CF1-L	2203	1.41	1470	7508	6.4	25977	924	5934	7.8	35491	1063	1.21	0.37
CF1-C	6827	1.94	3442	10447	5.3	33957	818	7426	5.7	37720	5563	1.08	0.11
CF2-L	4507	1.59	2792	11645	4.0	22781	3208	5930	4.5	26885	6132	1.14	0.18
CF2-C	7420	1.84	4301	18871	5.0	47535	3738	1302	5.0	48196	4622	1.01	0.01

Güçlendirme yapılmayan (donatısız harç ile sıvanan) iki referans serisinde tipik P-Δ eğrisi oluşmadığı için (Şekil 5) Tablo 3'te bu seriler yoktur. Bu yığma kirişlerde donatısız sıvanın düzlem dışı performansa katkısı olduğu görülse de güçlendirilmiş numunelere göre yer değiştirme ve dayanım çok düşük seviyededir ve gevrek kırılma görülmüştür. Her iki harç tipinde yük kapasiteleri aynı düzeyde iken, kireç esaslı harçla sıvanmış numunelerde pik sonrası ani dayanım kaybı daha yumuşak olmuş, çimento esaslı harçla sıvanmış numunelere göre yer değiştirme yaklaşık ~%40 daha fazladır.



Şekil 5 Donatısız sıva uygulanmış numunelerin P-Δ eğrileri

Güçlendirilmiş yığma kiriş serilerine ait yük-yer değiştirme (P-Δ) eğrileri Şekil 6'da verilen iki grafikte verilmiştir. Solda doğal hidrolik kireç esaslı harç kullanılan seriler, sağda çimento esaslı harcın kullanıldığı seriler görülmektedir.



Şekil 6 Karşılaştırmalı P-Δ eğrileri

İlk çatlağın oluştuğu yer değiştirme seviyesi, GF1 ile güçlendirilmiş yığma kirişlerde; her iki harç türü için benzer olsa da, GF1-C takviyeli duvar kirişlerindeki P_{cr} yük seviyesi, GF1-L takviyeli olanlara göre yaklaşık olarak 2 kat daha fazladır. Başlangıç rijitlik değeri (K_1), kireç bazlı numunelerde çimento bazlı numunelerden ~%50 daha düşüktür. İkinci bölgede, sertleşme rijitliği (K_2) her iki harç için birbirine oldukça yakındır. Bununla birlikte, GF1-C serisinde, yutulan enerji miktarı, hem maksimum yükün hem de maksimum yük ile karşılık gelen şekil değiştirme miktarının yüksek oluşundan, GF1-L örneklerine göre %50 daha yüksektir. Diğer yandan, maksimum yük sonrası kireç bazlı takviyenin dayanımını koruması, enerji kapasitesinin

artmasını sağladığı için; test sonunda yutulan toplam enerji miktarı, GF1-C ve GF1-L için aynı seviyededir.

GF2 serilerinde I. bölgedeki başlangıç rijitlikleri (K_1) her iki harç türünde yakındır, ancak GF2-C serisinde başlangıç çatlak dayanımı daha büyüktür. GF2 ile güçlendirilmiş yığma kirişlerin ilk çatlak göründüğündeki yer değiştirme seviyeleri karşılaştırıldığında, GF2-C'nin GF2-L'ye göre yaklaşık %80 daha yüksek olduğu görülür. II. bölgede, GF2-L ve GF2-C serilerinin sertleşme rijitlikleri çok yakındır. Dolayısıyla, bölge I'deki yük ve deplasman seviyeleri oranı bu bölgede de korunmuş olduğundan GF2-C'nin maksimum yükü ve deplasmanı GF2-L'nin yaklaşık olarak 2 katıdır. Maksimum yüke kadar yutulan enerji miktarı arasındaki oran 3.7'dir. Çimento bazlı güçlendirme sonrası pik yük sonrasındaki dayanım kaybı, kireç bazlı güçlendirmeye göre daha hızlıdır. GF2-L serisinin yük-deplasman eğrisi, maksimum yüke ulaştıktan sonra yataya yakın bir şekilde ilerlemiş ve daha fazla yer değiştirme nedeniyle test sonuna kadar enerji yutmuştur. Bu son bölgede GF2-L örneklerinin düktil davranışının bir sonucu olarak, GF2-C ve GF2-L arasındaki toplam enerji yutma kapasitesi oranı 1.4'e düşmüştür.

BF-L serisinin maksimum yük değerleri, BF-C serisindeki değerlerinden daha düşük olmasına rağmen, BF-L yüksek yer değiştirme kapasitesi nedeniyle 2.8 kat daha fazla enerji yutma kapasitesine sahiptir. Çimento bazlı güçlendirmede daha büyük rijitlik artışı nedeniyle, maksimum yüke ulaşıldıktan sonra kireç bazlı kompozitlere göre dayanım kaybı daha hızlı ve ani gerçekleşmiştir. BF-L ile kirişler, düşük yük seviyesine rağmen, büyük şekil değiştirme kapasitesi sayesinde; test sonuna kadar BF-C takviyeli kirişlere göre iki kat daha fazla enerji tüketmiştir.

CF1 ile güçlendirilen yığma kiriş serilerinde I. bölgede CF1-L ve CF1-C için ilk çatlağın oluştuğu yer değiştirme değeri yakın iken yük değerleri arasında önemli derecede farklıdır. Bu farklılığa bağlı olarak her iki harç tipinin de K_1 başlangıç rijitlikleri oranı 2.34 olarak bulunur. II. bölgede kireç esaslı harçlarla güçlendirilen numuneler çimento esaslı harçlara göre daha sünek davranış göstermiş ve maksimum yük sonrası dayanım kaybı daha fazla olmuştur. Maksimum yer değiştirme, CF1-L serisinde CF1-C serisine göre %36 daha yüksektir. CF1-L ile güçlendirilen kirişler görece düşük dayanımlı olmasına rağmen daha sünek bir davranış sergileyerek tüketilen toplam enerji miktarı açısından çimentolu seriye yaklaşmıştır.

CF2 ile güçlendirilmiş yığma kirişlerde, tekstilin yapısının neden olduğu ani başlangıç rijitliği her iki harç türünde de gözlemlenmiştir. CF2-L'de, çok belirsiz olmasına rağmen, 1.59 mm olarak belirlenen Δ_{cr} değeri, CF2-C'de 1.84 mm'dir. Maksimum yük seviyesi açısından, CF2-C, CF2-L'ye göre hem %40 daha fazla eğilme dayanımına sahiptir hem de maksimum yük seviyesinde %20 daha fazla yer değiştirmiştir. Bu noktaya kadar CF2-C'nin tükettiği enerji miktarı CF2-L'nin yaklaşık iki katıdır. Maksimum yüke ulaştıktan sonra, CF2-C'nin deformasyon kabiliyeti neredeyse tamamen kaybolmuş ve ani göçme meydana gelmiştir. Bu nedenle III. bölgenin toplam enerji miktarına katkısı ihmal edilebilir düzeydedir.

TRM ile güçlendirilmiş yığma kirişlerde gerçekleştirilen eğilme testleri sonuçlarına göre, numunelerde güçlendirme katmanı, güçlendirme-tuğla arayüzeyi ve yığma kirişi oluşturan ana tuğla birimi olmak üzere üç ana odak noktasına yoğunlaşarak kırılma modları belirlenirmiştir. Deneyler sonucunda tespit edilen kırılma modları şu şekildedir: harç ve tekstilin ayrılması, güçlendirme yüzeyinde lineer çatlaklar, tekstilin kopması, basınç kırılması ve diyagonal çatlaklar, basınç ezilmesi, diyagonal kesme çatlağı, yığma biriminde kırılma, ve tuğla yüzeyinden ayrılma (Tablo 4). Güçlendirilmiş numunelerde bu kırılma tiplerinden biri ya da birkaçı gözlenmiştir.

Tablo 4 Yığma kiriş serilerinin kırılma modları

TRM	Yığma Kiriş Test Sonrası Görünüm	Gözlemlenen Hasarlar
GF1-L		➢ Harç ve tekstilin ayrışması ➢ Basınç ezilmesi
GF1-C		➢ Basınç kırılması + diyagonal çatlak ➢ Harç ve tekstilin ayrışması ➢ Yığma biriminde kırılma

TRM	Yığma Kiriş Test Sonrası Görünüm	Gözlemlenen Hasarlar
GF2-L		➢ Tuğla yüzeyden ayrılma ➢ Güçlendirme yüzeyinde çizgisel çatlaklar ➢ Basınç kırılması + diyagonal çatlak
GF2-C		➢ Tekstilin kopması ➢ Harç ve tekstilin ayrışması
BF-L		➢ Tekstilin kopması
BF-C		➢ Tekstilin kopması ➢ Yığma biriminde kırılma + diyagonal çatlak
CF1-L		➢ Harç ve tekstilin ayrışması ➢ Tuğla yüzeyden ayrılma ➢ Yığma biriminde kırılma + diyagonal çatlak

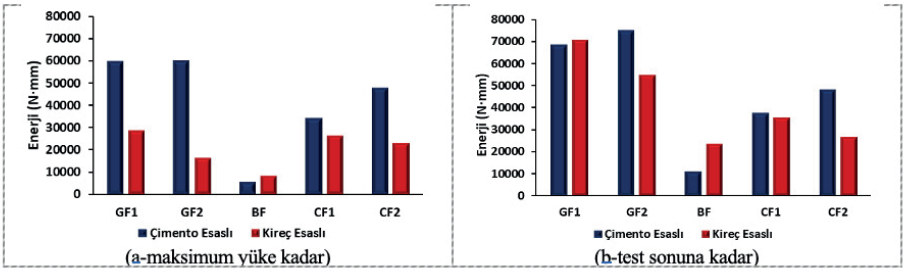
TRM	Yığma Kiriş Test Sonrası Görünüm	Gözlemlenen Hasarlar
CF1-C		➢ Harç ve tekstilin ayrışması ➢ Yığma biriminde kırılma + diyagonal çatlak
CF2-L		➢ Diyagonal kesme çatlağı ➢ Yığma biriminde kırılma
CF2-C		➢ Diyagonal kesme çatlağı ➢ Yığma biriminde kırılma

TRM ile güçlendirilmiş yığma kirişlerin yük-yer değiştirme eğrilerinin altında kalan alanlar hesaplanarak, numunelerin yuttuğu enerji miktarları belirlenmiştir. Maksimum yük (P_u) düzeyine kadar yutulan enerji miktarı (E_p), tüm tekstil takviyelerinin hidrolik kireç ve çimento esaslı harçlar ile kombinasyonları için Şekil 7a'da verilmiştir.

Yüksek bağlayıcılık özelliği nedeniyle, çimento esaslı harç ile güçlendirilmiş numuneler daha fazla enerji tüketmektedir. BF ile güçlendirme, her iki harç tipi için en düşük seviyededir. P_u 'ya kadar en fazla enerji tüketimi GF1-C, GF2-C olup, CF2-C, CF1-C serileri takip etmektedir. Kireçli serilerde sıralama GF1-L, CF1-L ve CF2-L şeklindedir.

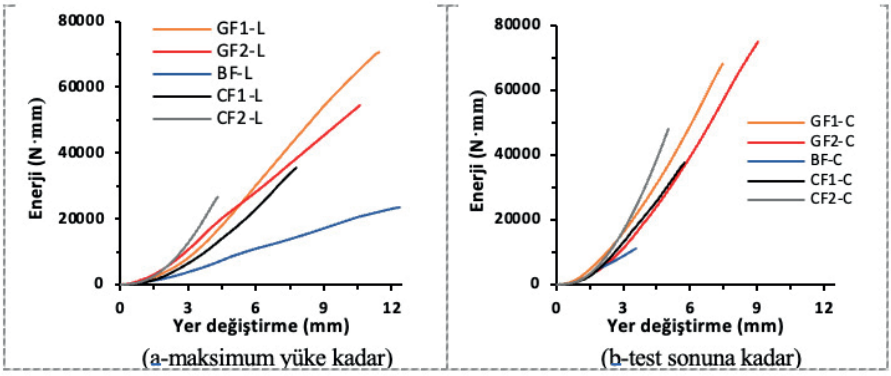
Test sonuna kadar yutulan enerji miktarları (E_u) açısından (Şekil 7b), P_u sonrası enerji tüketme kapasitesinde en büyük değişim kireç esaslı harçlarda görülmüştür. Şekil 7a'da E_{maks} düzeyleri arasındaki fark, P_u sonrası kireç esaslı harcın kullanıldığı numunelerin daha sünek davranışı nedeniyle azalmıştır. Ayrıca, GF1-L numunelerinin test sonuna kadar yuttuğu enerji miktarı GF1-

C'e göre daha fazladır. GF1 ve GF2 takviyeli kirişler hem kireç esaslı hem de çimento esaslı harçlarda en yüksek enerji kapasitesine ulaşmıştır; onları karbon esaslı tekstiller takip ederken, BF tekstilleri için her iki harç türünde de en düşük performansa sahiptir.



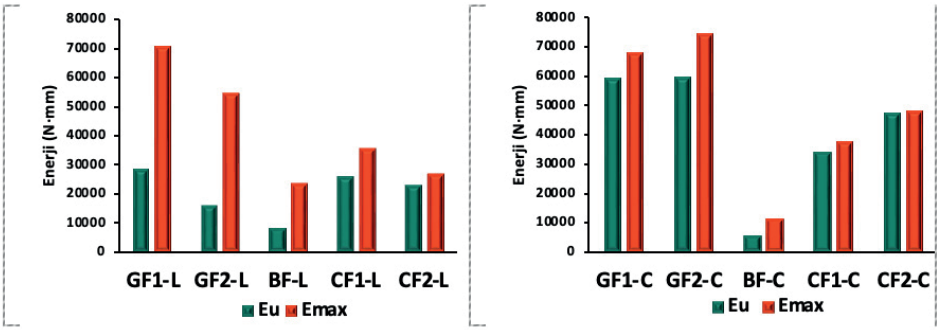
Şekil 7 Güçlendirilmiş kirişlerde tüketilen enerji miktarları

Güçlendirilmiş kirişlerde, artan yer değiştirmeye bağlı olarak toplam yutulan enerjinin kümülatif değişimi Şekil 8'de verilmiştir, böylece güçlendirme sistemleri aynı yer değiştirmeye karşı gelen enerji yutma miktarı bakımından karşılaştırılabilir. Buradan, yığma eleman tasarım kurallarına uygun bir yer değiştirme/şekil değiştirme düzeyi belirlendikten sonra, buna en uygun matris ve güçlendirme tekstili seçilebilir. Güçlendirme sistemlerinin hedef enerji seviyesine ne kadar yer değiştirme yaparak ulaştığı parametresi performans karşılaştırma kriteri olarak tercih edilebilir.



Şekil 8 Kümülatif enerji grafikleri

TRM ile güçlendirilmiş yığma kirişlerin, eğilme testlerinde maksimum yük ve test sonuna kadar tükettikleri maksimum enerji dağılımları Şekil 9'da verilmiştir. Bu iki kritik noktadaki fark, güçlendirmenin etkinliği ile ilgili bilgi vermektedir. Çimento esaslı numuneler, P_u sonrası sınırlı yer değiştirme yapmış ve enerji kapasitesindeki artış kireç esaslılara kıyasla sınırlı kalmıştır. Diğer taraftan, CF tekstillerinde P_u sonrası şekil değiştirme yeteneğinin diğer tekstillere göre daha az olduğu görülmektedir. GF tekstillerinde ise özellikle kireç esaslı harç kullanımında P_u sonrası şekil değiştirme yeteneğine bağlı olarak yutulan enerji miktarında önemli artış mevcuttur.



Şekil 9 Güçlendirilmiş yığma kirişlerde E_u , E_{maks} dağılımı.

4. Sonuç ve Değerlendirmeler

Tarihi yapıların güçlendirme uygulamalarında kullanılacak yöntemin ön deneylerle davranışının belirlenmesi şarttır. Güçlendirme sisteminin katkısı bütüncül bir sistematikle değerlendirildikten sonra uygulama aşamasına geçilmesi gerekir. Mevcut kumaş ve harç türü çeşitliliği, hedeflenen amaca uygun tasarım yapılmasına imkan verir. Ancak mevcut deneysel yöntemler uzun süreç ve büyük emek gerektirdiğinden güçlendirme uygulamalarına onay verme aşamasında kabul edilebilir bir sürede sonuç vermemektedir. Yapılan çalışmada yığma kirişler üzerinde yapılan eğilme testlerinin bu doğrultuda pratik ve gerçekçi katkısının olduğu düşünülmektedir.

Test sonuçları, TRM ile güçlendirmenin bileşenlere bağlı olarak; dayanım kapasitesindeki farklılıkları ve kompozit davranışının süneklik ***açısından*** farklı eğilimlerde olduğunu göstermektedir. Test sonuçlarına ve davranışların farklı yönlerine ilişkin yapılan analizlere dayanarak aşağıdaki değer-

lendirmeler yapılabilir. Bu çalışmanın esas amacı tekstil ya da harç türlerini birbiri ile yarıştırmak değildir. Temel amaç uygulanması söz konusu olan güçlendirme sisteminin hedeflenen kazanımları sağlayıp sağlamadığını önceden kestirebilmektir. Bu noktada tarihi yapıların güçlendirilmesinde bu sistemlerden beklenen performansın dayanım ve süneklik kriterlerine bağlı olarak sınırlarının belirlenmesi gerekir. Test edilen sistemlerin derecelendirmesi ancak bu şartla yapılabilir. Bu bağlamda aşağıdaki değerlendirmelerin genel-geçer sonuçlar olmadığı unutulmamalıdır.

- Çimento esaslı güçlendirmeler dayanım yönünden üstünlük sağlamış olsa da süneklik açısından doğal hidrolik kireç esaslı güçlendirmenin katkısının daha fazladır. Tarihi yapılar ile ilgili hassasiyetler gözönüne alındığında doğal hidrolik kireç kullanımının daha uygun olacağı söylenebilir.

- Tekstil malzemelerinin yapısında esas lif tipinin haricindeki bir çok değişken de TRM kompozitlerin performansında etkili olmaktadır. Özellikle kaplama türü ve miktarı güçlendirme sonrasındaki katkıyı etkilemiştir. Uygun kalınlıkta SBR kaplama, AR-cam ve karbon lifli TRM uygulamalarında enerji sönümleme ve süneklik açısından iyi performans sergilemiştir. Ayrıca kaplama miktarının optimum ayarlanması gereği de AR-cam esaslı güçlendirme sonuçlarından anlaşılır.

- GF2 ve CF1 tekstilleri, benzer göz açıklıklarına sahip ve her ikisi de SBR ile kaplanmıştır. NHL esaslı harç içinde, bu iki tekstil de benzer performans sergilemektedir. Ancak, çimento esaslı harçta, karbon lifli tekstil hem şekil değiştirme hem de yük seviyesi açısından öne çıkmaktadır. Bu durum, "güçlü harç-güçlü tekstil" veya "zayıf harç-zayıf tekstil" kullanımının tekstil-matris uyumu açısından gözönüne alınması gerektiğini gösterir.

- Püskürtme yöntemiyle tekstil yüzeyine eklenen mikro boyuttaki silis dumanı CF2 karbon tekstilinin matris ile arasındaki aderansı artırmıştır. Buna bağlı olarak diğer güçlendirme kombinasyonalarıyla karşılaştırıldığında en yüksek dayanım elde edilmiştir ancak, göçmeler ani ve gevrek moda geçmiştir. Bu nedenle silika dumanı, karbon lifler için umut verici olsa da, uzun dönem performansı göz önünde bulundurularak sünek davranışın gevrek davranışa dönüşebileceği gözönünde bulundurulmalıdır.

Kaynaklar

[1] A. Bilotta, F. Ceroni, E. Nigro, M. Pecce, Experimental tests on FRCM strengthening systems for tuff masonry elements, Constr. Build. Mater. 138 (2017) 114–133. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.124.

[2] A. Romanazzi, D. V Oliveira, R.A. Silva, A TRM-Based Compatible Strengthening Solution for Rammed Earth Heritage: Investigation of the Bond Behavior, Struct. Anal. Hist.Constr.18 (2019) 1594–1602.https://doi.org/10.1007/978-3-319-99441-3.

[3] Z.C. Girgin, M.T. Yıldırım, Usability of basalt fibres in fibre reinforced cement composites, Mater. Struct. 49 (2016) 3309–3319. https://doi.org/10.1617/s11527-015-0721-4.

[4] J. Donnini, V. Corinaldesi, A. Nanni, Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments, Compos. Part B Eng. 88 (2016) 220–228. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.11.012.

[5] F.G. Carozzi, A. Bellini, T. D'Antino, G. de Felice, F. Focacci, Ł. Hojdys, L. Laghi, E. Lanoye, F. Micelli, M. Panizza, C. Poggi, Experimental investigation of tensile and bond properties of Carbon-FRCM composites for strengthening masonry elements, Compos. Part B Eng. 128 (2017) 100–119. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.018.

[6] L. Ombres, N. Mancuso, S. Mazzuca, S. Verre, Bond between carbon fabric-reinforced cementitious matrix and masonry substrate, J. Mater. Civ. Eng. 31 (2019). https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002561.

[7] M.R. Valluzzi, F. da Porto, E. Garbin, M. Panizza, Out-of-plane behaviour of infill masonry panels strengthened with composite materials, Mater. Struct. Constr. 47 (2014) 2131–2145. https://doi.org/10.1617/s11527-014-0384-6.

[8] M. Harajli, H. ElKhatib, J.T. San-Jose, Static and Cyclic Out-of-Plane Response of Masonry Walls Strengthened Using Textile-Mortar System, J. Mater. Civ. Eng. 22 (2010) 1171–1180. https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000128.

[9] F.G. Carozzi, C. Poggi, Mechanical properties and debonding strength of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for masonry strengthening, Compos. Part B Eng. 70 (2015) 215–230. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.056.

[10] S. Babaeidarabad, F. De Caso, A. Nanni, Out-of-Plane Behavior of URM Walls Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Composite, J. Compos. Constr. 19 (2014) 04015072. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.

[11] A. Bellini, A. Incerti, M. Bovo, C. Mazzotti, Effectiveness of FRCM Reinfor-

cement Applied to Masonry Walls Subject to Axial Force and Out-Of-Plane Loads Evaluated by Experimental and Numerical Studies, Int. J. Archit. Herit. 12 (2018) 376–394. https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1323246.

[12] S. De Santis, G. de Felice, G.L. Di Noia, P. Meriggi, M. Volpe, Shake table tests on a masonry structure retrofitted with composite reinforced mortar, Key Eng. Mater. 817KEM(2019)342–349. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.817.342.

[13] S. De Santis, G. De Canio, G. de Felice, P. Meriggi, I. Roselli, Out-of-plane seismic retrofitting of masonry walls with Textile Reinforced Mortar composites, Springer Netherlands, 2019. https://doi.org/10.1007/s10518-019-00701-5.

[14] RILEM, State-of- the-art report RILEM TC 203-RHM Repair Mortars for Historic Masonry, 2016.

[15] BSEN, 1015-11 Methods of test for mortar for masonry - Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, (1999).

[16] ASTM, D6637 - Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Geogrids by the Single or Multi-Rib Tensile Method, i (2015) 1–6. https://doi.org/10.1520/D6637.

[17] ASTM, E518 - Standard Test Methods for Measurement of Masonry Flexural Bond Strength 1, (2016) 2–14. https://doi.org/10.1520/C1072-11.1.2.

BERGAMABEDESTENİ'NİNSTRÜKTÜREL ANALİZİ VE DEPREM PERFORMANSI

Hatice Ayşegül DEMİR[1], Mine HAMAMCIOĞLUTURAN[2], Kutay YÜCETÜRK[3], Engin AKTAŞ[4]

[1]Arş.Gör., İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, haticedemir@iyte.edu.tr
[2]Prof.Dr., İzmirYüksek Teknoloji Enstitüsü, mineturan@iyte.edu.tr
[3]İnş.Yük.Müh., İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, kutayyuceturk@iyte.edu.tr
[4]Prof.Dr., İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, enginaktas@iyte.edu.tr

Özet

Bu çalışma, Bergama Bedesteni'nin (15.-16. yy.) özgün yapısal özelliklerini belirlemeyi ve deprem yükleri için kapasitesini tanımlamayı amaçlamaktadır. Öncelikle yapının rölöve çalışması gerçekleştirilip yapım tekniği, strüktürel hasar ve yapısal değişim görsel analizleri yapılmıştır. Daha sonra ANSYS'te sonlu elemanlar modeli üretilmiştir. Statik analiz, modal analiz ve eşdeğer deprem yükü analizi gerçekleştirilmiştir. Sismik analiz aşamasında yapının bulunduğu konuma ait yatay elastik tasarım spekturumu verileri kullanılarak elde edilen ivme, x ve y yönleri için ayrı ayrı yapıya uygulanmıştır.Maksimumasal gerilmelerin limiti aştığı bölgeler hasar görebilir alanlar olarak tanımlanmış, bu kısımlardan mevcutta strüktürel hasar veya değişim bölgesinde olanlara müdahale önceliği ve ileri çalışmalar önerilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Strüktürel Analiz, Sismik Hasar Görebilirlik, Sonlu Elemanlar Modeli, ANSYS, Tarihi Yığma Yapı, Bergama Bedesteni.

Abstract

This studyaimstodeterminetheuniquestructuralfeaturesofBergama*Bedesten*(15th-16th centuries) and define its capacity for earthquakes. The measured survey was followed by visual analyses of the construction technique, structural failure and structural alteration. Then, the finite element model was generated in ANSYS. Static analysis, modal analysis and equivalent earthquake load analysis were implemented. The acceleration obtained by horizontal elastic designspectrumdataofthestructure'slocationwasappliedseparatelyfor x and y directions. Regions exceeding limit by maximum principal stresses are defined as vulnerable areas. Intervention priority and further studies are recommended for these parts.

Keywords: Structural Analysis, Seismic Vulnerability, Finite Element Model, ANSYS, Historic Masonry Structure, Bergama *Bedesten*.

1. Giriş

Tarihi yığma anıtsal yapılar, yapım teknikleri ve malzeme kullanımlarıyla özgün yapı tasarımlarına sahiptir. Bu nitelikleri, dikkatle korunması gereken miras değerlerine katkıda bulunmaktadır. Ancak bu yapılar tarih boyunca deprem yüklerinden etkilenmiştir veya hasar görme riski altındadır. Sismik yükler, yapıda hasarlara neden olan gerilme alanlarının değişmesinde etkili olmasına rağmen tarihi yığma yapılar statik yükler dikkate alınarak inşa edilmişlerdir [1]. Tarihi yığma yapıların depreme karşı duyarlılığı konusundaki farkındalığın artmasıyla birlikte bu binaların sismik aktiviteye karşı yapısal davranışlarının değerlendirilmesi önem kazanmıştır [2].

Yığma yapılarda sismik yük probleminin çözümü için öncelikle özgün yapısal özelliklerin anlaşılması gerekmektedir. Yapı malzemelerinin birleşim detayları ve yapı elemanlarının kesitlerindeki kalınlık değişiklikleri, sismik yüklere karşı yapısal dayanım/kırılganlık üzerinde etkilidir. Hasar görebilirliği artırabilecek mevcut yapısal hasarlar ve malzeme bozulmaları da incelenmelidir. Bina geçmişi ise özgün yapının hasar görebilirliğini etkileyebilecek yapısal bileşenlerdeki değişiklikler hakkında bilgi verebilir. Ortega vd. [3], Lizbon'daki Vila Real de Santo Antonio kent merkezindeki geleneksel binaların sismik hassasiyetini, binaların maruz kaldığı değişiklikleri dikkate alarak incelemiştir. Örnek çalışma alanında tespit edilen değişiklikler kütle ve açıklık ile ilgilidir. Özgün kütleyi değiştirecek şekilde katlar eklendiği saptanmış, cephede yeni pencere veya kapı açıldığı; mevcut açıklıkların genişletildiği belgelenmiştir. Bir duvardaki açıklık düzeninin değişmesi, üzerindeki yük aktarım yolunu değiştirdiğinden bu durum yapısal güvenlik açığı yaratabilmektedir. Örneğin, incelenen yapılardan birinde açıklıkların genişletilmesi yapının genel hasar görebilirliğinin artmasına neden olmuştur.

İncelenen yapının tüm nitelikleriyle bütünsel olarak anlaşılmasının ardından yapısal değerlendirme sonuçları, hasar görebilir alanlar, mevcut hasarlar ve değişimler aralarında ilişkiler kurularak daha anlamlı bir şekilde değerlendirilebilir. Tarihi yığma yapıların sismik hasar görebilirlik değerlendirmesi gelişmekte olan bir araştırma alanıdır ve farklı projeler bu değerlendirme süreci için değerlendirme kılavuzları oluşturmaya çalışmaktadır. PERPETUATE projesi, kültürel miras niteliğindeki yığma yapıların sismik performansa dayalı değerlendirmesi için kılavuzlar sunmuştur. Bu kapsamda anıtsal yığma binaların hasar görebilirliğini değerlendirmek için yapıların doğru mo-

dellerine sahip olunması vurgulanmakta ve farklı tipolojik sınıflandırmalara sahip anıtlar için farklı modelleme stratejileri ifade edilmektedir [4]. Stand-4Heritage projesi de mimari mirasın sismik değerlendirmesi için yeni standartların belirlenmesine odaklanmaktadır. Sismik yüklerin yığma yapıların düzlem dışı sismik davranışı ve kapasitesine etkisini ve bu yapıların gerçek dinamik davranışının deneysel olarak belirlenmesini, sayısal ve analitik modelleme araçlarını da kullanarak ele alan, birbiriyle bağlantılı dört farklı iş paketi vardır. Tüm bu öncü çalışmalarda yığma tarihi yapılara müdahale için bir standart sunmak amaçlanmaktadır [5].

Yığma yapıların sismik hasar görebilirlik değerlendirmesi için sonlu elemanlar yöntemi, model yaklaşımında, harç ve tuğla, taş vb. yığma malzeme homojen olarak modellenir. Basitleştirilmiş mikro modelde, harç tabakası kalınlığı, taş, tuğla vb. malzeme üstüne eklenir ve her blok arasında bir arayüz tanımlanır. Mikro modelde harç ve tuğla, taş vb. gerçekte olduğu gibi ayrı ayrı modellenir [6]. Mikro model yapısal davranışı daha iyi yansıtır, ancak makro ve basitleştirilmiş mikro model stratejilerine göre daha karmaşık ve analizi güç bir model oluşturur. Makro model genel olarak yapıların bütüncül davranışlarının değerlendirilmesi için kullanılmaktadır. Şen [7] tarihi bir sinagog üzerinde doğrusal elastik analiz yapmak için SAP2000 yazılımında üretilen üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ve makro model yaklaşımından yararlanmıştır. Kesme taş pencere sövelerinin büyük duvar açıklıklarında yer değiştirmeyi azalttığı ve sağlamlığı arttırdığı, böylelikle yapım tekniğinin hasar görebilirliğin azalmasına katkı koyduğu ortaya çıkarılmıştır. Taliercio vd. [8], İtalya'nın Ravenna kentindeki San Vitale Bizans Bazilikası'nın sonlu elemanlar makro modelini oluşturmuştur. Geometrik modelin karmaşıklığından dolayı analizi gerçekleştirmek için doğrusal elastik izotropik analiz yöntemi tercih edilmiştir. Yapılan analizlerle yapının genel strüktürel davranışı ortaya konmuştur. Barbieri vd. [9], mevcut durumun sonlu elemanlar makro modellemesinden sonra bazı güçlendirme kararlarıyla Palazzo del Capitano'nun kutu benzeri davranışını geri kazandırmaya çalışmıştır. Yapılan müdahalelerin etkililiği başka bir sonlu elemanlar modeliyle analiz edilmiştir.

İncelenen literatürde inşaat mühendislerinin tarihi binaların yapısal değerlendirmesi üzerinde çalıştıkları sıklıkla görülmektedir. Öte yandan, yapının özgünlüğünün ve bütünlüğünün anlaşılması, olası hasar nedeninin değerlendirilmesi ve müdahalelerin planlanması için tarihi yapım tekniklerinin ve malzemelerinin görsel analizi bir gerekliliktir. Bu görsel çalışma genel

olarak koruma uzmanı mimarlar tarafından yürütülmektedir. Oysa mimari mirasın yapısal koruma sorunlarının koruma uzmanı mimarlar ve inşaat mühendislerinin işbirliğiyle çözülmesi gerekmektedir ve mimari korumanın yapısal boyutu disiplinler arası bir araştırma alanıdır. Anıtsal yığma binaların tarihi yapım teknikleri, yapısal hasar ve değişiklikleri ile sismik hasar görebilirlik analizi sonuçları birlikte değerlendirilerek bütüncül ve farklı disiplinlerin fikirlerini göz önünde bulunduran bir yaklaşım geliştirilebilir.

Bu çalışmanın amacı, sismik açıdan aktif bir bölge olan İzmir'in Bergama ilçesindeki Bedestenin (15.-16. yy.) yapım tekniğini, malzeme kullanımını, yapısal hasarlarını, malzeme bozulmalarını ve yapı elemanlarındaki değişimleri görsel olarak analiz etmek; yığma binanın yapısal analizini yapmak; görsel ve yapısal analiz sonuçlarını karşılaştırmak; bütüncül bir bakış açısıyla müdahale önceliklerini ve ileri mühendislik çalışması gerekliliklerini belirlemektir.

2. Yöntem

Çalışmanın metodolojisi, yapının teodolit ölçümü ile geometrik belgelemesinin yapılması, yapım tekniklerinin belirlenmesi, mevcut yapısal hasarların ve yapısal değişikliklerin tespitine yönelik görsel incelemeler ve sismik hasar görebilirlik için sonlu elemanlar yönteminden yararlanan makro model stratejisinin uygulanması olarak planlanmıştır.

Dolayısıyla bu çalışma, saha ve bina bilgisi araştırması ve yapısal değerlendirme olmak üzere iki temel aşamaya dayanmaktadır.

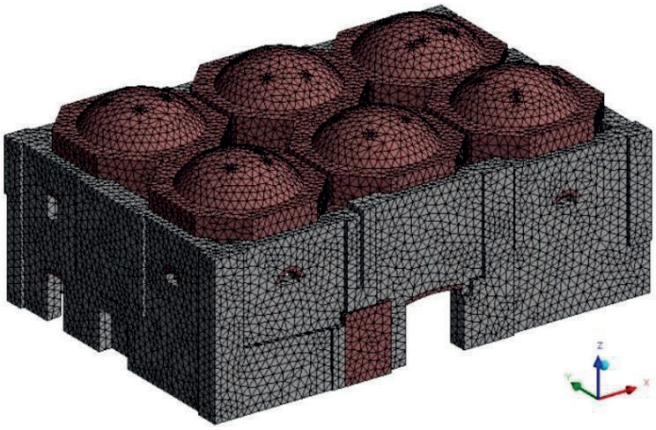
Öncelikle alan ve kütle özellikleri belirlenmiştir. Yapı fotoğrafla belgelenmiş, rölöve çalışmaları takeometrik yöntemle gerçekleştirilmiştir. Yapıda gözlenen hasarlar eskizlere işlenmiştir. Binanın ölçekli çizimleri Autocad programında hazırlanmış ve mekânsal, yapısal özellikleri, yapısal hasar ve malzeme bozulmaları haritalanmıştır. Gözlemlenen hasarlar rölöve çizimleri üzerine işlenmiştir.

Bergama Bedesteninin sismik hasar görebilirliğinin belirlenmesine yönelik uygun bir yöntemin seçilmesi amacıyla tarihi yığma yapıların sismik hasar görebilirlik değerlendirmesi üzerine bir literatür taraması yapılmıştır. Anıtsal yığma yapının sismik davranışının değerlendirilmesi için sonlu elemanlar yönteminden yararlanılan makro model yaklaşımı tercih edilmiştir. Daha sonra ilk olarak Bergama Bedesteni'nin sonlu elemanlar analizi için üç boyutlu makro modeli, ANSYS yazılımında rölöve çizimleri kullanılarak üretilmiştir. Modele yapısal değişiklikler dahil edilirken yapısal hasarlar ve çevresini saran sonradan eklenmiş dükkan kütleleri kapsam dışı bırakılmıştır. Model zemin ilişkisi olarak sabit mesnet tercih edilmiştir. Makro model sırasında harç ile taş ve tuğla malzemeler kompozit olarak kabul edilmiştir. Yapının farklı malzeme kullanımına sahip kısımları farklı bileşenler olarak tanımlanmış ve toplam 27 adet bileşen oluşturulmuştur. 0,4 m›lik ortalama değere sahip tetrahedron ağ modele uygulanmıştır.

Malzeme parametreleri, Türkiye Cumhuriyeti Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan "Tarihi Yapılarda Deprem Risklerinin Yönetimi" kılavuzundan seçilmiştir (Tablo 1). Bu tablodan kaba yonu taş yığma duvar ve kireç harçlı tuğla yığma duvar için en düşük değerler seçilmiş ve makro modeldeki ilgili bileşenlere atanmıştır (Şekil 1).

Tablo 1- Tarihi Yapılarda Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzundan seçilen malzeme parametreleri [12]

Duvar Türü	Basınç dayanımı f_m (MPa)	Kayma Dayanımı T_0 (kPa)	Elastisite Modülü E (MPa)	Kayma Modülü G (MPa)	Birim Hacim Ağırlığı w (kN/m^3)
Kaba yonu taş yığma duvar	1.1 ~1.6	35 ~51	1020~1440	170 ~240	20
Kireç harçlı tuğla yığma duvar	1.8 ~2.8	60 ~92	1800 ~2400	300 ~400	18



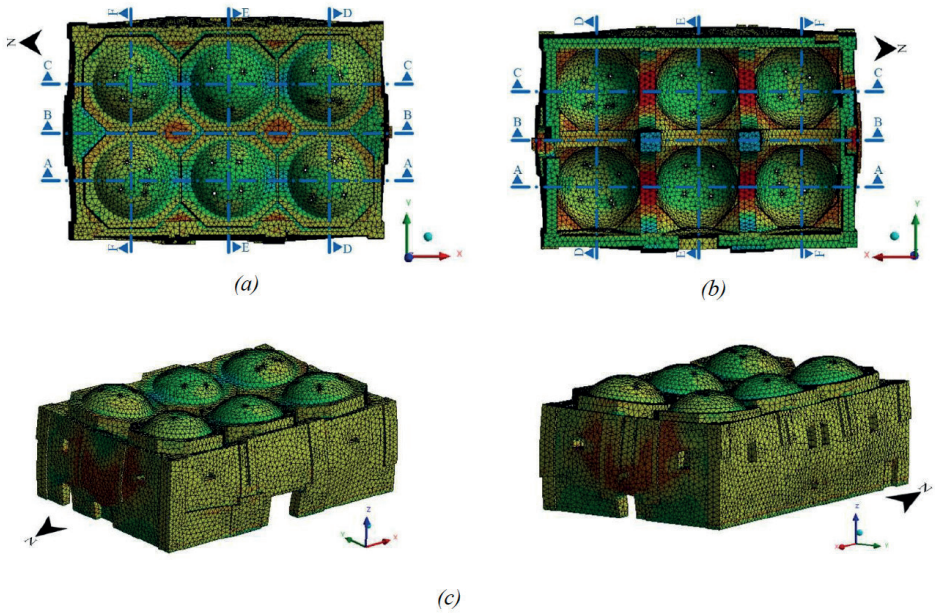
Şekil 1- Bergama Bedesteni'nin sonlu elemanlar modeli

Malzemelerin çekme dayanımı, basınç dayanımının %10'u olarak alınmıştır [13]: Kaba yonu taşlı yığma duvar ve kireç harçlı tuğla yığma duvarlar için çekme dayanım değerleri sırasıyla 0,11 ve 0,18 MPa olarak kabul edilmektedir. Yoğunluk değerleri birim hacim ağırlığı bilgisi kullanılarak hesaplanmıştır. 1 kN = 101,97 kg. olduğu için, kaba yonu taş ve tuğla duvar için yoğunluk değerleri aşağıdaki denklem 1 ve denklem 2 ile sırasıyla hesaplanmıştır.

$$20 \times 101.97 = 2039 \text{ kg/m}^3 \quad (1)$$

$$18 \times 101.97 = 1835 \text{ kg/m}^3 \quad (2)$$

Hem kaba yonu taş, hem de tuğla duvar için Poissons oranı 0,17 olarak alınmıştır [13]. Yapının dış ve iç yüzeylerindeki gerilme dağılımı; modellerden üretilen çatı planı, tavan planı, kesitler, aksonometrik kütle gösterimleri ve aksonometrik kesitler üzerinde sunulmuştur (Şekil 2).



Şekil 2- Çatı planı (a) ve tavan planında (b) kesit konumları; sitatik yükler altında aksonometrik kütle gösterimlerinde kuzey yönelimi (c)

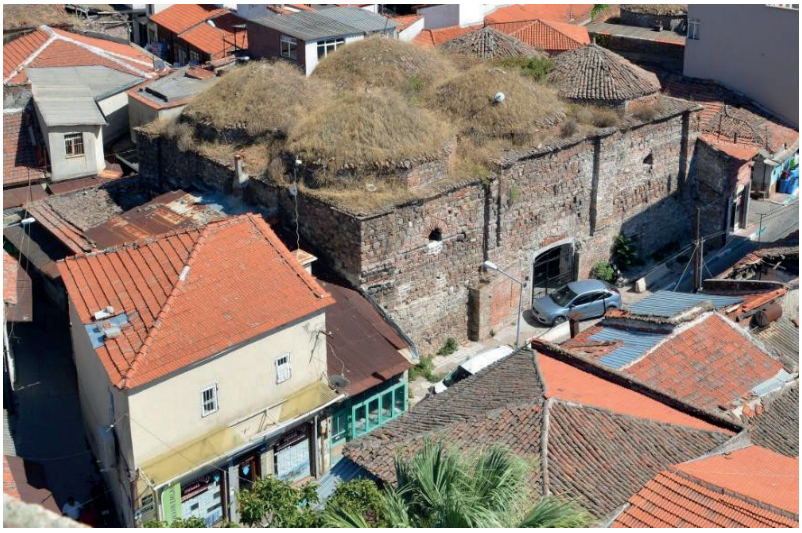
Yapının z ekseni doğrultusunda deformasyonu, x, y ve z eksenlerindeki normal gerilmeleri, kayma gerilmesi, kendi ağırlığı altında maksimum ve minimum asal gerilmeleri tespit etmek için lineer elastik statik yapısal analizler uygulanmıştır. Yapının dinamik davranışını ortaya koymak için modal analiz yapılmıştır. Bu analiz ile daha sonraki sismik analizlerde kullanılacak x ve y yönleri için frekans ve periyot değerleri bulunmuştur. Bergama Bedesteni arazisi için yatay elastik tasarım spektrumu, Türkiye Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı'nın (AFAD) sismik tehlike haritaları interaktif web uygulamasından rapor olarak alınmıştır. Eşdeğer deprem yükü analizinde kullanılacak yatay ivme; periyot ve yatay elastik tasarım spektrum verileri kullanılarak hesaplanmıştır.

Elde edilen yatay ivme değeri +x ve +y yönlerinde uygulanmıştır. Her iki yönde uygulanan yanal yüklemelerde x ve y eksenleri doğrultusunda deformasyon, x, y ve z eksenlerindeki normal gerilmeler, kayma gerilmesi, maksimum ve minimum asal gerilmeler değerlendirilmiştir. Sismik açıdan hasar görebilir kısımlar, yapıdaki maksimum asal gerilmeler için malzeme-

lerin çekme dayanım sınır değerlerini aşan bölgeler olarak tanımlanmıştır. Yapısal sismik hasar görebilirlik analizlerinin sonuçları, yapısal hasarların ve değişikliklerin görsel analiz sonuçlarıyla karşılaştırılarak, hasarların ve değişikliğe uğramış kısımların gelecekteki depremlerden etkilenebilecek hasar görebilir bölgelerde olup olmadığı tespit edilmiştir. Son adım olarak izleme ve müdahale kararları, ileri mühendislik hesapları gereklilikleri mimari koruma ve yapı mühendisliği alanlarının bakış açılarıyla planlanmıştır.

3. Bergama Bedesteni'nin Özellikleri

Bergama Bedesteni, İzmir›in kuzeyinde yer almaktadır. Bergama›nın UNESCO Dünya Miras Alanı sınırları içerisinde tarihi ticaret merkezinde bulunmaktadır [14]. Yakın çevresi çoğunlukla dükkanlar, çeşitli anıtsal yapılar ve birkaç konut binasından oluşan yoğun dokulu bir alandır. Kuzey, doğu ve güney cephelerini çevreleyen bitişik nizamdaki dükkânlar sonradan eklenmiştir. Dolayısıyla özgün bedesten kütlesi ile mevcut dükkanlar arasında yapısal bir bütünlük yoktur (Şekil 3).



Şekil 3- Yakın çevresi ile birlikte Bergama Bedesteni

Bergama Bedesteni, sırasıyla kasnak, düzlem üçgenler, kemerler, yığma duvarlar ve payeler üzerine oturan altı bitişik kubbe ile örtülü tek bir mekandan oluşmaktadır. Bu tek hacimli hol alanı anıtsal bir ölçeğe sahiptir ve cep-

helerdeki tepe pencerelerinden ve kubbelerdeki fil gözlerinden sınırlı ışık almaktadır (Şekil 4). Dört cephesinin ortasında dört ana giriş kapısı bulunmaktadır. Kuzey ve güney giriş kapıları yarım daire kemer, doğu giriş kapısı sivri kemer, batı giriş kapısı ise basık kemer profiline sahiptir. Batı giriş kapısı dışında ana giriş kapıları mevcut durumda taş dolgu ile kapatılmıştır.



(a) *b)*

Şekil 4- Bergama Bedesteni'nin iç mekanı (a), kubbedeki fil gözleri (b)

Bergama Bedesteni 15.-16. yüzyıllarda inşa edilmiş olmasına rağmen geçiş elemanı olarak düzlem üçgenlere sahiptir. Daha erken dönem anıtlarında yaygın olan bu eleman tipinin kullanımı [15], yapıya enderlik değeri katmaktadır. Kubbe altındaki sekizgen profil 55 cm. yüksekliğinde olup yükünü düzlem üçgenlere ve kemerlere aktarmaktadır (Şekil 5).



Şekil 5- Bergama Bedesteni'nin düzlem üçgenleri ve profil kısmı

Taşıyıcı sistem kapasitesinin arttırılmasına yönelik olarak farklı yapısal tasarım yaklaşımları uygulanmıştır. Kuzey ve güney cephelerde, kubbe yüklerini alan giriş kapıları üzerindeki kemerler yapısal zayıflık yaratma potansiyeli taşımaktadır. Ancak duvar kesitinin bu bölümlerde kalınlaştırılmasıyla yapısal dayanım arttırılmaya çalışılmıştır. Ayrıca kemerlerin taşıyıcı duvarlara oturduğu kısımlarda da kesit kalınlaştırılarak paye etkisi yaratılmıştır (Şekil 6).

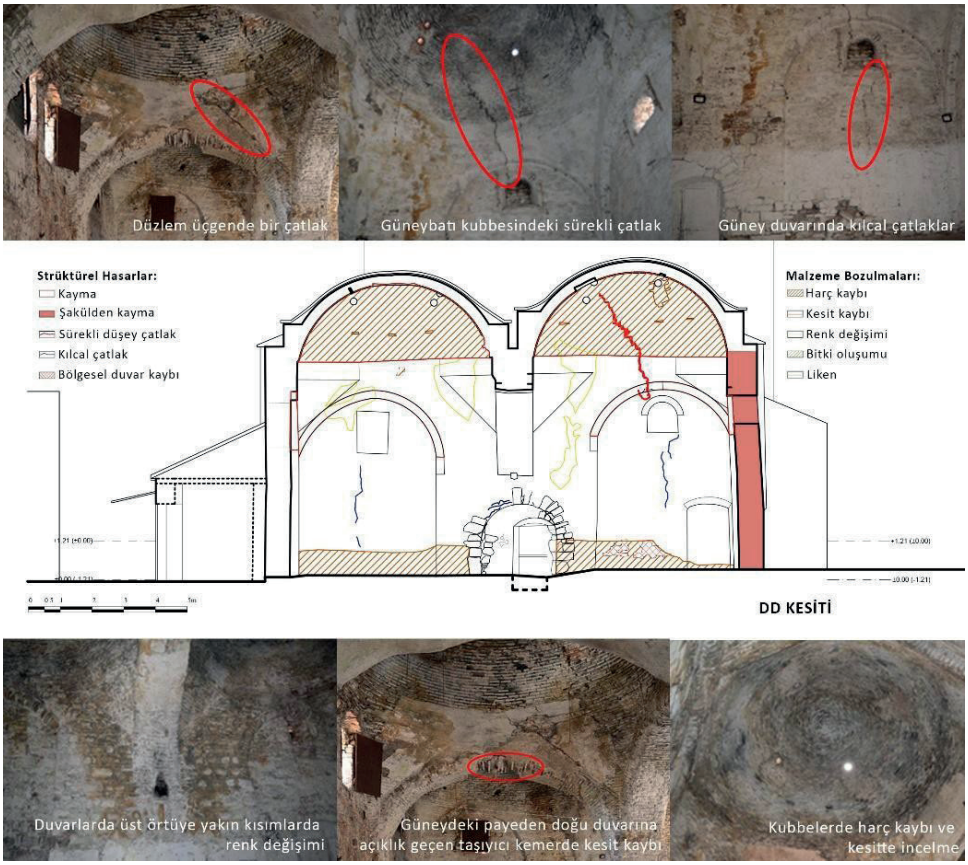


(a) *(b)*

Şekil 6- Güney ana giriş kapısı etrafında duvar kalınlaştırma uygulaması (a), batı duvarında kemerin oturduğu bölümde paye gibi kalınlaştırılmış duvar örneği(b)

Strüktürel hasar olarak yapının tüm kubbe ve kemerlerinde kaymalar görülmektedir. Batı cephe duvarının güney kesiminde 3.4°'lik bir açıyla şakülden kayma, yapılan rölöve ölçümü sonucunda tespit edilmiştir. Güneybatı köşe kubbesinde düşeyde sürekli çatlaklar bulunmaktadır. Batı doğu aksında ortada yer alan kubbelerden doğuya yakın olanını taşıyan bir düzlem üçgende de sürekli dikey çatlak gözlenmiştir. Bu hasar türlerinin olası nedeni sismik harekettir. Güney duvar ile doğu ve batı duvarlarının güney kısımlarında kılcal çatlaklar görülmektedir. Bazı düzlem üçgenlerde de kılcal çatlaklar bulunur. Güney cephede duvarda kısmi kayıp, batı cephede ise kalınlaştırılmış duvar bölümlerinde alt kısımlarda kısmi kayıplar görülmektedir. Malzeme bozulmaları olarak tüm kubbelerde ve içte duvar alt kotlarında yerden yükselen nemden kaynaklanan harç kaybı görülmektedir. Güneydeki paye ile doğu duvarı arasında uzanan taşıyıcı kemerde kesit kaybı mevcuttur. Yağ-

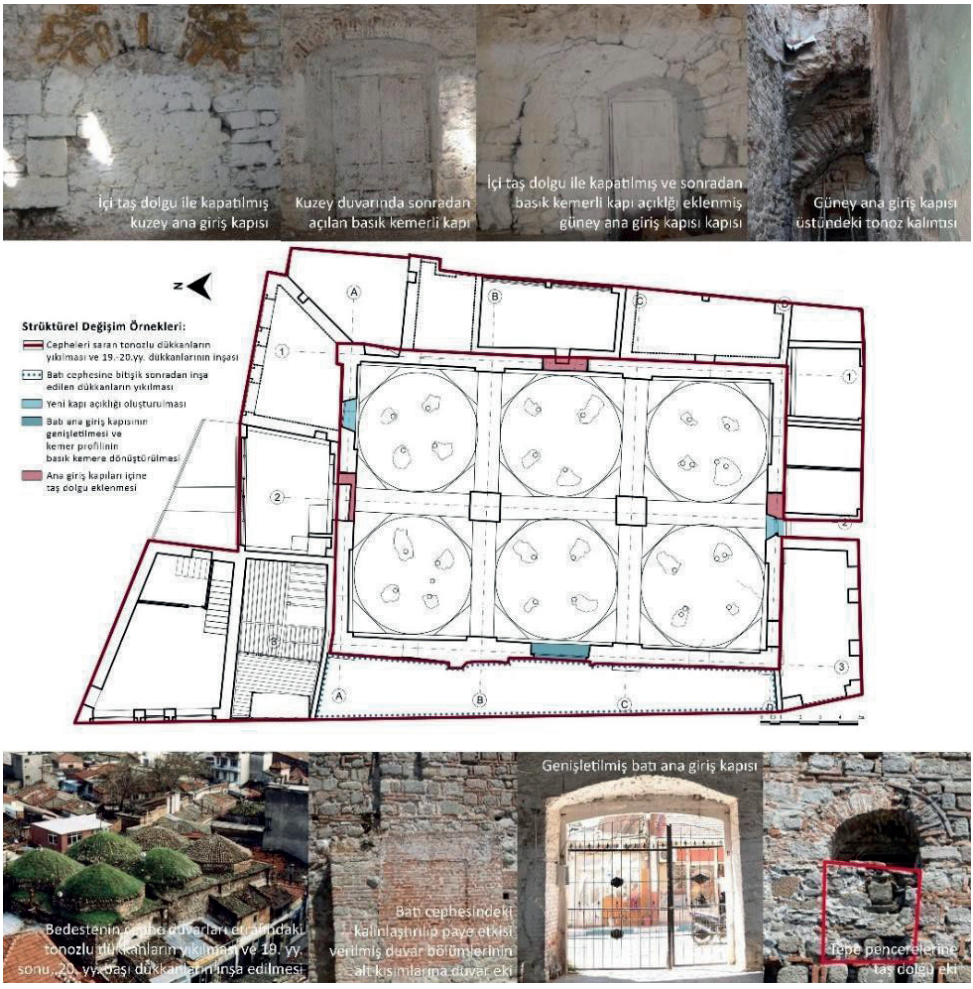
mur nüfuzunun neden olduğu renk değişikliği üstyapıda ve ona yakın duvar kısımlarında yoğundur. Kubbelerde bitki oluşumları vardır. Bazı kemerlerde yüksek nem nedeniyle liken oluşumu gözlenmiştir (Şekil 7).



Şekil 7- Bergama Bedesteni DD kesitinde gösterilen strüktürel hasar ve malzeme bozulması örnekleri

Bedestenin yapısal değişiklikleri, kütlesel ölçekte dış cepheleri çevreleyen özgün tonozlu dükkânların yıkılması, geç Osmanlı Dönemi basık kemer açıklıklı dükkânların ve 20. yüzyıl başlarında yığma duvarlı, metal kepenkli veya vitrinli dükkânların eklenmesi, batı cephesi önüne yeni eklenen dükkânların ise sonradan yıkılmasıdır. Batı giriş kapısının her iki yanındaki kalınlaştırılmış duvar bölümlerinin yıkılan kısımlarının altına kısmi duvar eklemeleri yapılmıştır. Kuzey, doğu ve güney ana giriş kapı açıklıkları yığma taş ile doldurulup kapatılmıştır. Batı giriş kapısı genişletilmiş ve kemer profili yarım daire veya sivri kemerden, basık kemer profiline dönüştürülmüş-

tür. Güney ana giriş kapısı dolgusunun bir kısmı kaldırılıp ana giriş kapısı içinde, basık kemerli küçük bir kapı açıklığı oluşturulmuştur. Duvarlardaki bazı tepe pencereleri yığma taş malzeme ile yarı yüksekliklerine kadar kapatılmıştır. Taşıyıcı kemerleri birbirine ve cephe duvarlarına bağlayan ahşap bağlar kaldırılmıştır (Şekil 8).



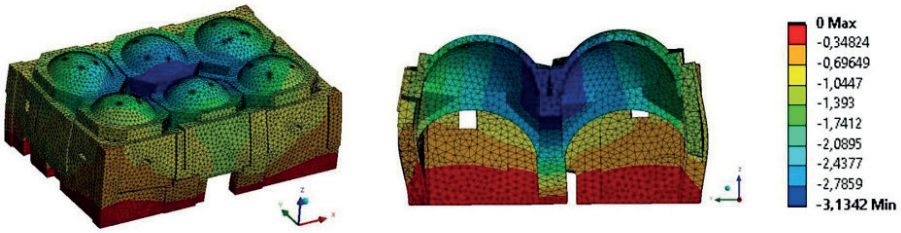
Şekil 8- Bergama Bedesteni strüktürel değişimleri ve tavan planında gösterimleri

4. Strüktürel Analiz Sonuçları

Lineer elastik statik analiz, modal analiz ve eşdeğer deprem yükü analizi sonuçları açıklanmıştır.

4.1. Statik Analiz

Yapının kendi ağırlığından dolayı z eksenindeki deformasyonu orta kubbelerde, kasnaklarda ve kemerde yoğunlaşmıştır. Maksimum deformasyon değeri 3 mm. dir (Şekil 9).

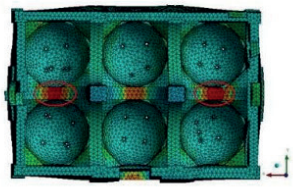
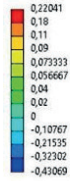
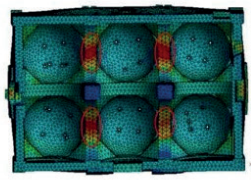
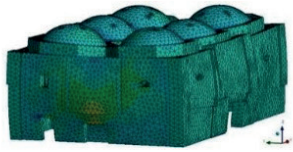
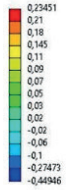
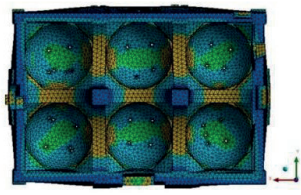
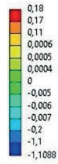


(a) *(b)*

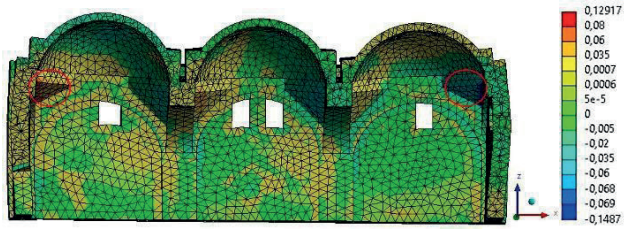
Şekil 9- Üstörtüde (a), ve ortadaki kubbelerden geçen EE kesitinde (b) maksimum deformasyon değerleri

Yapının x, y ve z eksenleri için normal gerilme analizi yapılmıştır. X, y ve z eksenleri için en yüksek çekme gerilmeleri, payeler ve duvarlar arasında uzanan taşıyıcı kemerlerde görülür. Değerler, işaretli kemerlerde x ve y eksenleri için tuğla yığma duvarın çekme mukavemetini (0,18 MPa) aşarken, z ekseninde sınırın altındadır. Duvarlarda x, y ve z eksenleri için kemer duvar birleşim seviyelerinde ve üst pencerelerin çevresinde çekme alanları yoğunlaşmıştır, ancak değerler sınırın altındadır (Tablo 2).

Tablo 2- Yapının kendi ağırlığı altında x, y ve z eksenlerindeki normal gerilme dağılımları

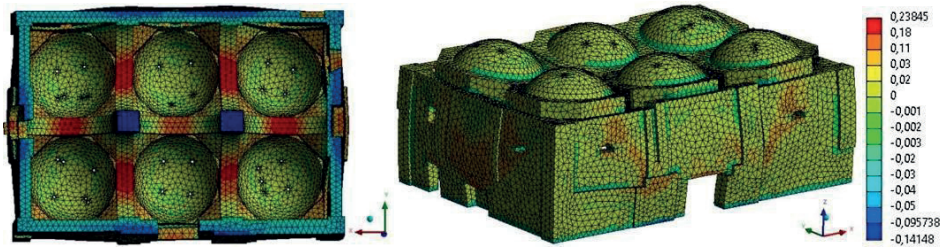
Eksenler	Tavanda normal gerilme dağılımları	Duvarlarda normal gerilme dağılımları	Gerilme Değerleri (MPa)
X Ekseni			
Y Ekseni			
Z Ekseni			

Kubbelerde, profillerde ve taşıyıcı duvarlarda maksimum kayma gerilmesi değeri 0,02 MPa' dır. Bu değer taş (0,035 MPa) ve tuğla (0,06 MPa) duvarlar için kesme dayanımı sınırının altındadır. Şekil 10'da gösterildiği gibi duvarların kesişen köşelerinde bulunan köşe düzlem üçgen geçiş elemanlarında kayma gerilmesi değerleri, tuğla duvarın kayma dayanımından (0,06 MPa) daha yüksektir.



Şekil 10- CC kesitinde kayma gerilimi limit değeri aşan kuzeydoğu ve güneydoğu düzlem üçgenleri

Çekme sınırını (0,18 MPa) aşan maksimum asal gerilme değerleri, taşıyıcı kemerlerin kilit taşı seviyelerinde görülmektedir. Yine kemer duvar bütünleşme seviyelerinde ve tepe pencere çevresinde çekme alanları görülmektedir, ancak buradaki değerler sınır değerin altındadır (Şekil 11). Tüm minimum asal gerilme değerleri taş ve tuğla duvar basınç dayanım limit değerlerinin altındadır.



(a) *(b)*

Şekil 11- Kilit taşı çevresinde çekme dayanım değerini aşan maksimum asal gerilme yoğunlaşmaları, tavan planı (a), limit altında maksimum asal gerilme yoğunlaşma bölgeleri olarak kemer-duvar birleşim seviyeleri ve tepe pencere çevreleri, aksonometrik kütle gösterimi (b)

4.2. Modal Analiz

Yapının dinamik özelliklerini ortaya çıkarmak için modal analiz yapılmıştır. Bu analiz türü binanın doğal titreşim frekanslarını göstererek yapıya zarar verebilecek olası rezonans titreşimleri hakkında bilgi sağlar [16]. İlk iki mod için x, y, z yönlerinde ve x, y, z eksenleri için burulma yönünde frekans, periyot, etkin kütlenin toplam kütleye oranı Tablo 3' te gösterilmektedir. Bu tabloda görüldüğü gibi en yüksek etkin kütlenin toplam kütleye oranı 1. mod için y yönünde, 2. mod için x yönündedir.

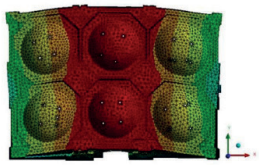
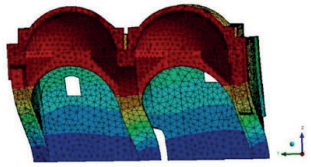
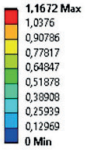
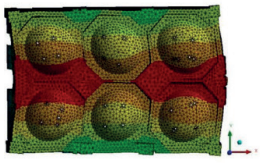
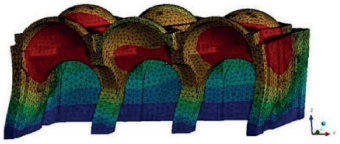
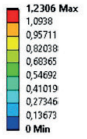
Tablo3.Frekans,periyot,veetkinkütle/toplamkütleoranları

Mod No.	Frekans (Hz)	Periyot (s.)	Etkin kütle/ Toplamkütle (x yönü)	Etkinkütle/ Toplam kütle (yyönü)	Etkinkütle/ Toplam kütle (zyönü)	Etkin kütle/ Toplamkütle (x- burulma)	Etkin kütle/ Toplamkütle (y- burulma)	Etkin kütle/ Toplamkütle (z- burulma)
1	4.4222	0.226	8.7656e-04	0.7377	1.789e-04	0.64098	3.7746e-04	0.72207
2	5.8374	0.171	0.76704	1.1325e-03	4.3906e-08	8.3259e-04	2.5596e-02	9.1164e-03

1. mod için maksimum deformasyon şekli, y eksenindeki orta kubbelerde,

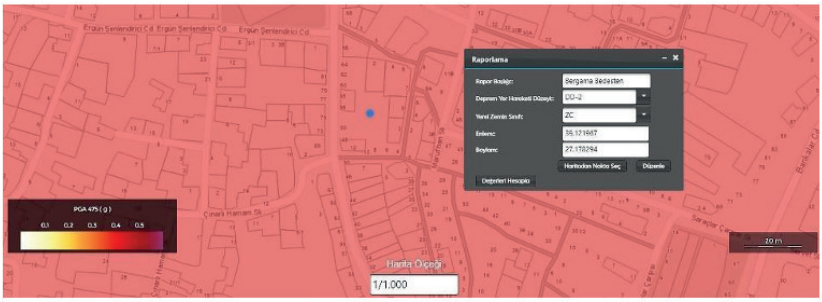
bu kubbelerin altındaki taşıyıcı kemerlerde, düzlem üçgenlerde ve profil kısımlarında, batı ve doğu cephe duvarlarında orta yükseklikten itibaren görülmektedir. 2. mod için maksimum x yönünde orta eksende elastik deformasyon görülmektedir. Yük taşıyan üç kemer ve geçiş bölgesi, oldukça deforme olmuş bir başka bölgeyi oluşturur (Tablo 4). Birbirine dik yönlerdeki bu ilk iki mod, eşdeğer deprem yükü analizi için kullanılacaktır.

Tablo 4- Y ve x yönlerindeki ilk iki mod şekli

Mod	Çatı planı	Aksonometrik kesit	Toplam deformasyon (mm)
1.mod			
2.mod			

4.3. Bergama Bedesteni Arazisi için Yatay Elastik Tasarım Spektrumu ve Eşdeğer Deprem Yükü Analizi

Eşdeğer deprem yükü analizi için Bergama Bedesteni arazisine ait yatay elastik tasarım spektrum bilgileri Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı'nın [17] hazırladığı sismik tehlike haritaları interaktif web sitesinden rapor olarak alınmıştır. Sismik yer hareketi seviyesi, 50 yılda aşılma olasılığının %10 olduğunu ve 475 yıllık tekrarlanma periyodunu ifade eden DD-2 olarak seçilmiştir. Yerel toprak sınıfı ZC olarak alınmıştır (Şekil 12). Bu bilgi bedestene 215 m. mesafede bulunan bir arazinin zemin ve temel etüt raporundan öğrenilmiştir [18]. ZC sınıfı çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar olarak tanımlanmaktadır [19].



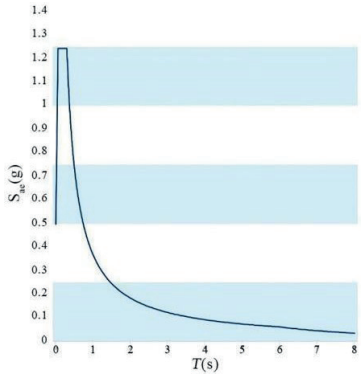
Şekil 12- Bergama Bedesteni arazisi için alınan parametreler [19]

AFAD raporuna göre en yüksek yer ivmesi (PGA) 0,433 g'dır. Bergama Bedesteni için en yüksek yer hızı (PGV) ise 24.653 cm/s'dir. Yatay elastik tasarım spektrumu bilgileri tablo 5'te listelenmiştir.

Tablo 5- Bergama Bedesteni arazisi için yatay elastik tasarım spektrumu bilgisi [19]

Elastik tasarım spektrumu bilgisi	
SS : Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı (boyutsuz) = 1.035	
S_1 : 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı (boyutsuz)= 0.244	
S_{DS} : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (boyutsuz) = 1.242	
S_{D1} : 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı (boyutsuz)= 0.366	
T_A= 0.059 s.	T_B= 0.295 s.

Bergama Bedesteni arazisi için yatay elastik tasarım spektrum grafiği, eşdeğer deprem yükü analizinde parametre olarak kullanılacak TA ve TB periyotlarına karşılık gelen SDS ve SD1 değerlerini göstermektedir (Şekil 13).



Şekil 13- Bergama Bedesteni için yatay elastik tasarım spektrumu grafiği [19]

Yapıyı ortogonal x ve y yönlerinde etkileyebilecek depremler için eşdeğer deprem yükü yöntemi uygulanmalıdır. Her yön için etkinin ayrı ayrı incelenmesi gerekmektedir [17]. Eşdeğer deprem yükünü hesaplamak için Bergama Bedesteni' nin x ve y doğrultularındaki modlarının periyotları kullanılmıştır. 1. mod y yönünde olup 4,4222 Hz frekans değerine sahiptir. 2. mod x yönünde olup frekansı 5.8374 Hz'dir. Bu ilk iki modun periyotları aşağıdaki denklem 3 ile hesaplanmıştır.

1 / Frekans (f) = Periyot (T) (3)

1. modun periyodu 0,226 saniyedir. 2. modun periyodu ise 0,171 s'dir. Doğal titreşim periyodu (T), TA ve TB değerleri arasında olduğunda, yer çekimi ivmesi ile tanımlanan yatay elastik tasarım spektral ivmesi Sae(T), kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı SDS'ye eşittir [17]. Bedestenin ilk iki periyodu da TA=0.059 s. ve TB=0,295 s. arasındadır. Buna göre Sae(T) = SDS = 1,242 olmaktadır.

Yatay deprem yükü altında azaltılmış tasarım spektral ivmesi SaR(T) aşağıdaki denklem 4 ile bulunur. Bu denklemde Ra(T) deprem yükü azaltma katsayısıdır ve 3 olarak alınır [12][17].

$$S_{aR}(T) = \frac{S_{ae}(T)}{R_a(T)} \quad (4)$$

Hesaplama sonucunda Bergama Bedesteni için azaltılmış tasarım spektral ivmesi SaR(T) hem x hem de y yönünde 0,414'e eşittir. Eşdeğer deprem

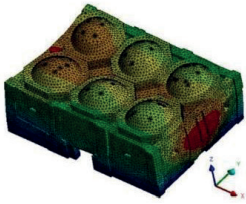
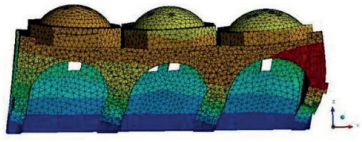
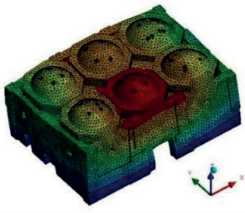
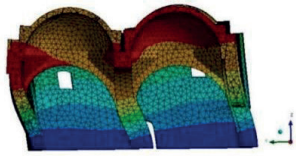
yükü analizinde kullanılacak yatay ivme, indirgenmiş tasarım spektral ivmesinin denklem 5'te gösterildiği gibi yer çekimi ivmesi (g) ile çarpılmasıyla bulunur.

$$0.414x9.81=4.06m/s^2 \quad (5)$$

+X ve +y yönleri için eşdeğer deprem yükünden elde edilen yatay ivme ayrı ayrı yapıya uygulanmıştır. Toplam deformasyon, normal gerilme, kayma gerilmesi ve asal gerilme değerleri analizler sonucunda elde edilmiştir.

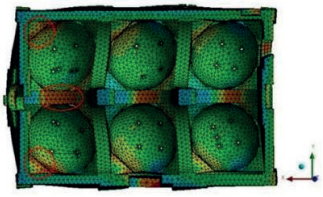
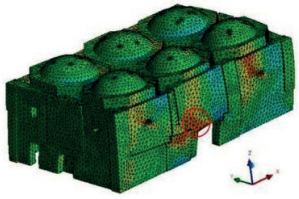
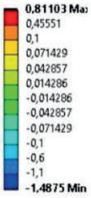
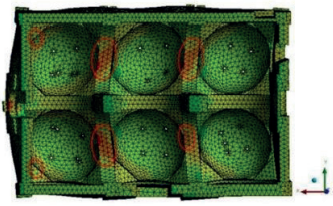
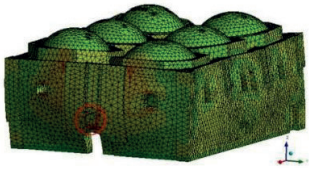
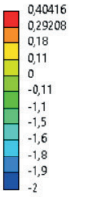
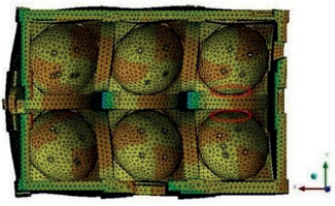
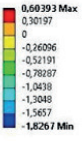
+X yönüne yönelik deformasyon analizi, yapı üzerinde –x'ten +x'e doğru deformasyon oluşturur. Yani söz konusu yükleme için kuzey ve güney duvarlar düzlem dışı davranış gösterirken, doğu ve batı duvarlar ise düzlem içi davranış göstermektedir. Maksimum deformasyon (4,59 mm.) güney duvara bağlanan taşıyıcı kemerde görülmektedir. Güney duvarının üst kotu 4.08 ve 4,59 mm. arasında değişen deformasyona sahiptir. Kuzey yan kubbeler ile kubbeler arasındaki orta boylamasına eksen 3,57-4,08 mm arasında deforme olur. +Y yönü için deformasyon analizi, yapıdaki -y'den +y' ye doğru olan deformasyonu gösterir. Yani ilgili yüklemeye göre doğu ve batı duvarları düzlem dışı davranış gösterirken, kuzey ve güney duvarları ise düzlem içi davranış göstermektedir. En fazla deformasyon (7.49 mm.) doğu duvarının üst kotunda, tepe pencereler arasında görülmektedir (Tablo 6).

Tablo 6- X ve y yönlerindeki eşdeğer deprem yükü için toplam deformasyon

Yük yönü	Aksonometrik kütle gösterimi	Kesit	Toplam deformasyon (mm)
+x yönü			
+y yönü			

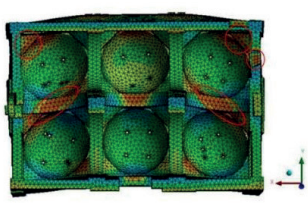
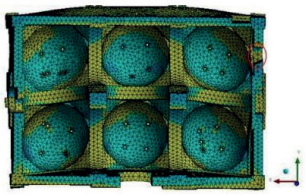
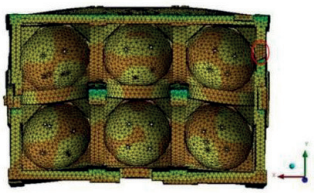
+X ve +y yönündeki deprem yüklemeleri için x, y ve z eksenlerine ait normal gerilme dağılımları Tablo 7 ve Tablo 8'de gösterilmiştir. +x yönündeki deprem yükü ve x ekseni için, işaretli kemer ve düzlem üçgenlerde tuğla yığma duvar çekme dayanımı değeri (0,18 MPa) aşılmıştır. Genişletilen ve profili değiştirilen batı giriş kapısı kemerindeki çekme gerilmesi sistem için limiti aşan maksimum değere sahiptir. Y ekseni için, bu eksen üzerinde uzanan taşıyıcı kemerlerde sınırı (0,18 MPa) aşan çekme gerilmesi değerleri görülmektedir. Ağırlıklı olarak +x yönündeki yüklemelerden etkilenen güneyduvarındada köşe düzlem üçgenlerinde sınır değeri aşan çekme alanları (0,25 MPa) bulunmaktadır. Z ekseni için işaretli geçiş bölgeleri limiti aşmaktadır. Güney giriş kapısındaki tonoz kalıntısının üstünde kalan alan da çekme değeri sınır değerin (0,11 MPa) üzerindedir.(Tablo 7).

Tablo 7- X-yönlü deprem yükü ve x,y,z eksenleri için normal gerilme dağılımları

Eksen ve yük yönü	Tavanda normal gerilme dağılımı	Duvarlarda normal gerilme dağılımı	Gerilme değerleri (MPa)
x-yönlü deprem yükü — x-ekseni			
x-yönlü deprem yükü — y-ekseni			
z-ekseni			

+Y yönü ve x ekseni için, işaretlenmiş taşıyıcı kemerler, düzlem üçgenler ve kuzeyduvarına yeni eklenen kapı açıklığının kemeri, normal gerilme sınırını aşan değerleri göstermektedir. Tepe pencerelerin üzerindeki alanlarda ve doğu duvardaki kemer-duvar bağlantı kotlarında malzemeler için sınır çekme mukavemeti değerleri aşılmıştır. Y ekseninde ise kuzey duvarında sonradan açılan kapının kemeri sınırı aşan değerler göstermektedir. Duvarlardayekseniveyyönündekiyüklemelerdeçekmevebasınçgerilme değerleri limitlerin altındadır. Z eksenindeki normal gerilim için, kuzey duvardaki yeni açılan kapının kemeri üzerindeki çekme gerilimi, tuğladuvarınçekmemukavemetini(0,18 MPa) aşmaktadır. Doğu duvarında orta tepe pencerelerin etrafındaki çekme alanı sınır değerden daha yüksek bir değere sahiptir (Tablo 8).

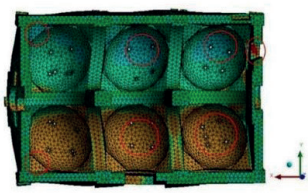
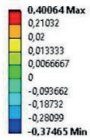
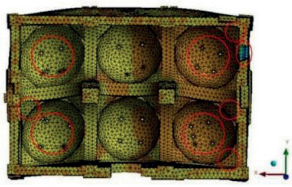
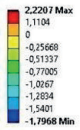
Tablo 8- Y-yönlü deprem yükü ve x,y,z eksenleri için normal gerilme dağılımları

Eksen ve yük yönü	Tavanda normal gerilme dağılımı	Duvarlarda normal gerilme dağılımı	Gerilme değerleri (MPa)
y-yönlü deprem yükü — x-ekseni			2,4023 Max 1,2512 0,1 0,071429 0,042857 0,014286 -0,014286 -0,042857 -0,071429 -0,1 -0,6 -1,1 -1,4552 Min
y-yönlü deprem yükü — y-ekseni			2 1,5 1 0,5 0 -0,001 -0,002 -0,003 -0,004 -0,1 -0,34518 -0,59036 -0,83553
z-eksen			1,5383 Max 0,76917 0 -0,43525 -0,8705 -1,3057 -1,741 -2,1762 -2,6115 -3,0467 Min

+X yönündeki depremyüklemesineaitkaymagerilmesideğerleri,ortavekuzeykubbelerin tepe seviyelerine doğru ve güney duvar yanındaki düzlem üçgenlerde ve kuzey duvarında yeni açılan kapı açıklığının kemerinde sınır kesme dayanımı değerini aşmaktadır. Duvarlardakaymagerilmesideğerlerisınırın(0,035MPa)altındadır.+Yyönündekideprem yüklemesi için kayma

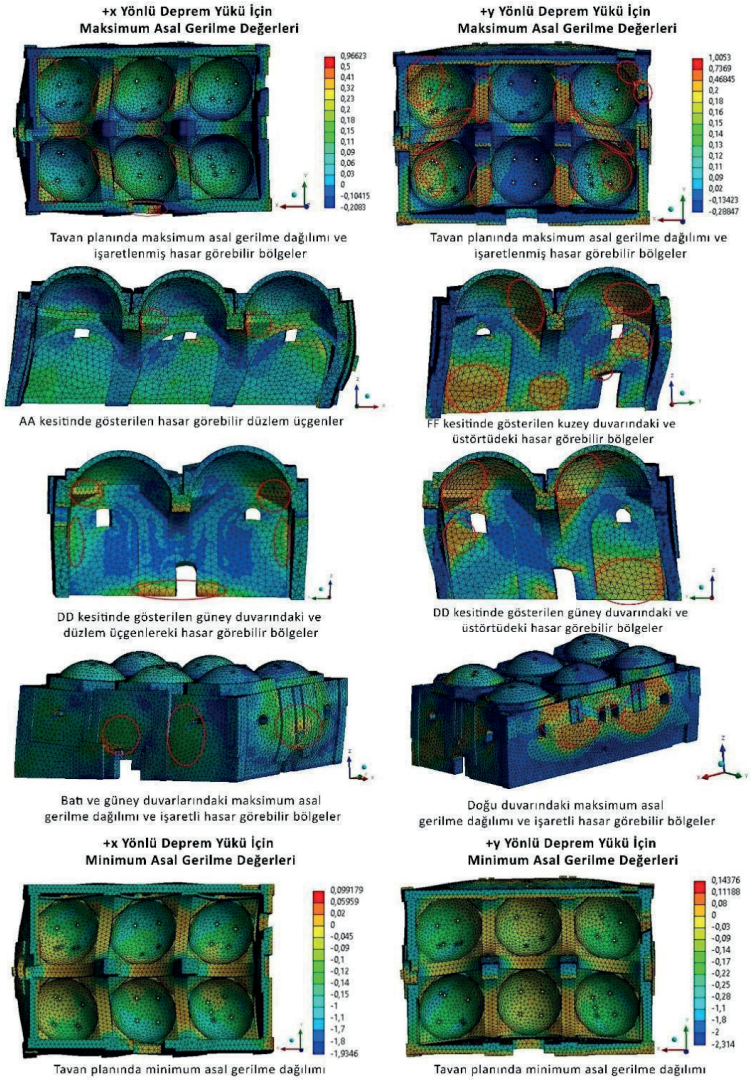
gerilmesi değerleri, güney ve kuzey kubbelerde tepe seviyesinedoğru sınır değeri aşmaktadır. Orta eksen kemerlerine boyuna yönde ve güney duvarına bitişik olan işaretli düzlemüçgenlersınırdandahayüksekgerilmedeğerlerigöstermektedir. Kuzey duvarında sonradan açılan kapı kemeri dekaymadayanımısınırını(0,06MPa)aşan bir diğer konumdur (Tablo 9).

Tablo 9- X ve y-yönünde deprem yükü için kayma gerilme dağılımı

Yük yönü	Tavanda kayma gerilme dağılımı	Duvarlarda kayma gerilme dağılımı	Gerilme değerleri (MPa)
+x yönü deprem yükü			
+y yönü deprem yükü			

Maksimum ve minimum asal gerilme analizleri için, +x yönündekidepremyükünde,tuğla duvarın çekme mukavemetini aşan bölgeler, tavan planı görünümünde maksimum asal gerilim için işaretlenmiş kemerler, düzlem üçgenler ve değiştirilmiş batı giriş kapısının kemeridir.AAveDDkesitlerindebazıhassasdüzlemüçgenlergörülebilir.Güneyduvarının köşe kısımları ve orta alt seviyesi sınırı (0,11 MPa) aşmaktadır. Batı duvarında, batı giriş kapısının üzerindeki ve güneye doğru tepe pencerenin etrafındaki bölgeler, sınırı (0,11 MPa) aşan çekme değerleri göstermektedir. Güney ve doğu duvarlarında, kemerlerin duvarlarla bütünleştiği kısımlarda ve tepe pencerelerin çevresindedesınırçekmedayanımı aşılmıştır. Duvar ve paye tabanlarında basınç olarak minimum asal gerilme değerleri daha yüksek ancak limitin altındadır. +Y yönündeki deprem yükü için, maksimum asal gerilme değerleri, tavan planı görünümünde işaretli kemerlerde tuğla duvarınçekmedayanımından (0,18 MPa) daha yüksektir. Bazı düzlem üçgenler, güney ve kuzey yan kubbeler ve kuzey duvarında yer alan yeni açılan kapı kemeri, sınır değeri aşan asal gerilme değerleri göstermektedir. Üst yapının yanı sıra

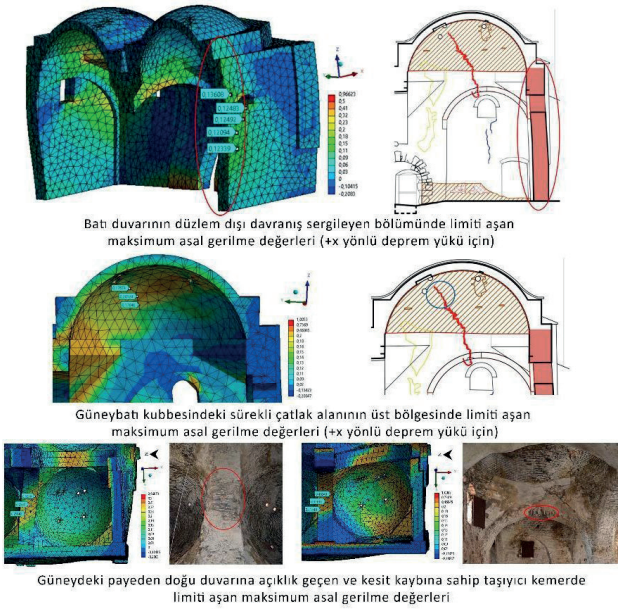
y ekseninde yeralankuzeyvegüneyduvarlardasınır çekme dayanımı değerlerini geçen hassas bölgelerbulunmaktadır.Doğuduvarında,taşıyıcı kemerlerin duvara birleştiği yerlerde ve tepe pencerelerin üst kısımlarında, sınır çekme dayanımı değerlerini aşan maksimum asal gerilme değerleri görülmektedir. +Y yönündeki deprem yüklemesinde duvar ve paye tabanlarında basınçtan kaynaklanan minimum asal gerilme değerleri daha yüksek olmakla birlikte limitlerin altındadır (Şekil 14).



Şekil 14- +X ve +y yönlü deprem yükü için Bergama Bedesteni'nin sismik açıdan hasar görebilir bölgelerini gösteren maksimum ve minimum asal gerilme dağılımları

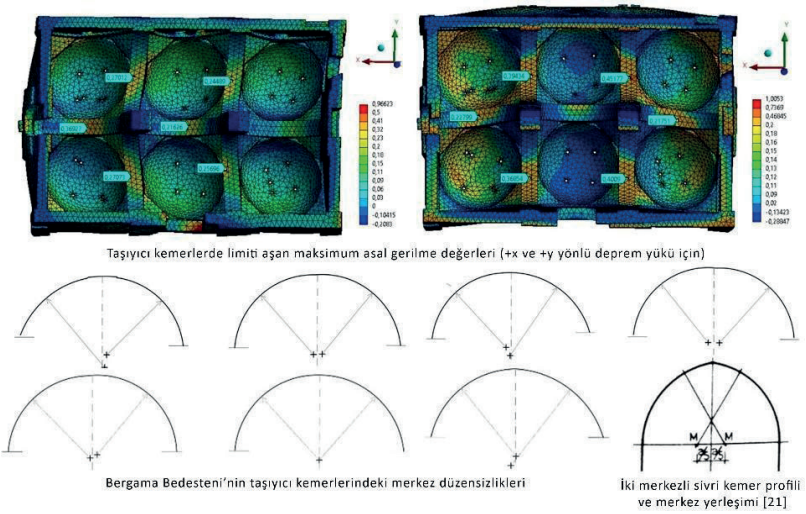
5. Değerlendirme

Sismik hasar görebilirlik analizlerinin sonuçları, örtüşen bölgeleri tespit etmek için yapısal hasar ve değişiklik analizleriyle karşılaştırılmıştır. +x yönündeki deprem yükü için, batı duvarının güney kısmı, kaba yonu taş duvarın sınır çekme dayanımını (0,11 MPa) aşan maksimum asal gerilme değerleri göstermektedir. Bu kısım mevcut durumda şakülden kaymış durumdadır. Büyük bir deprem sırasında duvarda daha fazla hasar meydana gelebilir. Güneybatı kubbesinin yarı yükseklik seviyesinden tepe seviyesine kadar, +y yönündeki yanal yükleme için maksimum asal gerilme değerleri, tuğla duvarın çekme dayanımını (0,18 MPa) aşmakta veya ona yaklaşmaktadır. Özellikle kubbedeki mevcut düşey sürekli çatlağın tepe seviyesine doğru olan kısmı +y yönündeki deprem yüklemesinin oluşturacağı çekme kuvvetlerinden etkilenme riski altındadır. +X yönündeki ve +y yönündeki deprem yüklemeleri için, güney payeden doğu duvarına kadar uzanan kemerdeki maksimum asal gerilmeler, kilit taşı seviyesi civarında tuğla duvarın sınır çekme dayanımını (0,18 MPa) aşan değerler gösterir. İlgili kemerin kilit taşı bölgesinde mevcut durumda harç ve tuğla malzemesi kaybı ile kesit azalması bulunmaktadır. Dolayısıyla bu kısım hem +x hem de +y yönündeki deprem yüklerine karşı hassastır (Şekil 15).



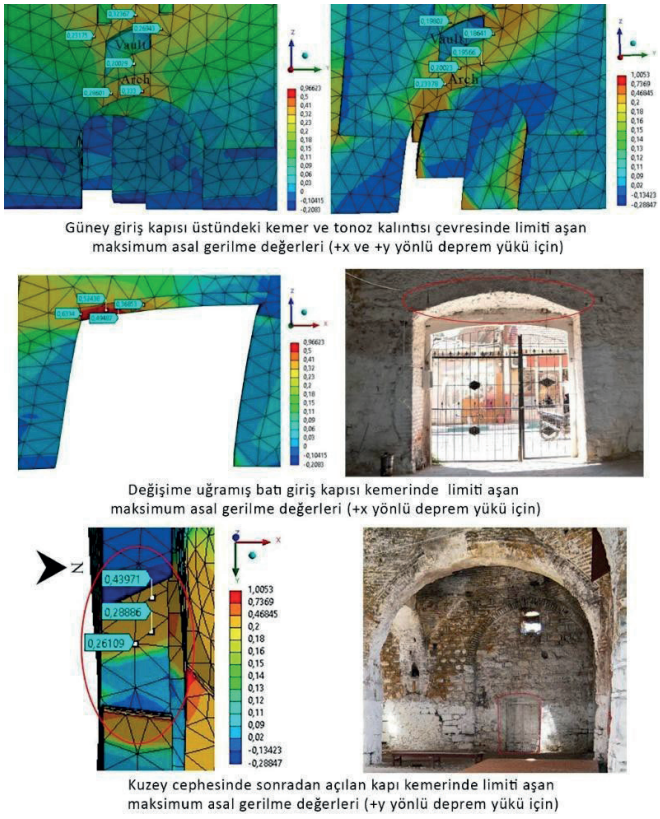
Şekil 15- Maksimum asal gerilme analizi sonuçlarının yapının hasar ve malzeme bozulması olan kısımları ile karşılaştırılması

+X ve +y yönündeki deprem yüklemeleri için bazı taşıyıcı kemerler, mafsal oluşumuna imkan verecek şekilde tuğla yığma duvar çekme dayanımı sınırını (0,18 MPa) aşan maksimum asal gerilme değerleri gösterirler. Mevcut durumda tüm kemerlerde kayma tespit edildiğinden her iki doğrultuda olası bir depremle mevcut mafsal sayısının artması yapısal hasara neden olabilir (Şekil 16).



Şekil 16- Maksimum asal gerilme analizi sonuçlarına göre limiti aşan ve mevcutta mafsal oluşumuna sahip kemerler

+X ve +y yönündeki deprem yüklemeleri için maksimum asal gerilme değerleri, güney giriş kapısı kemerinde ve giriş kapısının etrafındaki duvarda hem kaba yonu taş duvarın (0,11 MPa) hem de tuğla yığma duvarın (0,18 MPa) çekme dayanımını aşmaktadır. Tonoz bu kemerin üzerinde kalır. Dolayısıyla kalıntılar her iki doğrultudaki deprem yüklemesinden de olumsuz etkilenebilir. Batı giriş kapısının kemeri genişletilerek ilgili profil yarım daire veya sivri profilden basık profil haline getirilerek kemer yüksekliği azaltılmıştır. Bu değiştirilmiş kısım, maksimum asal gerilme değerleri ile tuğla duvarın çekme dayanımını (0,18 MPa) aşan hassas bir bölgeye karşılık gelmekte olup, +x yönündeki bir deprem yüklemesinden etkilenebilir. Kuzey duvarında yeni açılan basık kemer profilli kapı, yığma duvarda düzensiz bir açıklık oluşturmaktadır. +Y yönündeki deprem yüklemesi için bu kapının kemeri, tuğla yığma duvarın çekme dayanımını (0,18 MPa) aşan maksimum asal gerilme değerleri gösterir. +Y yönündeki bir deprem yükü ilgili kısımda hasara yol açabilir (Şekil 17).



Şekil 17- Maksimum asal gerilme analizi sonuçlarının yapının değişime uğramış kısımlarıyla karşılaştırılması

6. Sonuç

Yapısal hasar ve değişikliklerin görsel analizi ile sonlu elemanlar analizi sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi, mevcut durumdaki hasarlı veya değişime uğramış bölümlerin, modelde sismik hasar görebilirlik potansiyeline sahip olduğu belirlenen kısımlarla karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır. Bedesten modelinin hasar görebilir bölgelerinde yer alan hasar/bozulma ve yapısal değişikliklerin değerlendirilmesi bu kısımlara müdahale önceliği verilmesi gerekliliklerinin tanımlanması açısından faydalıdır. Yapının hasara veya değişime uğramış sismik hasar görebilir kısımları dikkate alınarak bazı izleme ve müdahale kararları önerilebilir; daha kapsamlı araştırmalar planlanabilir:

Batı cephe duvarının güney kısmının düzlem dışı davranışı her yıl takeo-

metrik ölçümlerle izlenmelidir. Güneybatı kubbesindeki sürekli dikey çatlak da ölçüm cihazlarıyla izlenmeli ve genişleme oranının algılanması için her yıl ölçüm sonuçları önceki yılların sonuçlarıyla karşılaştırılmalıdır. Güney payeden doğu duvarına kadar uzanan kemerdeki kesit kaybı uygun tuğla ve harçla tamamlanmalıdır. Kemerlerdeki kayma artışı, deliklerinin halen mevcut olduğu yerlerde ahşap bağ kirişlerin yerleştirilmesiyle önlenebilir. Kemerlerin kayma oranı takibi her yıl takeometrik ölçümlerle de yapılabilir. Özellikle üst örtüde yerel hasarlar başlatma ve mevcut hasarların ilerlemesine sebep olma potansiyeli taşıyan bitki oluşumları temizlenmelidir. Yapıdaki hasarlara yönelik müdahale önerileri doğrusal olmayan analizlerle detaylandırılıp güçlendirme projeleri geliştirilebilir. Batı giriş kapısının değişime uğramış basık kemer profili, yük taşıma kapasitesi daha yüksek olan ve yapıda özgün örnekleri görülen yarım daire ya da sivri kemer profiline sahip olacak şekilde yeniden inşa edilebilir. Profilin tam olarak hangi formda olduğuna dair net bilgi olmaması nedeniyle önlem olarak izleme de tercih edilebilir. Kuzey cephede yeni açılan kapı, özgün yığma duvar içerisinde düzensiz bir açıklık eki olarak basık kemer bölümünde gerilme açısından kritik bir konum oluşturmaktadır. Bu yüzden dolgu ile bu kapı açıklığı kapatılabilir. Müdahale planlaması olarak, basık kemerli kapının varlığı belli bir dönemin yapım tekniğini de yansıttığı ve binanın yaşam öyküsünün bir parçası halini aldığı için dolgu bu kısımda bir kapı açıklığının mevcut olduğunu belli edecek şekilde ayırt edilebilir, aynı zamanda uyumlu malzeme ile yapılmalıdır. Güney cephedeki dükkanların olası yıkımından sonra, tonoz kalıntısı özgününe uygun olarak tamamlanarak güney duvarının olası +x yönündeki deprem yüküne karşı hasar riski azaltılabilir. Yeniden inşa sürecinden önce tonozlu dükkânın derinliği ve tonozu taşıyan taşıyıcı duvar kalınlığının, halen tonozlu dükkânları mevcut olan bedestenlerle karşılaştırmalı çalışma gerçekleştirerek ve yapılacak sondaj çalışmalarıyla ulaşılabilecek bilgiler değerlendirilerek belirlenmesi gerekmektedir. Tonozlu dükkanların orijinal haline dair net bilgiye ulaşılamaması durumunda tonozlu dükkanın yeniden inşası yerine, tonoz kalıntı formuyla uyumlu ve destekleyici bir strüktür tasarımı da gerçekleştirilebilir.

Teşekkür

Bu çalışma İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2021IYTE-1-0014 numaralı araştırma projesi olarak desteklenmiştir.

Kaynaklar

[1] Aghabeigi P., and Farahmand-Tabar, S. Seismic Vulnerability Assessment and Retrofitting of Historic Masonry Building of Malek Timche in Tabriz Grand Bazaar. Engineering Structures, 240 (June 2020): 112418, 2021. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112418.

[2] Altunışık A.C., Sunca, F., Genç, A.F. and Tavşan, C. Post-Earthquake Damage Assessments of Historic Mosques and Effects of Near-Fault and Far-Fault Ground Motions on Seismic Responses. International Journal of Architectural Heritage, 00 (00): 1–36, 2021. https://doi.org/10.1080/15583058.2021.2011475.

[3] Ortega, J., Vasconcelos, G., Lourenço, P.B., Rodrigues, H., Varum, H. Seismic Vulnerability of Vernacular Buildings in Urban Centres-The Case of Vila Real De Santo Antonio. In: Seismic Retrofitting Learning From Vernacular Architecture, pp 219–224, EH Leiden, The Netherlands: CRC Press, Taylor&Francis Group, 2015.

[4] Lagomarsino, S., and Cattari, S. PERPETUATE Guidelines for Seismic Performance-Based Assessment of Cultural Heritage Masonry Structures. Bulletin of Earthquake Engineering, 13 (1): 13–47, 2015. https://doi.org/10.1007/s10518-014-9674-1.

[5] Stand4Heritage, University of Minho. New Standards for Seismic Assessment of Built Cultural Heritage, 2020. https://stand4heritage.org/work-packages/work-package-4/. Accessed 24 May 2022.

[6] Lourenço, P.B. Computational Strategies for Masonry Structures. PhD Thesis. Delft University of Technology, 1996. http://www.narcis.nl/publication/RecordID/oai:tudelft.nl:uuid:4f5a2c6c-d5b7-4043-9d06-8c 0b7b9f1f6f.

[7] Şen, B. Modeling and Analysis of The Historic Masonry Structures. MSc Thesis, Boğaziçi University, 2006.

[8] Taliercio, A., and Binda, L. On the Reliability of Linear Elastic Analyses of Historical Masonry Buildings: A Case Study. Journal of Building Appraisal 2 (4): 301–12, 2007. https://doi.org/10.1057/palgrave.jba.2950051.

[9] Barbieri, G., Biolzi, L., Bocciarelli, M., Fregonese, L. and Frigeri, A. Assessing the Seismic Vulnerability of a Historical Building. Engineering Structures, 2013. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.09.045.

[10] Bilgin, H., and Ramadani, F. Numerical Study to Assess The Structural Behavior of The Bajrakli Mosque (Western Kosovo). Advances in Civil Engineering, 2021. https://doi.org/10.1155/2021/4620916.

[11] Işık, E., Harirchian, E., Arkan, E., Avcil, F., Günay, M. (2022) Structural Analysis of Five Historical Minarets in Bitlis (Turkey). Buildings 12 (2), 2022. https://doi.org/10.3390/buildings12020159.

[12] Republic of Turkey General Directorate of Foundations (VGM). Guideline for Management of Earthquake Risks for Historical Buildings. pp 125–144, 2017. https://cdn.vgm.gov.tr/organizasyon/organizasyon12_030619/kilavuz.pdf.

[13] Koçak, A. Linear and Nonlinear Analysis of Historical Masonry Structures Under Static and Dynamic Loads Case Study: Küçük Aya Sofya Mosque. PhD Thesis. Yıldız Technical University, 1999.

[14] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). Pergamon and its Multi-layered Cultural Landscape. Accessed March 29, 2022, https://whc.unesco.org/en/list/1457/.

[15] Aktuğ, İ. (1989) Construction Techniques of Western Anatolia 14th Century Principalities Period Architecture. PhD Dissertation, İstanbul Technical University.

[16] Ansys Innovation Space. Modal Analysis. https://courses.ansys.com/index.php/courses/modal-analysis/. Accessed 21 January 2022.

[17] Republic of Turkey Ministry of Interior Disaster and Emergency Management and Authority (AFAD) Turkish Building Earthquake Code. 2018. http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1.pdf.

[18] Sağlambaşoğlu, M., Dündar-Sarı, G. Soil and Foundation Report Belonging to The Plot 309 and Parcel 8 Site in Bergama, İzmir. 2018.

[19] Republic of Turkey Ministry of Interior Disaster and Emergency Management Authority (AFAD). The Seismic Hazard Maps of Turkey Interactive Web Application Report For Bergama Bedesten. https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/ozetRapor.xhtml. Accessed 1 January 2022.

[20] Republic of Turkey Ministry of Interior Disaster and Emergency Management Authority (AFAD) The Seismic Hazard Map of Turkey. 2018. https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi. Accessed 30 December 2021.

[21] Uluengin, F., Uluengin, B., Uluengin, M.B. Classical Construction Details of Ottoman Architecture. 4th ed., İstanbul: YEM Publication, Mas Printing, 2011.

28 EYLÜL 2024

7. ULUSLARARASI TARİHİ YAPILARIN GÜÇLENDİRİLMESİ VE GELECEĞE GÜVENLE DEVRİ SEMPOZYUMU

7. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRENGTHENING HISTORICAL BUILDINGS AND TRANSFERRING THEM SAFELY TO THE FUTURE

7. SEMPOZYÛMA NAVNETEWEYÎ LI DERBARÊ QEWÎKIRIN Û PARASTINA AVAHÎYÊN DÎROKÎ

DİYARBAKIR, SEZAİ KARAKOÇ KÜLTÜR MERKEZİ

B SALONU - 3B OTURUMU

Oturum Başkanları
Mehmet Emin Öncü, Eylem Ulutaş Ayatar

Tekstil Donatılı Harç Şeritlerle Güçlendirilen Tuğla Duvarlarda Arayüzey Kayma Gerilmesi – Sıyrılma Deplasmanı Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi
Alper Çelik, Ömer Mercimek, Özgür Anıl, Sercan Tuna Akkaya

Kapadokya Atık Volkanik Tüfü ile Üretilmiş Enjeksiyon Malzemesinin Yerinde Uygulaması
Burcu Dinç Şengönül, Muhammed Bayram, Şerife Özata, Didem Oktay, Nabi Yüzer

Nanofiber Selüloz Katkılı Kireç Esaslı Enjeksiyon Malzemelerinin Tasarımı ve İncelenmesi
Ali Sayar, Didem Oktay

TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI ANKARA ŞUBESİ
TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI DİYARBAKIR ŞUBESİ
ODEYA ENDAZYARÊN AVAHÎYÊ

TEKSTİL DONATILI HARÇ ŞERİTLERLE GÜÇLENDİRİLEN TUĞLA DUVARLARDA ARAYÜZEY ADERANS-SIYRILMA DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Alper ÇELİK[1], Ömer MERCİMEK [2], Özgür ANIL[3], Sercan Tuna AKKAYA[4]

[1]Arş. Gör., Ankara Üniversitesi, alper.celik@ankara.edu.tr
[2]Dr. Öğr. Üyesi, Ankara Üniversitesi, omercimek@ankara.edu.tr
[3]Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, oanil@gazi.edu.tr
[4]Arş. Gör., Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, sercantuna.akkaya@aybu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, tarihi yapıların güçlendirilmesinde kullanımı giderek yaygınlaşan tekstil donatılı harç (TDH) şeritler ile güçlendirilmiş tuğla duvarlarda arayüzey aderans gerilmesi-sıyrılma yer değiştirmesi davranışının deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Dolu harman tuğlasından üretilen toplam 16 adet deney numunesi üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmada, TDH şerit yapışma boyu, TDH şerit genişliği, ankraj kullanımı ve harç tipi değişken olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma TDH şeritlerin yüzeyden eksenel kuvvetle çekilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Her bir deney elemanı için TDH şeritler ve yüzey arasındaki aderans gerilmesi-sıyrılma yer değiştirmesi ilişkisi belirlenmiştir. Ayrıca deney elemanları için artık gerilme, rijitlik ve enerji tüketim kapasiteleri deneysel veriler kullanılarak hesaplanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Yığma Yapı, Tekstil Donatılı Harç, Güçlendirme, Aderans-Sıyrılma, Nümerik Analiz

Abstract

In this study, it was aimed to experimentally investigate the interfacial bond stress-slip displacement behaviour of brick walls reinforced with textile reinforced mortar (TRM) strips, which are increasingly used in the retrofitting of historical buildings. TRM strip bond length, TRM strip width, anchorage usage and mortar type were determined as variables in the experimental study carried out on a total of 16 specimens produced from solid mortar bricks. In the experimental study, TRM strips were tested by pulling with axial force from the surface. The bond stress-slip displacement relationship between the TRM strips and the surface was determined for each test element. In addition, residual stress, stiffness and energy dissipation capacities were calculated using the experimental data.

Keywords: Masonry structure, Textile Reinforced Mortar, Strenthening, Bond-Slip, Numerical study

1. Giriş

Tarihi yapılar, mimari ve kültürel mirasımızın vazgeçilmez unsurlarıdır ve geçmişin izlerini günümüze taşımaktadır. Bu yapıların korunması ve gelecek nesillere aktarılması hem mühendislik hem de restorasyon alanlarında büyük bir öneme sahiptir. Ancak, zamanla maruz kaldıkları doğal afetler, çevresel etkiler ve insan kaynaklı tahribatlar, tarihi yapıların yapısal bütünlüklerini tehdit etmektedir. Bu durum, tarihi yapıların güçlendirilmesi ve korunması için yenilikçi ve etkili yöntemlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Son dönemlerde, Tekstil Donatılı Harç (TDH) şeritler, tarihi yapıların güçlendirilmesinde öne çıkan yenilikçi bir çözüm olarak kabul edilmektedir. TDH şeritler, kompozit malzemelerden üretilen ve yüksek çekme dayanımı, süneklik ve hafiflik gibi üstün özelliklere sahiptir. Bu şeritler, tarihi yapılarda minimal müdahalelerle yüksek performans sağlayarak, yapısal güçlendirme ihtiyaçlarına cevap vermektedir. TDH teknolojisinin en önemli avantajlarından birisi de tarihi yapıların özgün dokusunu ve estetik değerini korumaktır. Geleneksel güçlendirme yöntemleri, yapıya ek yükler ve büyük müdahaleler gerektirirken, TDH şeritler düşük ağırlıkları ve ince yapıları sayesinde bu tür sorunları en aza indirgemektedir. TDH şeritlerin tarihi yapıların güçlendirilmesindeki kullanım alanları oldukça geniştir. Özellikle depreme karşı dayanıklılığın artırılması, çatlakların kontrol altına alınması ve genel yapısal bütünlüğün korunması gibi kritik konularda TDH şeritler etkili çözümler sunmaktadır. TDH uygulamaları, tarihi duvarların, kemerlerin ve kubbelerin güçlendirilmesi gibi çeşitli yapısal elemanlarda başarıyla kullanılmaktadır. Bu teknolojinin uygulanabilirliği ve etkinliği, laboratuvar ve saha çalışmaları ile kanıtlanmış olup, restorasyon mühendisleri ve mimarları tarafından giderek daha fazla tercih edilmektedir.

Tekstil Donatılı Harç şeritler, duvar elemanlarının taşıma kapasitesini ve deprem dayanıklılığını artırarak, önemli yapısal iyileştirmeler sağlamaktadır. Cordero vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, TDH uygulamasının, duvar elemanlarının yük taşıma kapasitelerini önemli ölçüde artırdığı ve bu elemanları dış kuvvetlere karşı daha dirençli hale getirdiği gözlemlenmiştir [1]. Detaylı deneyler ve analizler, TDK'nin yapısal bütünlüğü geliştirdiğini ve çeşitli yükleme koşullarında genel kararlılığı artırdığını göstermiştir. Benzer şekilde, başka bir çalışma, TDH şeritlerinin sismik koşullarda performansını optimize etmek için daha fazla kalibrasyona ihtiyaç duyduğunu vurgulamış, doğru tasarlanmış TDH uygulamalarının duvarların sünekliğini ve enerji dağıtım kapasitesini önemli ölçüde artırarak sismik riskleri azalt-

tığını ortaya koymuştur [2]. Ayrıca, TDH ile güçlendirilmiş duvar elemanlarının metodolojileri ve sonuçları üzerine kapsamlı incelemeler, TDH'nin geleneksel yöntemler olan Lifli Polimer (FRP) ve çelik şeritlere kıyasla sunduğu avantajları vurgulamaktadır [3]. Bu incelemeler, TDH'nin, duvar yüzeyleri ile daha iyi uyum sağladığını, nefes alabilirliğini artırdığını ve termal genleşme uyuşmazlığını azalttığını belirtmiştir. Bu özellikler, TDH'yi uzun vadeli korunma ve güçlendirme çalışmaları için daha sürdürülebilir bir seçenek haline getirmektedir. TDH'nin kemerlerde uygulanabilirliği üzerine yapılan kapsamlı bir deneysel çalışma, TDH kompozitlerinin kemerlerin yük taşıma kapasitesini ve deformasyon özelliklerini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir [4]. Çeşitli konfigürasyonlar ve bağlama teknikleri kullanılarak yapılan bu çalışma, TDH'nin kemer güçlendirme için en uygun kullanımını belirlemeye yönelik değerli bilgiler sağlamıştır. TDH şeritlerinin tuğla taşıyıcı duvarlarda kullanımı üzerine yapılan bir deneysel çalışma, yapısal performansta ve aderansta önemli iyileşmeler sağlamıştır [5]. Mezrea vd. (2017) [6] tarafından yapılan çalışmada, bazalt donatılı harç kullanılarak yapılan güçlendirme uygulamalarının, tarihi tuğla ayakların taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırdığı ve yapısal performansını geliştirdiği ortaya konulmuştur. Sonuç olarak, TDH şeritler, tarihi yapıların güçlendirilmesinde etkili, dayanıklı ve ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Geleneksel yöntemlerin yetersiz veya daha müdahaleci olduğu durumlarda TDH kullanımı, duvar ve kemerlerin yapısal performansını ve dayanıklılığını artırarak hem yeni hem de tarihi yapıların korunmasına önemli katkılar sağlamaktadır.

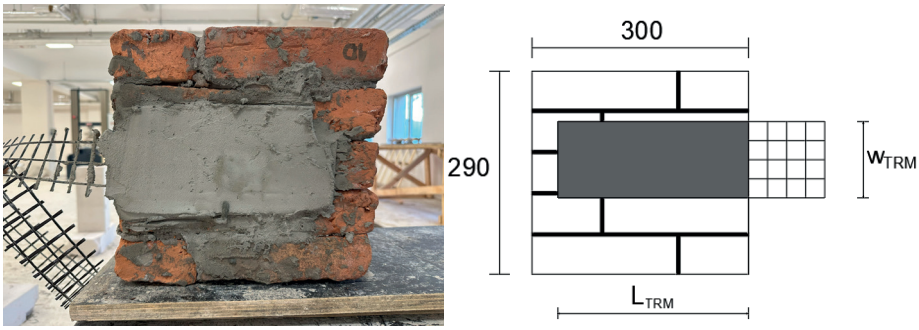
Tekstil donatılı harç (TDH) şeritler ile güçlendirilen yığma duvarların en önemli göçme mekanizmalarından birisi TDH şeritlerin yüzeyden sıyrılmasıdır. Bu sebeple geliştirilecek olan güçlendirme detaylarında TDH şeritler ile yığma duvar yüzeyleri arasındaki arayüzey davranışının bilinmesi, yapılacak olan kapasite hesaplarının doğruluğu açısından son derece önemlidir. Bu amaç doğrultusunda oluşturulan deneysel programda TDH şeritler ile kil esaslı dolu tuğla duvarlar arasındaki arayüzey davranışının deneysel olarak incelenmesi hedeflenmiştir.

2. Deneysel Çalışma

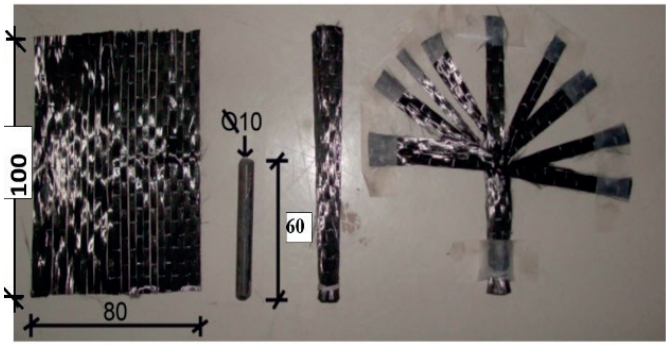
2.1. Deney elemanları

Deneysel çalışma kapsamında tarihi yığma yapı duvarlarını temsil etmesi amacıyla kil esaslı dolu harman tuğladan 16 adet deney elemanı üretilmiştir.

Deney elemanlarının üretiminde kullanılan tuğlaların basınç dayanımı tek eksenli basınç deneyi ile 12 MPa ölçülmüştür. Üretimde kullanılan tuğlalar 190x90x50 mm boyutlarındadır. Her bir deney elemanı 12 adet tuğlanın 15 MPa basınç dayanımına sahip çimento esaslı harç ile örülmesiyle üretilmiştir. Üretilen deney elemanları farklı genişlik, farklı yapışma boyundaki TDH şeritler ile güçlendirilmiştir. Güçlendirmede kullanılan harç tipi deneysel çalışmada yer alan diğer bir değişkendir. Normal dayanımlı harç olarak çimento esaslı 15 MPa (7 günlük) basınç dayanıma sahip hazır harç ürünü kullanılmıştır. Yüksek dayanımlı harç sınıfında ise 50 MPa (7 günlük) basınç dayanımına sahip lif katkılı özel harç ürünü kullanılmıştır. Deneysel çalışmada yer alan bir başka değişken ise şeritlerin yüzeyden sıyrılmasını geciktirmesi amacıyla uygulanan CFRP fan tipi ankraj kullanımıdır. Ankrajlı numunelerde CFRP fan tipi ankrajlar şeritlerin orta noktasına yerleştirilmiştir. Deneysel çalışmada incelenen deney elemanlarının isimleri ve güçlendirme özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Deney elemanlarının görüntüsü ve geometrik ölçülerini içeren şematik çizim Şekil 1'de verilmiştir. CFRP ankrajların detayı Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil-1 Deney elemanlarının geometrik ölçüleri (Ölçüler mm'dir.)



Şekil-2 CFRP fan tipi ankraj detayı

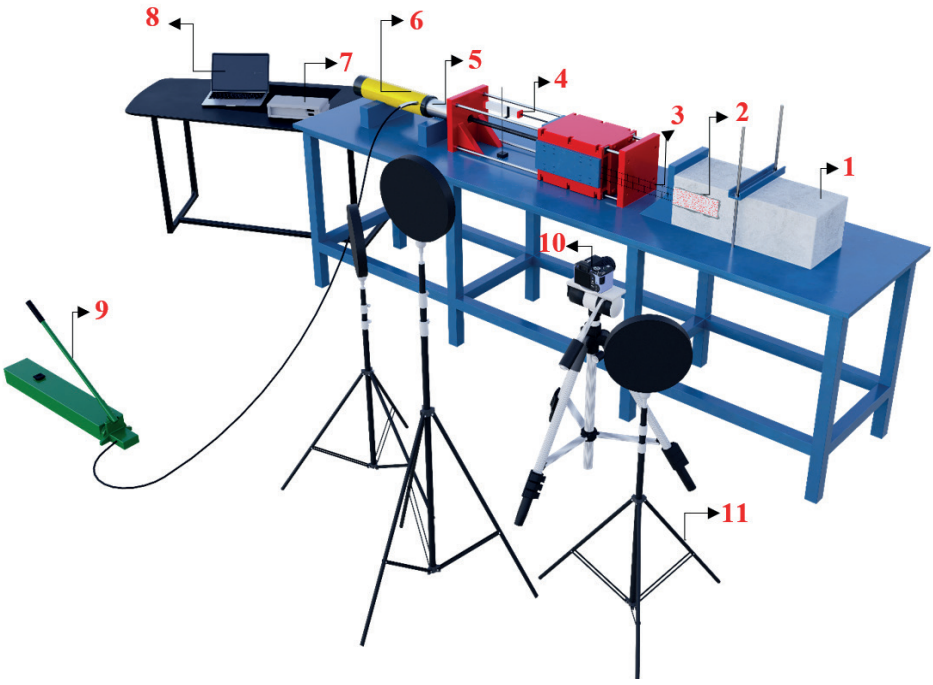
Tablo 1- Deney elemanlarının özellikleri

Numune İsmi	Harç tipi	Ankraj kullanımı	TDH şerit	
			Genişlik (W_{TRM}) (mm)	Yapışma boyu (L_{TRM}) (mm)
ND-50/150	Normal dayanımlı harç	Yok	50	150
ND-50/250				250
ND-100/150			100	150
ND-100/250				250
ND-A-50/150		Var	50	150
ND-A-50/250				250
ND-A-100/150			100	150
ND-A-100/250				250
YD-50/150	Yüksek dayanımlı harç	Var	50	150
YD-50/250				250
YD-100/150			100	150
YD-100/250				250
YD-A-50/150		Yok	50	150
YD-A-50/250				250
YD-A-100/150			100	150
YD-A-100/250				250

2.2. Yükleme ve ölçüm düzeneği

Deney elemanlarının yüzeylerine yapıştırılan farklı genişlik ve uzunluklardaki TDH şeritlerin yüzeye paralel eksenel kuvvet ile çekilmesiyle deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği ve düzeneği oluşturan elemanlar Şekil 3'te gösterilmiştir.

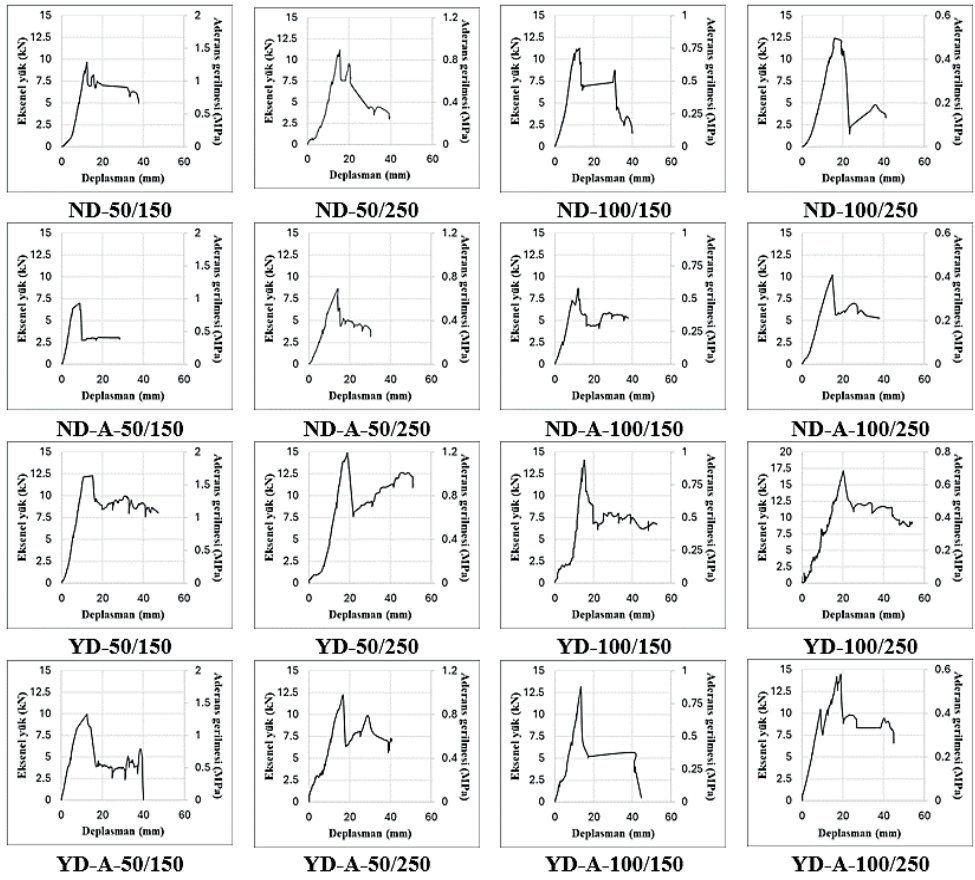
1	2	3	4	5	6
Deney Numunesi	TDH şerit	Karbon tekstil	LVDT	Yük hücresi	Hidrolik piston
7	8	9	10	11	
Veri toplama sistemi	Bilgisayar	El pompası	Fotoğraf Makinesi	Işık Kaynakları	



Şekil-3 Yükleme ve ölçüm düzeneği

3. Bulgular

Deneyler esnasında yük hücresinden okunan eksenel yük değeri ile LV-DT'den okunan yer değiştirme değerleri kullanılarak her bir deney numunesi için eksenel yük-sıyrılma yer değiştirme ilişkisi oluşturulmuştur. Şekil 4'te gösterilen yük-yer değiştirme ilişkilerinde ikinci eksen olarak sol düşey eksene aderans gerilmesi değerleri de eklenmiştir.



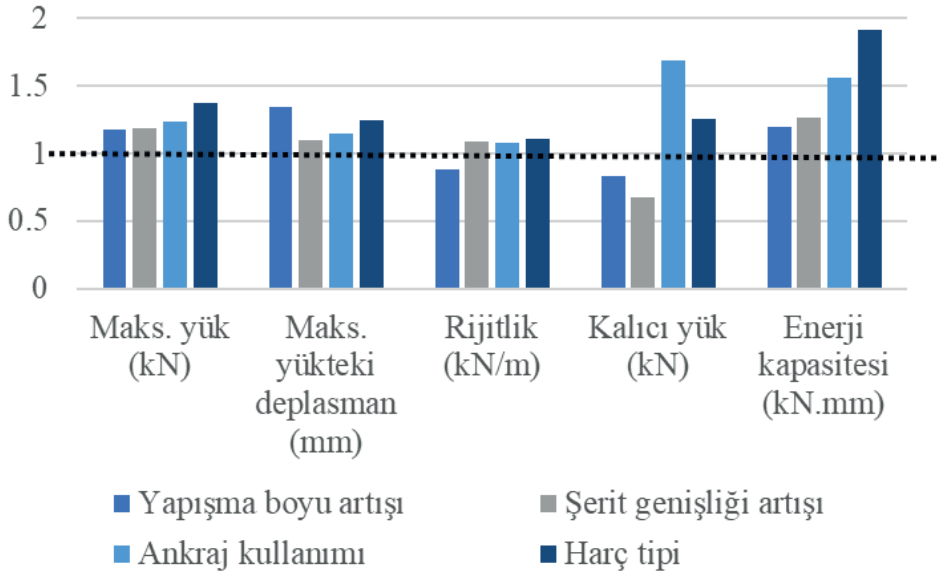
Şekil-4 Eksenel yük (Aderans gerilmesi)-Sıyrılma yer değiştirmesi ilişkileri

Deneysel çalışmadan elde edilen yük-yer değiştirme ilişkisi kullanılarak her bir numune için maksimum yük kapasitesi, maksimum yükteki yer değiştirme, maksimum kayma gerilmesi, kalıcı gerilme, kalıcı gerilmedeki yer değiştirme, rijitlik ve enerji tüketim kapasitesi hesaplanmıştır.16 adet deney elemanı için hesaplanan tüm yapısal parametreler Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2- Deneysel bulgular

Numune İsmi	Maksimum Yük Kapasitesi (kN)	Maksimum Yükteki Yer değiştirme (mm)	Maksimum Kayma Gerilmesi (MPa)	Maksimum Yer değiştirme (mm)	Kalıcı Gerilme (MPa)	Kalıcı Gerilmedeki Yer değiştirme (mm)	Maksimum Yükteki Rijitlik (kN/mm)	Enerji Tüketim Kapasitesi (kN-mm)
ND-50/150	9.70	12.26	1.29	37.77	0.92	14.1	0.79	218.25
ND-50/250	11.20	15.44	0.90	39.43	0.61	18.2	0.73	200.01
ND-100/150	11.26	12.58	0.75	39.94	0.43	14.1	0.90	254.21
ND-100/250	12.39	15.91	0.50	41.14	0.42	20.0	0.78	216.22
ND-A-50/150	6.97	8.64	0.93	28.36	0.36	11.7	0.81	110.56
ND-A-50/250	8.60	13.93	0.69	30.34	0.35	15.6	0.62	123.25
ND-A-100/150	8.73	11.86	0.58	37.75	0.29	16.1	0.74	190.16
ND-A-100/250	10.22	14.83	0.41	38.05	0.22	17.0	0.69	190.18
YD-50/150	12.26	15.06	1.63	47.41	1.12	19.8	0.81	401.67
YD-50/250	14.93	18.80	1.19	51.37	0.61	21.8	0.79	456.41
YD-100/150	14.10	15.05	0.94	52.31	0.45	19.8	0.94	347.34
YD-100/250	17.13	20.20	0.69	54.04	0.44	25.3	0.85	528.43
YD-A-50/150	9.91	12.37	1.32	39.93	0.51	16.8	0.80	200.43
YD-A-50/250	12.26	16.70	0.98	40.49	0.51	17.8	0.73	282.39
YD-A-100/150	13.21	13.29	0.88	44.62	0.37	16.7	0.99	239.40
YD-A-100/250	14.46	18.96	0.58	45.10	0.36	20.2	0.76	390.09

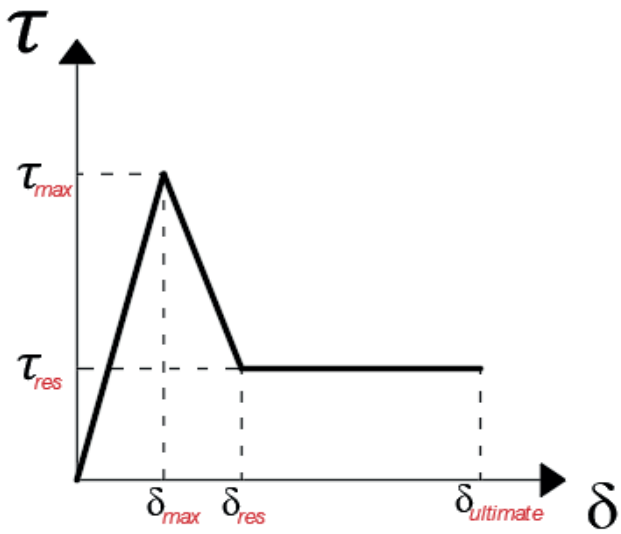
Deneysel çalışma kapsamında incelenen 4 adet değişkenin Tablo 2'de verilen yapısal parametreler üzerindeki etkileri ortalama değerler üzerinden incelenmiştir. Şekil 5'te verilen grafik incelendiğinde her bir deneysel değişkenin maksimum yük kapasitesi, maksimum yükteki yer değiştirme, rijitlik ve enerji tüketim kapasitelerine ortalama etkileri karşılaştırılabilir.



Şekil-5 Deneysel değişkenlerin sonuçlar üzerine etkileri

Tablo 2 ve Şekil 4'te verilen grafik incelendiğinde, deneysel çalışmada yer alan tüm değişkenler (yapışma boyunun artışı, şerit genişliğinin artışı, ankraj kullanımı ve yüksek dayanımlı harç kullanımı) TDH şeritlerin maksimum yük taşıma kapasitesini arttırmıştır. Maksimum yük kapasitesindeki en çok artış ortalama olarak %38 ile normal dayanımlı harç yerine yüksek dayanımlı harç kullanılması olmuştur. Maksimum yükteki yer değiştirme değerleri incelendiğinde, tüm değişkenlerin ortalama olarak maksimum yükteki yer değiştirmesi arttırarak sıyrılmayı geciktirdiği görülmüştür. Maksimum yükteki rijitlik değerleri incelendiğinde yapışma boyu artışı dışındaki tüm değişkenlerin rijitlik değerini ortalama olarak %10 oranında artırdığı sonucuna varılmıştır. Şerit yapışma boyu ve şerit genişliğinin artışı kalıcı yükteki yer değiştirme değerini olumsuz yönde etkilerken, CFRP fan tipi ankraj kullanımı TDH şeritlerde kalıcı yük değerlerini ortalama olarak %68 oranında arttırmıştır. Normal dayanımlı harç yerine yüksek dayanımlı harç kullanılması durumunda ise kalıcı yük miktarı ortalama olarak %25 oranında artmıştır. TDH şeritler için oluşturulan yük-yer değiştirme ilişkilerinin altında kalan toplam alanların hesaplanmasıyla elde edilen enerji tüketim kapasiteleri incelendiğinde ise tüm değişkenlerin artışa sebebiyet verdiği görülmüştür. Özellikler yüksek dayanımlı harç kullanıldığında TDH şeritlerin enerji kapasiteleri ortalama olarak %92 oranında artmıştır.

Tablo 2 ‘de verilen deneysel bulgular ışığında, TDH şeritlerle güçlendirilmesi planlanan tarihi yığma yapıların nümerik analizlerinde kullanılabilecek genelleştirilmiş bir aderans-sıyrılma modeli önerilebilecektir. Bu kapsamda doğrusal olmayan çoklu regresyon analizleri ile önerilecek modellerin, şerit yapışma boyu, şerit genişliği, ankraj kullanım durumu ve harç basınç dayanımı parametrelerini içeren genelleştirilmiş bir yapıda olması hedeflenmektedir. Şekil 4’te verilen yük-yer değiştirme ilişkilerinin genel formu incelendiğinde ise, geliştirilecek arayüzey aderans-sıyrılma modelinin Şekil 6’da gösterildiği gibi üç doğrultulu olması planlanmaktadır.



Şekil-6 Geliştirilecek aderans-sıyrılma modelinin genel formu

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında mevcut tarihi yapıların güçlendirilmesinde son yıllarda kullanımı giderek artan Tekstil Donatılı Harç (TDH) şeritler ile kil esaslı dolu tuğla duvar yüzeyi arasındaki arayüzey kayma gerilmesi-sıyrılma yer değiştirmesi davranışının incelenmesine yönelik deneysel bir araştırma gerçekleştirilmiştir. 16 adet deney elemanı üzerinde gerçekleştirilen bu çalışmada TDH şerit yapışma boyu, TDH şerit genişliği ankraj kullanımı ve

harç tipi değişken olarak dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Deneysel programda yer alan değişkenlerin (şerit yapışma boyunun artırılması, şerit genişliğinin artırılması, ankraj kullanımı ve normal dayanımlı harç yerine yüksek dayanımlı özel harç kullanılması) tüm deney elemanlarında maksimum taşıma kapasitesinin artışında doğrudan etkili olduğu görülmüştür.

- Normal dayanımlı harç kullanılarak duvar yüzeylerine uygulanan TDH şeritlerde oluşan maksimum kayma gerilmelerinin ortalaması 0.76 MPa, yüksek dayanımlı harç kullanılarak uygulanan TDH şeritlerde maksimum kayama gerilmelerinin ortalaması ise 1.03 MPa olarak hesaplanmıştır.

- TDH şeritler ile CFRP fan tipi ankrajların birlikte uygulaması, şeritlerin yüzeyden sıyrılmasını geciktirmesinin yanı sıra yük kapasitelerini de belirgin bir şekilde arttırmıştır.

- Çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlar kullanılarak önerilecek ampirik modellerin, sonlu eleman modellerinde TDH şeritler ile yığma duvarlar arasındaki arayüzeye kohezif bölge modeli (CZM) ile tanımlanarak deneysel sonuçların nümerik olarak doğrulamasının ve parametrik değerlendirmelerin yapılması önem arz etmektedir.

- TDH şeritlerle güçlendirilmiş tam ölçekli yığma duvar elemanları üzerinde deneysel ve nümerik çalışmaların yapılarak, önerilmesi planlanan arayüzey modellerinin tahmin performanslarının araştırılması ileriki çalışmalar için önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK-1002-A destek programı kapsamında 123M152 kodlu proje ile desteklemiştir.

Kaynaklar

[1] Cordero, P., Corradi, M., Borri, A., & Castori, G. (2019). TRM strengthening of masonry arches. Composites Part B: Engineering, 165, 21-35. Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836819303403

[2] López, L. G. (2020). Seismic retrofit of masonry with innovative materials. UPC Commons. Retrieved from https://upcommons.upc.edu/bitstream/2117/336240/1/TLG-RE1de1.pdf

[3] Masó, A. (2014). Analysis of unreinforced and TRM-strengthened brick masonry walls. Semanticscholar. Retrieved from https://www.semanticscholar.org/paper/Analysis-of-unreinforced-and-TRM-strengthened-brick-Mas%C3%B3/004d1f18799055ed96f21ceff94b6fc083c3d73f

[4] Roussis, P. C. (2019). Experimental study of brick masonry walls strengthened with TRM. Key Engineering Materials, 624, 397-402. Retrieved from https://www.scientific.net/KEM.624.397

[5] Triantafillou, T. C. (2022). Masonry elements strengthened with TRM: A review. Buildings, 12(9), 1307. Retrieved from https://www.mdpi.com/2075-5309/12/9/1307

[6] Mezrea, P. E., Yilmaz, I. A., Ispir, M., Binbir, E., Bal, I. E., & Ilki, A. (2017). External jacketing of unreinforced historical masonry piers with open-grid basalt-reinforced mortar. Journal of Composites for Construction, 21(3), 04016110.

KAPADOKYA ATIK VOLKANİK TÜFÜ İLE ÜRETİLMİŞ ENJEKSİYON MALZEMESİNİN YERİNDE UYGULAMASI

Burcu DİNÇ ŞENGÖNÜL[1], Muhammed BAYRAM[2], Şerife ÖZATA[3], Didem OKTAY[4], Nabi YÜZER[5]

[1]Araştırma Görevlisi, Yıldız Teknik Üniversitesi, bdinc@yildiz.edu.tr
[2]Araştırma Görevlisi, Texas State University, lag337@txstate.edu
[3]Araştırma Görevlisi Dr., Ahi Evran Üniversitesi, serife.ozata@ahievran.edu.tr
[4]Dr. Öğr. Üyesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, dyasar@yildiz.edu.tr
[5]Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, nyuzer@yildiz.edu.tr

Özet

Tarihi yapı ve eserler geçmişi geleceğe bağlayan köprüler görevi üstlenmektedir. Geçmiş dönemlerde yaşamış toplumların kültürlerine ışık tutan bu değerlerin korunması ve onarılması, bu eserlerin gelecek yüzyıllara aktarılması adına büyük önem arz etmektedir. Ülkemizde yer alan Kapadokya Bölgesi'nin ev sahipliği yaptığı tarihi yapı, eser ve alanlar 1985 yılı itibariyle UNESCO tarafından Dünya Miras Listesi'ne dahil edilmiştir. Bölgedeki tarihi kaya oyma ve yığma yapılar çeşitli nedenlerle hasarlar barındırmaktadır Ayrıca bölgede kaya oyma yapıların inşası esnasında ortaya çıkan ve miktarı yıllık milyonlarca tona ulaşan atık volkanik tüf bölgede uygun şekilde değerlendirilmediğinden ciddi çevresel problemlere yol açmaktadır. Bu çalışmanın amacı bölgedeki atık volkanik tüf kullanılarak üretilen enjeksiyon malzemesinin Kapadokya Bölgesi'nde bulunan hasarlı bir yapıda uygulanarak performansının gözlemlenmesidir.

Anahtar Sözcükler: Atık volkanik tüf, Enjeksiyon yöntemi, Kapadokya, Yerinde enjeksiyon uygulaması.

Abstract

Historical structures and monuments act as bridges connecting the past to the future. The preservation and restoration of these values, which shed light on the cultures of societies that lived in the past, is of great importance in transferring these artifacts to the following centuries. The historic structures, artifacts, and areas hosted by the Cappadocia Region in our country were registered on the World Heritage List by UNESCO in 1985. The region's historical rock-cut and masonry structures are damaged for various reasons. In addition, the waste volcanic tuff excavated during the construction of rock-cut structures in the region reaches millions of tons annually. It causes severe visual and environmental pollution, because it cannot be adequately utilized in the region. This study aims to observe the performance of the injection material produced using waste volcanic tuff in the region by applying it to a damaged structure in the Cappadocia region.

Keywords: Waste volcanic tuff, Grouting, Cappadocia region, In-situ injection application.

1. Giriş

Anadolu binlerce yıllık serüveninde birçok köklü medeniyete ev sahipliği yapmış ve bu medeniyetlerin arkasında bıraktığı tarihi yapı ve eserlerden korunması başarılan pek çoğu günümüze kadar ulaşmıştır. Bu yüzyılda da tarihi yapı ve eserlerin gelecek nesillere aktarılabilmesi için korunması, gerektiği durumlarda onarılması, sağlamlaştırma ve iyileştirme işlemlerinden geçmesi gerekmektedir. Kapadokya Bölgesi 1985 yılında UNESCO tarafından Dünya Miras Listesine alınarak bölgede binlerce yıllık geçmişi bulunan tarihi yapılara ve doğal alanlara evrensel nitelik kazandırmıştır. Bölgede bulunan tarihi kaya oyma yapılarda çatlak, yarık ve parça kopması gibi pek çok hasar görülmektedir ve bu hasarların onarımında yapının aslı ile uyumlu olmayan malzeme kullanılması onarım hasarlarına yol açmaktadır [1-7]. Ayrıca bölgede uzun yıllarca el ile yapılan kaya oymaların sayısı, mekanik oyma makinaları kullanımından itibaren hızla artarak yıllık milyonlarca ton atık volkanik malzeme oluşumuna sebep olmuştur. Bu malzemeler yeterince değerlendirilmediğinden bölgede görüntü kirliliği oluşturarak tarihi mirasa zarar vermektedir [2,3,8].

Tarihi yapıların onarım, koruma ve güçlendirme çalışmalarında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalara bakıldığında enjeksiyon yönteminin tarihi yapıların onarımında veya mimari elemanlarda sürekli boşlukların bulunduğu durumlarda çatlakların doldurulmasında kullanılan en yaygın yöntemlerden biri olduğu görülmektedir [2, 9, 10]. Geri alınamayan bir teknik olmasına rağmen, hasar görmüş yapının devamlılığının ve dayanımının, içyapısını ve yük taşıma kapasitesini değiştirmeden, geri kazanılmasını sağladığından dolayı kabul görmektedir. Kullanılan enjeksiyon malzemesi (grout) tarihi yapılardaki özgün malzemeye uygun olarak kullanıldığı müddetçe, çağdaş restorasyon kuramı oluşturmak için yapılan düzenlemelerin en önemlilerinden olan Venedik Tüzüğü tarafından da kabul gördüğü belirtilmiştir. Bu yöntemin genel amacı; yapının hasar görmesi sonucu meydana gelen farklı boyutlardaki boşlukların ve çatlakların doldurulması, yapının devamlılığının (sürekliliğinin) ve dayanımının artırılması, duvar elemanlarında hatalı bir şekilde birleştirilmiş olan tabakalardaki boşlukların doldurulmasıdır.Enjeksiyon uygulaması tarihi yığma yapıların onarımda yaygın olarak kullanılan ve geri dönüşü olmayan bir yöntemdir. Yanlış malzeme seçimi veya hatalı uygulamaların yapılması tarihi yapılarda farklı hasarların oluşmasına neden olabilir. Bu nedenle, özgün malzeme özelliklerine uygun enjeksiyon malzemeleri üretilmelidir [9].

Üretilen enjeksiyon malzemesinin laboratuvar ve yerinde yapılan uygulamalarla performansının belirlenmesi oldukça mühimdir. Literatürde yapılan bazı çalışmalarda çeşitli enjeksiyon malzemeleri üretilerek yerinde uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Uranjek vd.

[11], yaptıkları çalışmada, hazır enjeksiyon malzemeleri ile yığma taş duvarlardan oluşan bir yapıda yerinde enjeksiyon uygulaması gerçekleştirmiş, uygulama öncesi ve sonrasında yapılan tahribatsız ve yarı tahribatlı ölçümler ile enjeksiyon uygulamasının performansını değerlendirmiştir. Vintzileou ve Miltiadou-Fezans [12] ile Miltiadou-Fezans vd. [13], Dafni Katolig Manastırı'nın restorasyon çalışmaları için laboratuvar ortamında model duvarlar üretmiş ve bu duvarları farklı enjeksiyon malzemeleri ile onararak yerinde yapılacak uygulamalara en uygun enjeksiyon malzemesini seçmişlerdir. Ayrıca yine literatürdeki çalışmalar incelendiğinde birçok mineral ve kimyasal katkıya sahip enjeksiyon malzemesi üretildiği görülmüştür. Ancak Kapadokya Bölgesi'ndeki tarihi yapılarla uyumlu bir enjeksiyon malzemesi üretimi ve incelenmesi çalışma ekibimizce yapılan çalışmalar dışında söz konusu olmamıştır. Bu çalışma kapsamında temel olarak Kapadokya Bölgesi'nde bulunan ve hasar görmüş tarihi yapıların korunması ve onarımı için yine bu bölgede son 30 yılda oluşturulan kaya oyma yapıların inşası sırasında elde edilen atık volkanik tüf ile üretilen enjeksiyon malzemesinin Kapadokya Bölgesi'nde yer alan hasarlı bir kaya oyma yapıda uygulanması hedeflenmektedir.

2. Deneysel Çalışmalar

2.1. Malzemeler

Tarihi yapıların onarımında kullanılan ve özgün malzeme ile birçok yönden en uyumlu malzemenin hidrolik kireç olduğu bilinmektedir. Bu nedenle tez kapsamında üretilen kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin üretimlerinde TS EN 459-1 [14]'de belirtilen kriterlere uygun NHL5 sınıfı doğal hidrolik kireç, su, Kapadokya Bölgesi atık volkanik tüfü (KBVT) ve çeşitli kimyasal katkılar kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan volkanik tüf Kapadokya'daki daha önceden belirlenen çeşitli alanlardan kaya oyma yapıların inşası sırasında ortaya çıkan hafriyat malzemelerinden elde edilmiştir. Temin edilen malzeme kırılmadan önce ortamda kurutulmuş ve ardından kırım gerçekleştirilmiştir. Kırılan malzeme etüvde kurutulduktan sonra 63μ'luk elekten elenmiştir. Elenen 63 μm altı malzeme ile enjeksiyon malzemesi

üretimi gerçekleştirilmiştir. NHL5 ve KBVT'ye ait kimyasal bileşenler Tablo 1'de, fiziksel özellikler ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1 - Malzemelerin kimyasal bileşenleri

Bileşen(%)	KBVT	NHL5
SiO_2	70,6	9,3
Al_2O_3	12,7	2,6
Fe_2O_3	1,9	1,6
MgO	0,9	2,4
CaO	2,1	54,9
Na_2O	1,8	0,1
K_2O	5,2	0,8
TiO_2	0,2	0,2
P_2O_5	<0,1	<0,1
MnO	<0,1	<0,1
Kızdırma Kaybı	<0,1	1,5

Tablo 2 - Malzemelerin fiziksel özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (g/cm^3)	Özgül yüzey alanı (m^2/g)	Tane boyut dağılımı (µm)	
			d_{50}	d_{90}
NHL5	2,74	0,66 (Blaine)	48,14	119,27
KBVT	2,40	0,56 (Blaine)	27,20	50,26

Enjeksiyon malzemelerinin yeterli akış ve enjekte edilebilirlik özelliklerine sahip olabilmesi için bu malzemelere çeşitli kimyasal katkılar ilave edilmektedir. Akış özelliklerini iyileştirmek ve enjeksiyon malzemesi için kullanılan su miktarını azaltmak için polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı malzemesi kullanılmıştır. Enjeksiyon malzemesinde meydana gelen segregasyon probleminin önüne geçmek için viskozite düzenleyici katkı malzemesi ilavesi gerçekleştirilmiştir. Bu malzeme süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı ile uyumlu olup enjeksiyon malzemesinin priz süresini değiştirmeden ayrışmayı engellemektedir.

2.2. Enjeksiyon Malzemesinin Üretimi

Daha önceki çalışmalarda tasarımların çoğunlukla 2100 ve 800 rpm hızında mekanik karıştırma yolu ile hazırlandığı tespit edilmiştir. Ön deneylerdeki serilerde ise 800 rpm hızında mekanik karıştırıcı kullanılmıştır. Yapılan tüm çalışmalar dikkate alınarak oluşturulan karıştırma yönteminde; ilk olarak bağlayıcı malzemeler karıştırma kabına konmuş, topaklanmayı engellemek için 1-2 dakika kuru karıştırma yapılmıştır. Yaklaşık %10'u kullanılacak kimyasal katkıya eklenen karma suyunun geri kalanı kap içerisine yavaş yavaş ilave edilmiş ve 10 dakika karıştırılmıştır. 10. dakika sonunda, kimyasal katkı karıştırıcı durdurulmadan 30 s içinde eklenmiştir. Tüm malzemeler eklendikten sonra karıştırma işlemine 3 dakika daha devam edilmiştir. Tüm karıştırma işlemi boyunca karıştırma hızı 800 rpm'de sabit tutulmuştur. Üretimlerde mekanik karıştırıcı ve spiral şekilli uç kullanılmış, malzemenin tabanda toplanmaması için mala ile sıyırma işlemi de gerçekleştirilmiştir [2,5,9,10].

2.3. Enjeksiyon Malzemesinin Enjekte Edilebilirlik Özellikleri

Enjeksiyon malzemelerinin enjekte edilebilirliğini belirlemek amacıyla akışkanlık, hacim sabitliği ve penetrasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

2.3.1. Akışkanlık

Taze şerbetin akışkanlık özelliği 2 farklı standartta belirtilen yöntem kullanılarak belirlenmiştir. ASTM D6910 [15]'da belirtilen "Marsh Hunisi" deneyi ve TS EN 445

[16]'te belirtilen "Akış Konisi" deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deneyin amacı belirli çaptaki delikten belirli miktardaki enjeksiyon şerbetinin kaç saniye içinde geçeceğinin ölçülerek akış süresinin saptanması ve çıkan sonuca göre uygulanabilirliğinin değerlendirilmesidir. TS EN 445 [16]'e göre gerçekleştirilen deneyde 1000 ml enjeksiyon şerbeti kullanılmış ve bu karışımın akış konisinden kaç saniye içinde aktığı belirlenmiştir. TS EN 447 [17]'de verilen sınır değerlere göre akış süresinin (t0) 25 saniyeden küçük olması gerekmektedir. ASTM D6910 [15]'a göre yapılan deneyde ise 500 ml malzemenin Marsh hunisinden akış süresi saptanmıştır. Bu standartta akış süresi için belirli bir değer belirtilmediği için literatürde farklı çalışmalarda kabul edilen akış süresinin 45 saniyeden düşük olması ilkesi esas alınmıştır.

2.3.2. Hacim Sabitliği

Uygulamada segregasyon ve aşırı terleme gibi sorunların önüne geçilmesi için üretilen enjeksiyon malzemesinin hacim sabitliği sınır değerlerini sağlaması gerekmektedir. Enjeksiyon malzemelerinde hacim sabitliği TS EN 445 [16] ve/veya ASTM C940 [18]'a göre belirlenmektedir. Buna göre dereceli silindire konulan malzemenin ilk hacmi kaydedilir. Buharlaşmayı azaltmak için silindirin ağzı kapatılır. Üretimden 24 saat sonra enjeksiyon malzemesinin ve üzerinde biriken terleme suyunun yüksekliği ölçülerek terleme oranı hesaplanır. Enjeksiyon malzemelerinde terleme oranı ilk ölçülen hacmin %5'ini geçmemelidir.

2.3.3. Penetrasyon

Üretilen enjeksiyon malzemelerinde nüfuz etme anlamına gelen penetrasyon Üretilen enjeksiyon malzemelerinde nüfuz etme anlamına gelen penetrasyon özelliği EN 1771 [19]'e göre saptanmaktadır. Standarda uygun olarak tasarlanan deney setinde 360 mm uzunluğunda ve 22,2±0.3 mm çapında plastik şeffaf tüp kullanılmıştır. Tüp içerisinde kullanılan malzeme, 2,5– 4,0 mm boyutlarında silis esaslı kumdur. Bu boyutlarda kullanılan kum ile en az 0,4 mm çapındaki boşluklar modellenmiştir. Deney standartta belirtilen sabit basınç (0.075±0,0025 MPa) altında gerçekleştirilmiştir. Enjeksiyon malzemesi şeffaf tüpün üst ucuna ulaştığı andaki (T36) süre kaydedilmiştir. T36 süresinin 50 saniyeden küçük olması gerekir. Enjeksiyon malzemesinin enjekte edilebilirlik niteliği EN 1771 [19]'e göre üç grupta değerlendirilir. Enjeksiyon şerbeti kum kolondan ve tüpün üst ucundan geçerek toplama kabında 20 ml toplandığında "kolay uygulanır", enjeksiyon malzemesi tüpün en üst ucuna ulaşır, ama toplama kabına geçemezse "uygulanabilir" ve tüpü dolduramazsa "uygulamaya uygunsuz" olarak sınıflandırılır. Bu sınıflandırmaya göre enjeksiyon malzemesinin uygulamada verimli şekilde kullanılabilmesi için kolay uygulanır veya uygulanabilir olması gerekmektedir.

Enjeksiyon malzemesinin tasarımında farklı oranlarda Kapadokya bölgesi atık volkanik tüfü (KBVT) ilave edilerek yaklaşık 40 seri üretilmiştir. Taze halde yapılan deneyler sonucunda tüm limit değerleri sağlayan ve

yerinde yapılacak olan uygulamada kullanılmasına karar verilen enjeksiyon malzemesinin ağırlıkça karışım oranları Tablo 3'te, enjekte edilebilirlik özellikleri Tablo 4'de paylaşılmıştır.

Tablo 3 - Enjeksiyon malzemesi karışım oranları

Enjeksiyon malzemesi	Su/bağlayıcı	CNP (%)	Süperakışkanlaştırıcı (%)	Viskozite düzenleyici (%)
	0,6	30	1,4	0,5

Tablo 4 - Enjeksiyon malzemesi taze hal deney sonuçları

Enjeksiyon malzemesi	Akışkanlık		Hacim sabitliği	Kum kolonu	
	Marsh hunisi t_0 (s)	Akış konisi t_0 (s)	Terleme (%)	T_{36} (s)	Enjekte edilebilirlik
	36	9	3,3	4	Kolay

2.4. Eğilme ve Basınç Dayanımı

EN 1015-11 [20]'e uygun olarak enjeksiyon malzemesi, 4x4x16 cm'lik kalıplara dökülerek 20±2°C'de ve %95±5 bağıl nemde 7 gün bekletilmiştir. 7 gün sonra numuneler kalıplardan çıkartılarak 20±2°C'de ve %65±5 bağıl nemde deney gününe kadar muhafaza edilmiştir. 28. ve 90. günde EN 1015-11 [20]'e göre eğilme ve ardından tek eksenli basınç testleri yapıldı. Her test en az üç numune üzerinde tekrarlanmış ve test sonuçlarının aritmetik ortalaması belirlenmiştir. Yerinde uygulanmasına karar verilen enjeksiyon malzemesinin 28. ve 90. gün eğilme ve basınç dayanımları Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5 - Enjeksiyon malzemesi ortalama eğilme ve basınç dayanımları

Gün	Eğilme dayanımı (MPa)	Basınç dayanımı (MPa)
28.	1,9	3,1
90.	2,4	3,4

3. Yerinde Enjeksiyon Uygulaması

Enjeksiyon uygulaması öncesi uygulama yapılmaya uygun bulunan yapılar için ilgili kurum ve kuruluşlardan "yapı ve doğal oluşum onarım izni" alın-

mıştır. Yerinde uygulama öncesi yığma-kaya oyma yapı duvarında sıcaklık ve nem ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Nem ve sıcaklık ölçümlerinin ardından enjeksiyon için açılacak delik alanları belirlenmiştir. Sonrasında delikler ve çatlaklar içerisinde bulunan toz malzemenin temizlenmesi için kompresör ile 1 bar hava basılmış ve delik içindeki toz malzemeler temizlenmiştir. Temizlik sonrasında çatlaklara ve boşluklara su enjekte edilmiştir (Şekil 1.a). Bu uygulama ile enjeksiyon şerbeti içerisindeki suyun taş ve harç tarafından emiliminin önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Uygulama boyunca çatlaklardan sızıntı olmasını engellemek amacıyla, boşluklar daha sonra temizlenmek üzere cam macunu ile kapatılmıştır (Şekil 1.b). Kullanılacak Kapadokya Bölgesi volkanik atık tüf (KBVT) ve kireç uygulama öncesinde hazırlanmış, katkı malzemeleri alanda tartılmıştır. Yapılara uygulanmak üzere enjeksiyon şerbeti üretimi gerçekleştirildikten sonra, bu şerbetin laboratuvar ortamında üretilen malzemelerde olduğu gibi sınır değerleri sağlayıp sağlamadığını kontrol etmek amacıyla ASTM D6910 [15]'da belirtilen Marsh Hunisi deneyi yardımıyla enjeksiyon malzemesinin akış süresi belirlenmiş ve sınır değerleri sağladığı tespit edilmiştir (Şekil 2.a). Yapılan ön hazırlıkların ardından enjeksiyon şerbeti basınç yardımıyla yığma-kaya oyma yapıdaki duvara enjekte edilmiştir (Şekil 2.b). Kılcal çatlaklar şırınga yardımıyla doldurulmuştur.

a)  b) 

Şekil 1- a)Yığma yapıda deliklere su enjekte edilmesi
b) Boşlukların cam macunu ile kapatılması

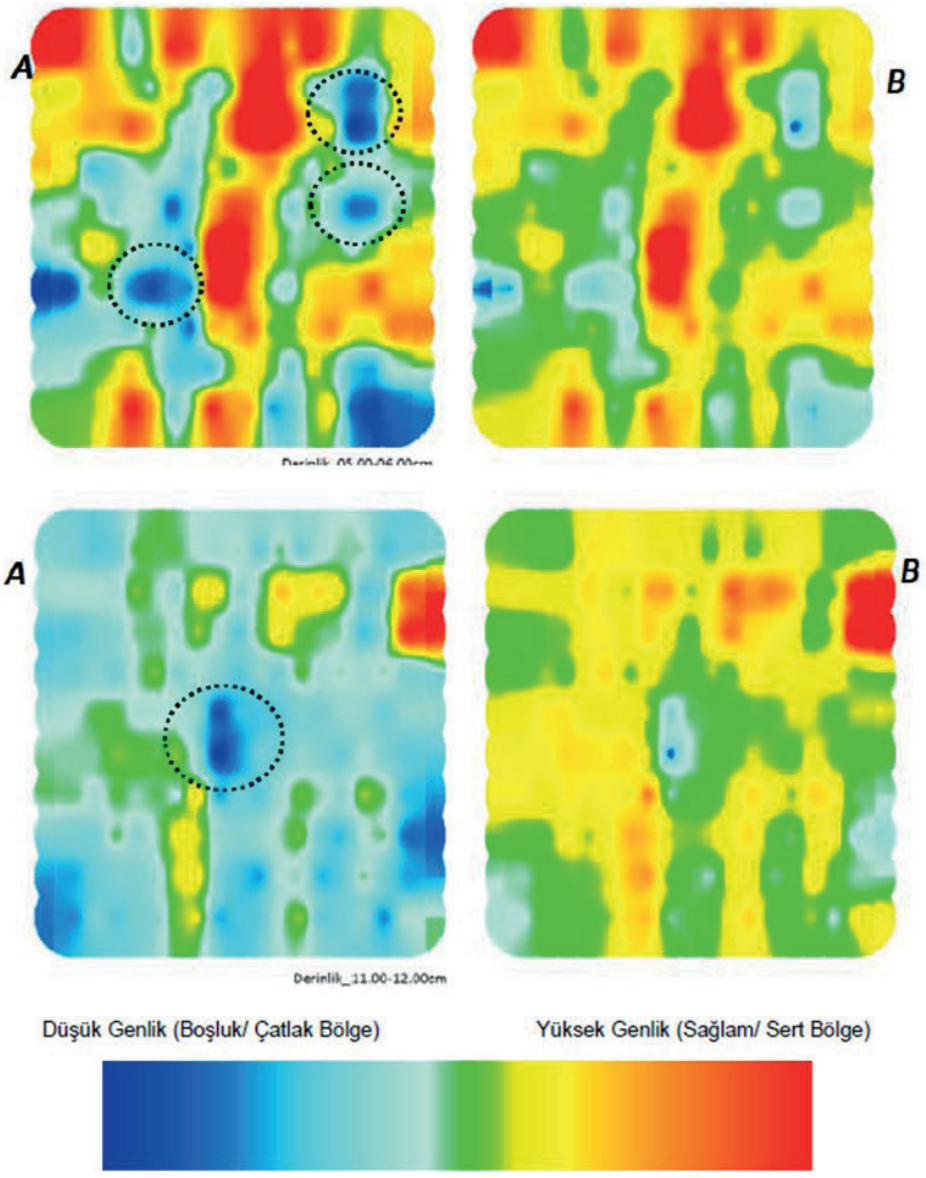


Şekil 2- a) Marsh hunisi deneyiyle akış süresinin belirlenmesi b)Enjeksiyon uygulaması c)Kılcal çatlakların doldurulması

Enjeksiyon işleminden önce ve yaklaşık 90 gün sonra enjeksiyon işleminin boşluklara ve çatlaklara olan etkisini belirlemek amacıyla yapı radar ölçümü gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Yapı radarı ölçümlerinin görselleri Şekil 4'te enjeksiyon öncesi ve sonrası durum için paylaşılmıştır. Buna göre, yığma yapıda georadar ile belirlenen enjeksiyon öncesi boşuklar %15 iken enjeksiyon uygulamasını müteakiben 90 gün sonra aynı bölgede belirlenen boşluk miktarı %2,5 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3- GPR (yapı radarı) ile yapıdaki süreksizliklerin (boşlukların) ölçümü



Şekil 4- Yığma&kaya oyma yapıda gözlemlenen yapı içi boşluklar (kesikli daire) a)Enjeksiyon öncesinde alınan ölçümlerden oluşturulan en kesit b)Enjeksiyon uygulamasından yaklaşık 90 gün sonra alınan ölçümlerden oluşturulan en kesit

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada Kapadokya Bölgesi'nin atık volkanik tüflerinden üretilen kireç esaslı enjeksiyon malzemesinin yerinde uygulamasına dair detaylar paylaşılmıştır. Bu çalışmanın temel kazanımları şu şekilde özetlenebilir:

- Seçilen karışım oranları ve karıştırma prosedürü ile akışkanlık, hacim sabitliği ve penetrasyon için standart ve literatürde verilen limit değerler sağlanmıştır. Deneysel çalışma, karışım oranlarının tamamıyla bağlayıcı türüne ve bunların fiziksel özelliklerine (örneğin tane büyüklüğü dağılımı ve özgül yüzey alanı) bağlı olduğunu göstermiştir.

- Laboratuvar deneyleri ile yapılan kalite kontrol testlerinden başarı ile geçen enjeksiyon malzemesi, gerekli kuruluş ve kurumlardan izin alınarak kaya oyma ve yığma yapıda uygulanmıştır. Yapılarda uygulama yapıldıktan sonra yerinde tekrar gözlem ve inceleme yapılmıştır. Enjeksiyon malzemesinin uygulandığı bölgede, çatlak, tuzlanma vb. hasar gözlenmemiştir.

- Tarihi yapı ile uyumlu enjeksiyon malzemesi üretiminde kullanılan deneysel yöntemlerin tutarlılığı, yerinde uygulama ile elde edilen sonuçlarla pekiştirilmiştir.

- Yığma yapıda yapı radarı ile belirlenen boşluk oranı enjeksiyon uygulaması sonrasında %15'ten %2,5'a azalmıştır. Boşluk oranının yapı radarı ile belirlenmesinin hem toplam kullanılan malzeme miktarının belirlenmesi hem de uygulamanın başarısını değerlendirilmesi için oldukça mühimdir.

Teşekkür

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'nün, FDK-2021-4781 ve FYL-2021-4160 numaralı projeleri ile Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) 118M321 kodlu projeleri tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

[1] Özata, Ş., and Arun, E. G., 2018. Damage Assessment of Rock-Cut Ortahisar Castle in Cappadocia Region. Gazi University Journal of Science, 31(1), 1–11.

[2] Bayram, M., (2021). Kapadokya Bölgesi Atık Volkanik Tüfünden Üretilmiş Enjeksiyon Malzemesinin Reolojik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[3] Özata, Ş., (2022). Kapadokya Bölgesi Volkanik Tüfünün Alkaliler ile Aktive Edilerek Tarihi Yığma Yapılarda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[4] Özata, Ş., (2015). Kapadokya Bölgesi Kaya Oyma Yapı Sorunları ve Çözüm Önerileri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[5] M. Bayram, D. Oktay, N. Yuzer, Evaluation of Fresh Properties and Rheological Behavior of lime-based Grouts with Cappadocia Waste Earth, International Journal of Architectural Heritage. (2022). https://doi.org/10.1080/15583058.2022.208901.

[6] S. Ozata, B. Akturk, N. Yuzer, Utilization of waste Cappadocia earth as a natural pozzolan in alkali activation: A parametric study, Constr Build Mater. 329 (2022). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127192.

[7] Dinç-Şengönül, B., Bayram, M., Oktay, D., & Yüzer, N. (2024). Valorization of Cappadocia waste earth in the production of sustainable lime-based grouts. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 38, 101503.

[8] Özata, Ş., Yüzer, N., Ulukaya, S., Aktürk, B., and Kızılkanat, A. B., 2019. Alkali Activation and Pozzolanic Activity of Waste Material Excavated from Rock-Cut Buildings of Cappadocia. 10th International Concrete Congress Proceedings (pp. 42–50).

[9] Oktay, D., (2017). Tarihi Kireç Harçlarına Uygun Enjeksiyon Malzemelerinin Üretilmesi ve Model Duvarlarda Uygulanmasının Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[10] Dinç-Şengönül, B., Oktay, D., & Yüzer, N. (2020). Effect of temperature, resting time and brick dust (Horasan) on the rheological properties of hydraulic lime-based grouts. Construction and Building Materials, 265, 120644.

[11] Uranjek, M., Bosiljkov, V., Žarnić, R. ve Bokan-Bosiljkov, V., (2012). "In Situ Tests and Seismic Assessment of a Stone-Masonry Building", Materials and Structures, 45(6): 861–879.

[12] Miltiadou-Fezans, A., Kalagri, A. ve Delinikolas, N., (2007). «Design of Hydraulic Grout and Application Methodology for Stone Masonry Structures Bearing Mosaics and Mural Paintings The Case of the Katholikon of Dafni Monastery», International Syposium Studies on Historical Heritage, Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey, 649-656.

[13] Vintzileou, E. ve Miltiadou-Fezans, A., (2008). "Mechanical Properties of Three-leaf Stone Masonry Grouted with Ternary or Hydraulic Lime-based Grouts", Engineering Structures., 30(8): 2265–2276.

[14] TS EN 459-1, (2015). Yapı kireci-Bölüm 1: Tarifler, özellikler ve uygunluk kriterleri, TSE, Ankara.

[15] ASTM D 6910, (2009). Standard Test Method for Marsh Funnel Viscosity of Clay Construction Slurries, ASTM, Pennsylvania.

[16] TS EN 445, (2012). ġerbet-Öngerilmeli Tendonlar Ġçin Deney Yöntemleri, TSE, Ankara.

[17] TS EN 447, (2012). ġerbet-Öngerilmeli Tendonlar Ġçin Temel Gerekler, TSE, Ankara.

[18] ASTM C 940, (2010). Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory, ASTM, Pennsylvania.

[19] BS EN 1771, (2004). Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures- Test Methods - Determination of Injectability and Splitting Tests, British Standards, United Kingdom.

[20] TS EN 1015-11, (2000). Kâgir harcı-Deney Metotları-Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Basınç ve Eğilme Dayanımının Tayini, TSE, Ankara.

NANOFİBER SELÜLOZ KATKILI KİREÇ ESASLI ENJEKSİYON MALZEMELERİNİN TASARIMI VE İNCELENMESİ

Ali SAYAR[1], Didem OKTAY [2]

[1]İnş. Müh., Yıldız Teknik Üniversitesi, ali.sayar@std.yildiz.edu.tr
[2]Dr. Öğr. Üyesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, dyasar@yildiz.edu.tr

Özet

Tarihi yapılardaki özgün harçlarda çeşitli liflerin ilave malzeme olarak kullanıldığı ve bu liflerin harçların fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirdiği bilinmektedir. Günümüzde yapı malzemelerinde sürdürülebilir nano malzemelere duyulan ihtiyaç araştırmacıları nanoselülozlara yönlendirmiştir. Bu çalışmada kireç esaslı ve nanofiber selüloz (NFS) katkılı enjeksiyon malzemeleri üretilerek malzemelerin taze ve sertleşmiş hal özellikleri incelenmiştir. Çalışmanın amacı; tarihi yapıların onarımında ve güçlendirilmesinde kullanılabilecek yeni bir kireç esaslı enjeksiyon malzemesi geliştirmektir. Deney sonuçlarına göre NFS ilavesi akışkanlık ve penetrasyon özelliklerini olumsuz etkilese de mekanik özellikleri ve rötre direncini ciddi oranda artırmaktadır. Ayrıca NFS'nin, doğal viskozite düzenleyici olarak çalıştığı ve sentetik katkı maddeleri yerine tercih edilebileceği görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Tarihi yapılar, Kireç esaslı enjeksiyon malzemesi, Nanofiber selüloz, Lif katkısı, Mekanik özellikler

Abstract

It is known that various fibers were used as additives in the original mortars of historical buildings and these fibers improved the physical and mechanical properties of the mortars. Today, the need for sustainable nanomaterials in building materials has led researchers to investigate nanocelluloses. In this study, nanofiber cellulose (NFS) incorporated lime-based grouts were produced and the fresh and hardened state properties of the materials were examined. The main purpose of the study is to develop a new lime-based grout that can be used for consolidation of historical buildings. According to the test results, although the addition of NFS negatively affects the fresh state properties, it significantly increases the mechanical properties and shrinkage resistance. It has also been observed that NFS works as a natural viscosity modifier and can be preferred over synthetic additives.

Keywords: Historical structures, Lime-based grout, Nanofiber cellulose, Fiber additive, Mechanical properties

1. Giriş

Tarihi yapılar, geçmişten günümüze kadar uzanan, inşa edildiği dönemin tarihi, kültürü, sosyolojisi, mimarisi, malzeme bilgisi, mühendislik anlayışı gibi pek çok alanda bilgi edinmemizi sağlayan kültürel değerlerdir. Her yapı gibi tarihi yapılar da çevre koşulları, doğal afetler, savaşlar, yapının kullanımına bağlı etkenler, tasarım ve yapım hataları, malzeme bozulması gibi çeşitli nedenlerle hasar görebilir. Sahip oldukları kültürel önem düşünüldüğünde tarihi yapıların onarımı ve güçlendirilmesi hassas bir konudur ve disiplinler arası ciddi bir çalıştırma gerektirir.

Tarihi yapıların onarımı ve güçlendirilmesi için farklı teknikler vardır, bu tekniklerden biri de enjeksiyon yöntemi (grouting)'dir. Enjeksiyon yöntemi (grouting), bağlayıcı malzemenin su ve çeşitli katkılarla karıştırılması sonucu elde edilen akıcı kıvamdaki enjeksiyon malzemesinin (grout), basınçla yığma duvardaki çatlakları ve boşlukları doldurması prensibine dayanan bir güçlendirme yöntemidir [1]. Enjeksiyon yönteminin genel amacı; yapıdaki özgün malzemeye uygun olarak üretilen enjeksiyon malzemesinin duvara açılan uygun deliklerden enjekte edilerek yapıdaki süreksizliklerin giderilmesi, çatlakların doldurulması ve mekanik dayanım özelliklerinin iyileştirilmesidir [2]. Enjeksiyon yönteminde dikkat edilmesi gereken en önemli husus yapıya enjekte edilecek malzemenin özgün harçla fiziksel, kimyasal ve minerolojik açıdan uyumlu olmasıdır.

Kireç esaslı harçlar, mekanik özelliklerinin çimento esaslı harçlara göre daha zayıf olması, hızlı su buharlaşmasına bağlı oluşan rötre çatlakları, moleküler arası zayıf kohezyon, kırılgan yapı, uzun priz süresi gibi bazı olumsuz özellikler göstermektedir. Kireç harçlarının ve kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin zayıf özellikleri bünyesinde lif içeren katkı maddeleri kullanılarak güçlendirilebilir. Lifler, özellikle malzemenin maksimum direncine ulaşıldığı yumuşama aşamasında dikiş etkisi yoluyla gerilme kuvvetlerini aktararak çatlakların başlamasını ve ilerlemesini önler [3]. Bu durum yapının yük altındaki basınç mukavemetini ve deprem, rüzgar gibi yanal etkiler altındaki eğilme mukavemetini artırarak yapının mekanik özelliklerinin güçlenmesini sağlar. Lif katkılı kireç esaslı enjeksiyon malzemeleri tarihi yapıların onarımında kullanıldığında hem yapıdaki boşluklar ve çatlaklar doldurularak monolitik bir yapı elde edilmekte hem de liflerin varlığı sayesinde yapının mekanik özellikleri güçlendirilmektedir.

Nanofiber selüloz (NFS), çeşitli bitki hücrelerinin çeperlerinden elde edi-

len selülozun, mekanik ve/veya kimyasal yollarla nano boyuta getirilmesi ile elde edilen, fizik, kimya, biyoloji, malzeme bilimi vb. pek çok alanda kullanılan bir nanoselüloz türüdür. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde NFS'nin harçlarda ve enjeksiyon malzemelerinde kullanımına dair pek çok çalışma olmasına rağmen kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinde NFS kullanımına dair herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. NFS katkısının kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinde de mekanik özelliklerin gelişmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

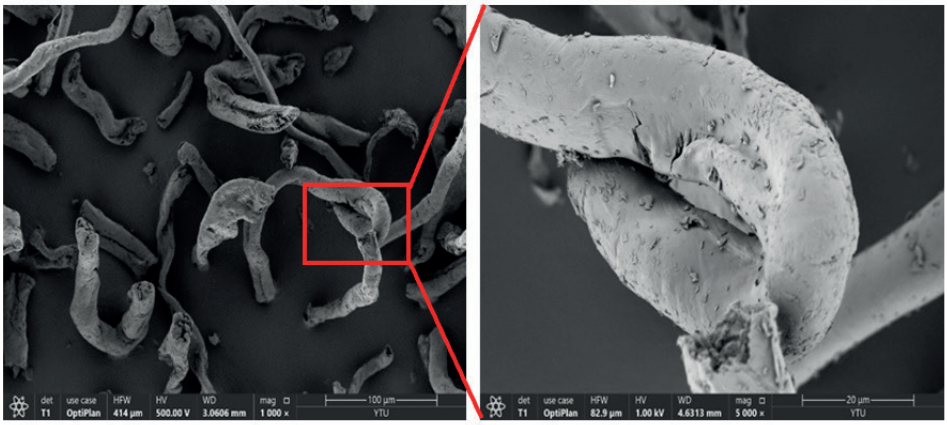
Bu çalışmanın temel amacı; NFS ilavesinin kireç esaslı enjeksiyon malzemelerine etkilerini araştırarak tarihi yapıların onarımında ve güçlendirilmesinde kullanılabilecek yeni bir enjeksiyon malzemesi geliştirmektir. Bu kapsamda ilk olarak enjeksiyon malzemelerinin taze halde sağlaması gereken akışkanlık, penetrasyon ve hacim sabitliği özellikleri deneysel çalışmalarla incelenerek serilerin karışım oranlarına karar verilmiştir. Tasarımı yapılan seriler tekrar üretilerek taze ve sertleşmiş hal özelliklerine ek olarak reolojik özellikleri ve içyapısı da incelenmiştir. Son olarak, elde edilen tüm veriler yorumlanarak NFS ilavesinin kireç esaslı enjeksiyon malzemelerine etkileri yorumlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1.Materyal

Çalışmada, tarihi yapılarda bulunan özgün malzemelerle olan fiziksel ve kimyasal uyumu, yeterli mekanik dayanımı, biyo-esaslı yapısı, geri dönüştürülebilir olması ve portland çimentosuna göre daha çevreci olması nedenleri ile NHL 5 (natural hydraulic lime) sınıfı doğal hidrolik kireç kullanılmıştır. Nanografi firmasından temin edilen, 10-20 nm çapında ve 2-3 µm uzunluğunda NFS, lif katkısı olarak kullanılmıştır. Liflerin geçirimli elektron mikroskobu (TEM) görüntüsü Şekil 1'de verilmiştir. Karışımlara kireç miktarının %0,1, %0,2 ve %0,3'ü oranında NFS ilave edilmiştir. Üretilen enjeksiyon malzemelerinin taze hal özelliklerinin sağlanması amacı ile karışımlarda süper akışkanlaştırıcı ve viskozite düzenleyici kimyasal katkı maddeleri kullanılmıştır. Enjeksiyon malzemelerinin akışkanlık ve penetrasyon özelliklerini sağlamak amacı ile süper akışkanlaştırıcı, yüksek oranda suyun neden olduğu terleme oranının dengelenebilmesi amacı ile de viskozite dü-

zenleyici katkı maddesi kullanılmıştır. Doğal hidrolik kirece ait kimyasal özellikler Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. NFS liflerinin TEM görüntüsü

Tablo 1. *NHL 5'in kimyasal bileşenleri*

Bileşenler (%)	**NHL 5**
CaO	54,9
SiO_2	9,3
Al_2O_3	2,6
MgO	2,4
Fe_2O_3	1,6
K_2O	0,8
TiO_2	0,2
Na_2O	0,1
P_2O_5	<0,1
MnO	<0,1
Cl	-
Kızdırma Kaybı	1,5

2.2. Enjeksiyon Malzemelerinin Üretimi

Çalışma kapsamında NFS ilavesinin kireç esaslı enjeksiyon malzemelerine etkilerini araştırmak amacı ile dört farklı numune üretilmiştir. Üretilen

ilk numunede NFS ilavesi yapılmamış ve referans olarak kabul edilmiştir. Diğer numunelerde NFS oranı sırasıyla %0,1, %0,2 ve %0,3'tür. Üretilen numunelerin karışım oranları Tablo 2'de verilmiştir. Kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin üretim ve karıştırma yöntemleri için herhangi bir standart olmaması sebebiyle literatürde bulunan daha önceki çalışmalar dikkate alınarak üretim ve karışım yöntemi belirlenmiştir [4]. Üretim ve karışım aşamaları aşağıda sıralanmıştır.

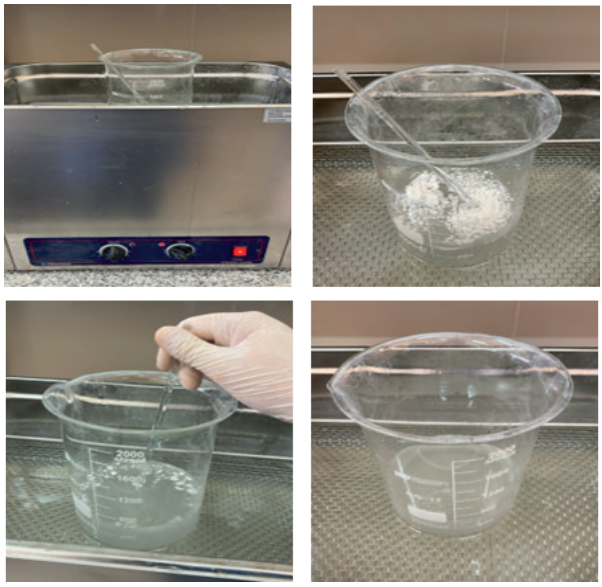
- Enjeksiyon malzemesinin üretiminde kullanılacak tüm malzemeler Tablo 2'de belirtilen oranlarda tartılarak hazırlanmıştır.
- Karışım suyunun %10'u kimyasal katkıların seyreltilmesi için ayrılmıştır.
- NFS ilavesi karışım suyuna dökülerek 1 saat boyunca ultrasonik banyoda karıştırılmış ve jel formuna getirilmiştir (Şekil 2).
- Karıştırma işlemi için spiral uçlu mekanik mikser kullanılmıştır.
- Spiral uçlu mekanik mikserin hızı karıştırma süreci boyunca sabit ve 800 rpm'dir.
- Topaklanmayı engellemek amacı ile 1 dakika kuru karıştırma yapılmıştır.
- Jel formdaki NFS karışım suyu içerisinde karışıma ilave edilmiştir.
- Karıştırma süresi toplam 13 dakika 30 saniyedir.
- Kimyasal katkılar 3. dakikadan itibaren 30 saniye içerisinde ilave edilerek 10 dakika daha karıştırılmış ve enjeksiyon malzemeleri elde edilmiştir.

Tablo 2. Enjeksiyon malzemelerinin üretiminde kullanılan malzemelerin ağırlıkça oranları (gr)

SERİ	Kireç	Su/Kireç	NFS	SA*	VD**
REF	1000	0,8	-	-	10
NFS 1	1000	0,8	1	18	-
NFS 2	1000	0,8	2	18	-
NFS 3	1000	0,8	3	18	-

*Süper Akışkanlaştırıcı

** Viskozite Düzenleyici



Şekil 2. NFS'nin ultrasonik banyoda su içerisinde dağıtılması

2.3. Deneysel Çalışmalar

2.3.1. Taze Hal Özelliklerinin Belirlenmesi

Enjeksiyon yönteminin telafisi mümkün olmadığından, konsolidasyon hatalarına sebep olarak yapıya zarar vermemek için tasarım aşamasında enjeksiyon malzemesinin taze halde akışkanlık, penetrasyon, hacim sabitliği gibi performans yeterliliklerini sağlaması gerekmektedir. Enjeksiyon malzemesinin akışkanlık özelliği ASTM D6910'da [5] belirtilen "Marsh Hunisi" ve TS EN445'te [6] belirtilen "Akış Konisi" deneyleri ile ölçülmüştür. Enjeksiyon malzemesinin enjekte edileceği yapıya nüfuz edebilme kabiliyeti olarak tanımlanan penetrasyon özelliği EN 1771'de [7] belirtilen "Kum Kolonu" deneyi ile ölçülmüştür. Malzemenin kıvamını ve hacmini değiştirerek akışkanlık ve penetrasyon kabiliyetlerini düşüren terleme özelliği ise TS EN 445 [6] ve ASTM C940 [8] referans alınarak ölçülmüştür.

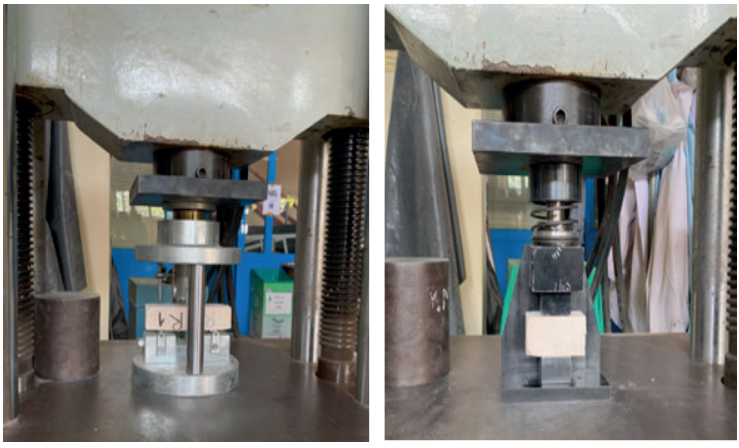
2.3.2. Reolojik Özelliklerin Belirlenmesi

Doğru bir enjeksiyon uygulaması için malzemenin reolojik özelliklerinin de incelenmesi gerekir. Reolojik özellikler rotasyonal bir reometre (Anton Paar

Reolab QC) ve tek eksenli silindirik uç kullanılarak incelenmiştir. Cihaza ait Rheoplus yazılımı kullanılarak serilere ait reolojik davranışlar elde edilmiştir. Enjeksiyon malzemesine ait eşik kayma gerilmeleri ve plastik viskozite değerleri Herschel-Bulkley modeli kullanılarak hesaplanmıştır.

2.3.3. Sertleşmiş Hal Özelliklerinin İncelenmesi

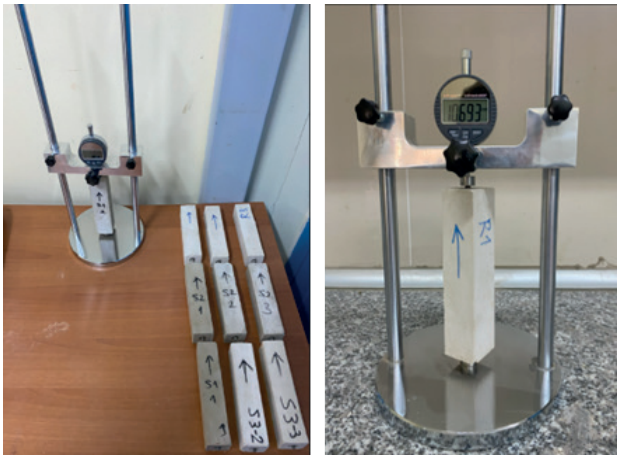
Taze hal özellikleri incelenen ve performans yeterliliğini sağlayan numunelerin ilk olarak fiziksel özellikleri incelenmiştir. Üretilen serilerin kılcal su emme katsayısı, ağırlıkça ve hacimce su emme oranları, özgül ağırlık, birim hacim ağırlık, porozite, kompasite gibi fiziksel özellikleri deneysel çalışmalarla belirlenmiştir. Deneyler numuneler üretildikten sonraki 28. günde yapılmıştır. Fiziksel özelliklerin ardından numunelerin mekanik özellikleri de incelenmiştir. Serilerin eğilme ve basınç dayanımları TS EN 1015-11'e [9] göre yapılan eğilme ve basınç dayanım deneyleri ile ölçülmüştür. Deney için üretilen numunelerin boyutları 40×40×160 mm'dir. Deneyler, numuneler üretildikten sonraki 28. ve 56. günde yapılmıştır (Şekil 3). Numuneler deney gününe kadar ilk 7 gün %90±5 nem 20±2°C'de sonrasında deney gününe kadar %65±5 nem 20±2°C'de ortamda bekletilmiştir. Eğilme deneyi sonucunda ortadan ikiye bölünen numuneler, 40 mm×40 mm ölçülerindeki çelik plakaların arasına yerleştirilerek basınç deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 3. Eğilme ve basınç dayanım deneyi

2.3.4. Kuruma Rötresinin Ölçülmesi

Kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin en büyük dezavantajlarından biri hızlı su buharlaşmasından kaynaklı oluşan kuruma rötresidir. Malzemenin büzülerek hacminin küçülmesi olarak tanımlanan rötre, yüksek oranlarda oluştuğunda enjeksiyon malzemesinin fiziksel yapısının bozulmasına neden olarak enjeksiyon uygulamasının kalitesini düşürebilir. Literatürde kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin rötre ölçümleri için özel bir standart bulunmadığından numunelerin boy değişim ölçümleri ASTM C-940'a [8] göre yapılmıştır. Numuneler 4×4×16 cm boyutlarında pimli kalıplarda üretilerek kalıptan çıkarıldıkları ilk gün 0. gün kabul edilmiş, standartta belirtilen günlerde boy değişimleri ölçülerek kaydedilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Rötre ölçümü

2.3.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-EDS) ile İçyapının İncelenmesi

Üretilen enjeksiyon malzemelerinin içyapısını görüntülemek amacı ile uygun ebatlarda numuneler çıkarılarak şeffaf epoksi reçineden tabanlık yapılmış daha sonra altın kaplama yapılarak Zeiss marka EVO LS10 model taramalı elektron mikroskobu kullanılarak kesitler incelenmiştir. Serilerin kimyasal yapılarını incelemek amacı ile uygun noktalardan enerji dağılımlı spektroskopi (EDS) yapılmıştır.

3. Bulgular

3.1. Taze Haldeki Enjeksiyon Malzemesi Deney Sonuçları

Üretilen enjeksiyon malzemelerinin taze haldeki özelliklerini belirlemek amacı ile akışkanlık, penetrasyon ve hacim sabitliği deneyleri yapılmıştır. Üretilen tüm seriler enjeksiyon malzemelerinin taze halde sağlanması gereken sınır koşullarını sağlamaktadır. Deneylere ait sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Enjeksiyon malzemelerinin taze hal deney sonuçları

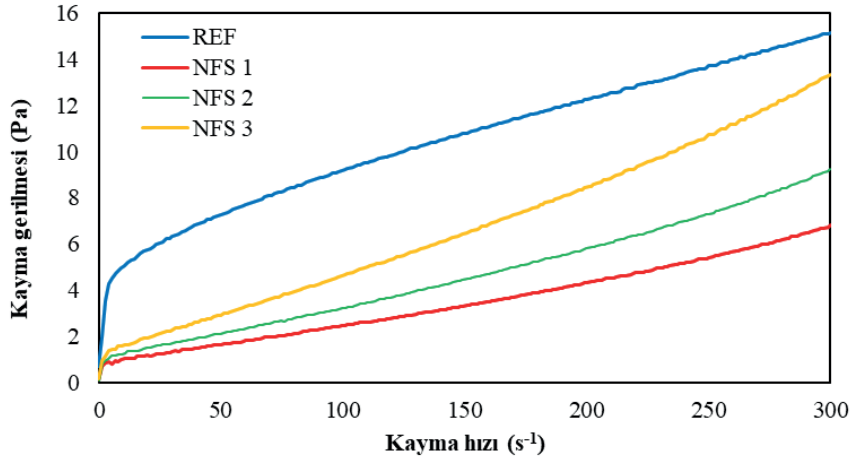
SERİ	Akış Konisi (sn)	Marsh Hunisi (sn)	T_{36} (sn)	Enjekte Edilebilirlik	Terleme Oranı (%)
REF	10	24	4	Kolay	3,8
NFS 1	10	25	5	Kolay	4,5
NFS 2	10	29	6	Kolay	3,7
NFS 3	11	34	7	Uygulanabilir	3,6
Limit	*≤ 25 sn*	*≤ 45 sn*	*<50*		*<5*

3.2.Reolojik Özelliklerin İncelenmesi

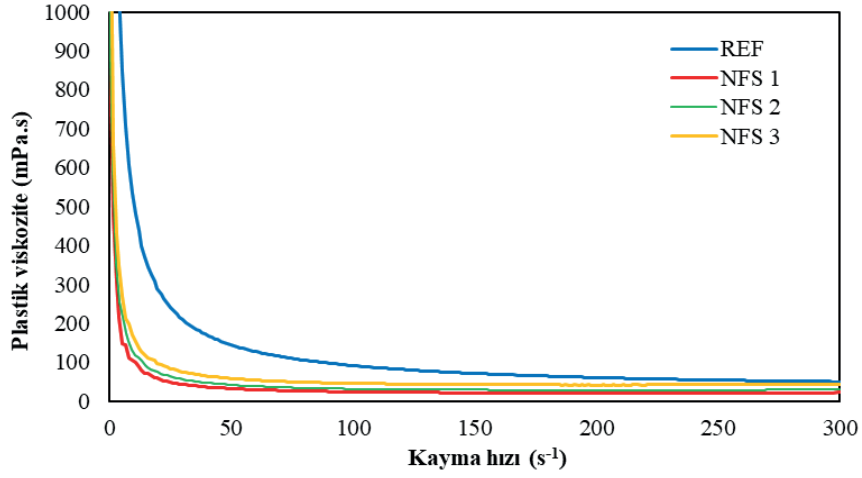
Malzemelerin reolojik davranışı dikkate alınarak seçilen Herschel-Buckley modeline göre hesaplanan reolojik parametreler Tablo 4'te verilmiştir. Enjeksiyon malzemelerinin reolojik ölçümlerinden elde edilen akış ve viskozite eğrileri Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. Tüm serilerde R değeri 0,98'in üzerinde sağlanmıştır.

Tablo 4. Herschel-Buckly modeline göre hesaplanan reolojik parametreler

SERİ	Eşik Kayma Gerilmesi (τ_0) (Pa)	Kararlılık İndeksi (K)	Akış İndeksi (n)
REF	2,99	0,430	0,58
NFS 1	0,96	0,005	1,24
NFS 2	1,21	0,006	1,25
NFS 3	1,49	0,012	1,21



Şekil 5. Enjeksiyon malzemelerine ait akış eğrileri



Şekil 6. Enjeksiyon malzemelerine ait viskozite eğrileri

3.3. Serleşmiş Hal Özelliklerinin İncelenmesi

3.3.1. Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

Enjeksiyon malzemelerinin temel fiziksel özellikleri deneysel çalışmalara ait bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır. Deneyler üretimden sonraki 28. günde yapılmıştır. Deney sonuçları Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Fiziksel özellikler deney sonuçları

SERİ	Birim Hacim Ağırlık (g/cm³)	Özgül Ağırlık (g/cm³)	Ağırlıkça Su Emme (%)	Hacimce Su Emme (%)	Porozite (%)	Kılcal Su Emme Katsayısı (kg/(m².√sn)
REF	0,96 ±0,0	2,55	63,5 ±0,7	60,9±0,5	62,4±0,1	1,08 ± 0,19
NFS 1	0,97 ±0,0	2,64	61,6 ±0,4	60,0 ±0,4	63,0±0,0	0,46 ± 0,02
NFS 2	0,96 ±0,0	2,60	61,9 ±0,4	59,5 ±0,4	63,1±0,0	0,47 ± 0,03
NFS 3	0,95 ±0,0	2,59	60,8 ±0,1	58,0 ±0,4	63,2±0,2	0,68 ± 0,03

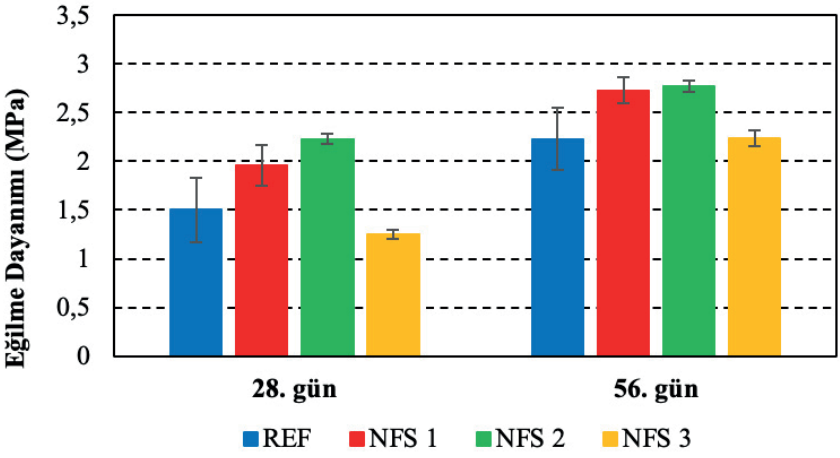
3.3.2. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Enjeksiyon malzemelerinin eğilme ve basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Sonuçlar üretilen tüm serilerin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

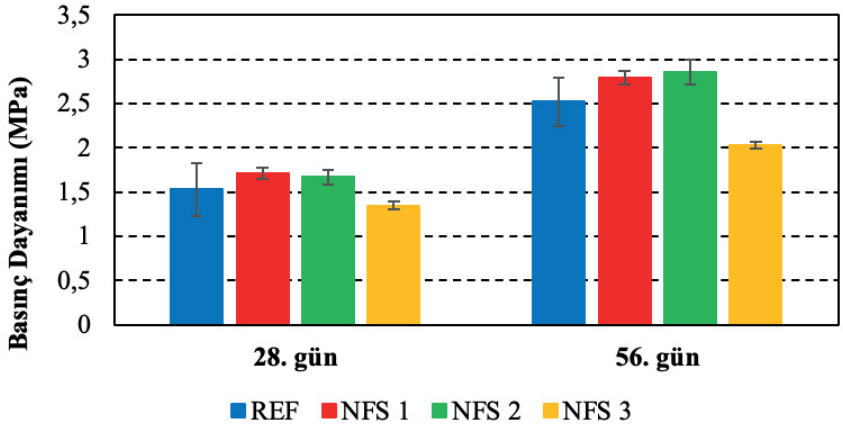
28. gün deney sonuçlarında REF'e kıyasla NFS 1 serisinde % 31, NFS 2 serisinde %49 daha yüksek dayanım elde edilmiştir. 56. gün deney sonuçlarında NFS 1 serisi REF'e kıyasla %22, NFS 2 serisi ise %24 daha yüksek dayanım göstermiştir. Serilerin incelenen bir diğer mekanik özelliği basınç dayanımıdır. 28. ve 56. günlerde yapılan basınç dayanım deneylerinde de NFS katkılı seriler REF'e oranla daha fazla dayanım göstermiştir. NFS 1 serisi REF'e oranla 28. günde %12, 56. günde %10 daha yüksek dayanım gösterirken bu oranlar NFS 2 serisi için 28. günde %9, 56. günde ise %14'tür. NFS 3 serisinde yapılan tüm deneylerde referans seriye kıyasla daha düşük dayanımlar elde edilmiştir. Bu durumun, yüksek oranda NFS'nin matris içerisinde homojen olarak dağılamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 6. Eğilme ve basınç dayanımı deney sonuçları

SERİ	$f_{eğilme}$ (28.gün) (MPa)	$f_{eğilme}$ (56.gün) (MPa)	$f_{basınç}$ (28.gün) (MPa)	$f_{basınç}$ (56.gün) (MPa)
REF	1,50 ± 0,33	2,23 ± 0,32	1,53 ± 0,30	2,52 ± 0,27
NFS 1	1,96 ± 0,21	2,73 ± 0,13	1,71 ± 0,06	2,79 ± 0,08
NFS 2	2,23 ± 0,05	2,77 ± 0,06	1,67 ± 0,08	2,86 ± 0,14
NFS 3	1,25 ± 0,05	2,24 ± 0,08	1,35 ± 0,05	2,03 ± 0,04



Şekil 7. Enjeksiyon malzemelerinin eğilme dayanımları

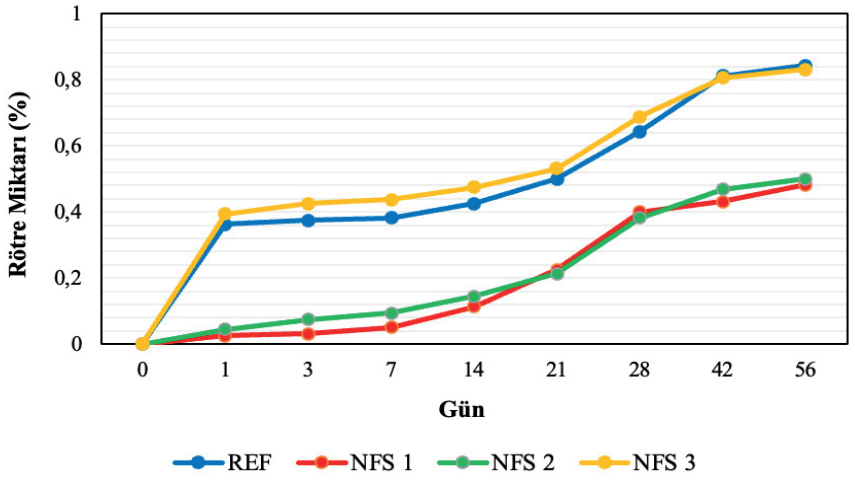


Şekil 8. Enjeksiyon malzemelerinin basınç dayanımları

3.3.3. Kuruma Rötresi Ölçüm Sonuçları

Serilerin rötre ölçümleri, ASTM C-940'a [8] göre ölçülmüştür. Serilerin kalıptan çıkarıldıkları ilk gün 0. gün kabul edilerek ilk kez ölçüm yapılmış daha sonra 1. 3. 7. 14. 21. 28. 42. ve 56. günlerde de ölçüm yapılarak boy farkları hesaplanmıştır. Sonuçlar Şekil 9'da verilmiştir. Sonuçlar tüm serilerin boy değişimlerinin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

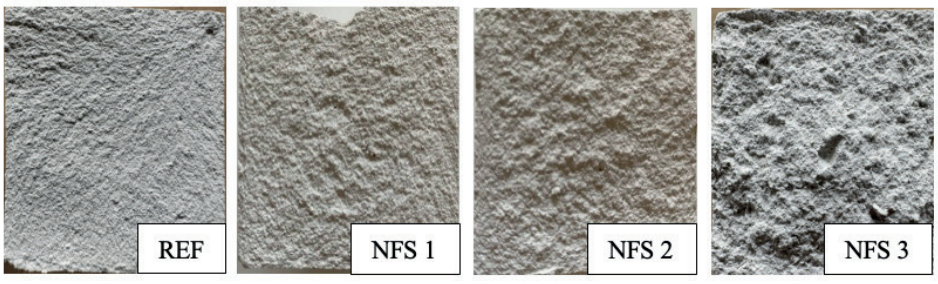
Kuruma rötresi ölçümleri sonucunda NFS katkılı enjeksiyon malzemelerinin katkısız olana göre %43 daha az rötre yaptığı ortaya çıkmıştır. Topaklanma gözlenen NFS 3 serisinde ise referans seriye benzer şekilde yüksek rötre değerleri ölçülmüştür. Rötre davranışı açısından da optimum katkı oranı önem taşımaktadır.



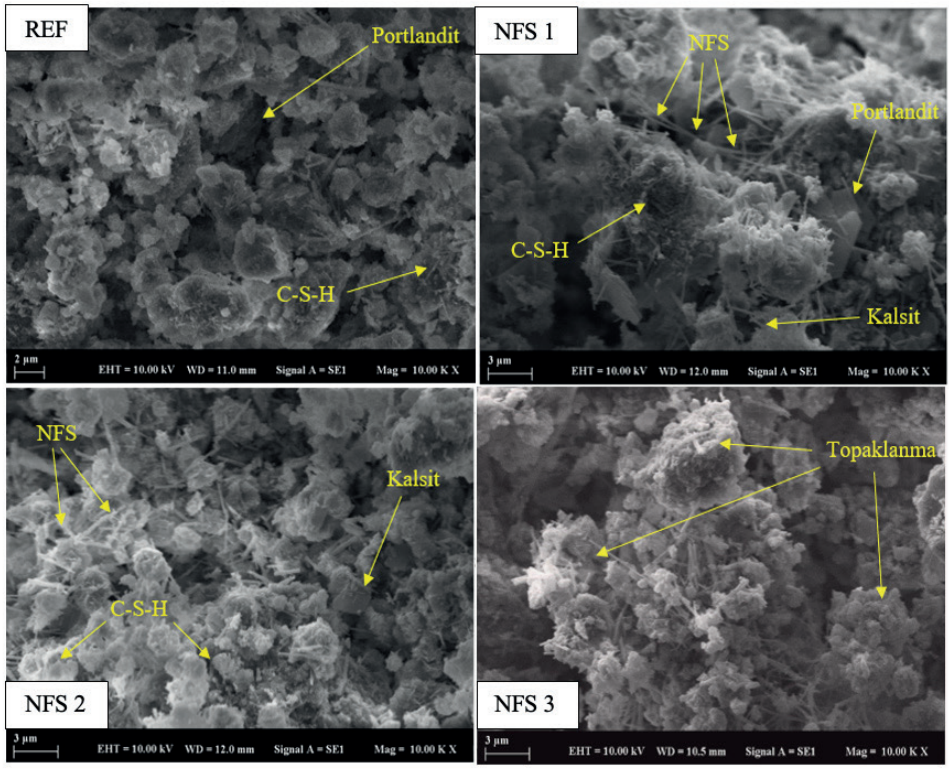
Şekil 9. Enjeksiyon malzemelerinin rötre ölçümleri

3.3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-EDS) ile İçyapının İncelenmesi

Enjeksiyon malzemelerinin 28. günde yapılan eğilme testi sonrasında numunelerin kırılma yüzeylerine ait fotoğraflar Şekil 10'da verilmiştir. Enjeksiyon malzemelerinin SEM görüntüleri Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 10. Enjeksiyon malzemelerinin kesit görüntüleri



Şekil 11. Enjeksiyon malzemelerinin SEM analizi

Serilerin SEM analizinde hidratasyon tepkimeleri sonucu oluşması beklenen portlandit ($Ca(OH)_2$), kalsit ($CaCO_3$) ve C-S-H jellerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. NFS 1 serisinde liflerin homojen şekilde dağıldığı ve dikiş etkisi yoluyla yükü aktaracak köprüler kurduğu, NFS 2 serisinde liflerin oldukça yoğunlaştığı ancak homojen dağılımın devam ettiği görülmektedir. NFS 3 serisinde ise liflerin topaklanarak kümeler oluşturduğu ve homojen dağılmadığı görülmektedir. Bu durum liflerin istenildiği gibi çalışmamasına ve mekanik özelliklere etki etmemesine veya negatif etki etmesine yol açmaktadır [10].

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, tarihi yapıların onarımında ve güçlendirilmesinde kullanılan kireç esaslı enjeksiyon malzemelerine nanofiber selüloz katkısının etkilerini araştırmak amacı ile dört farklı enjeksiyon malzemesi gelişti-

rilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarla, üretilen enjeksiyon malzemelerinin fiziksel, reolojik, mekanik özellikleri ve rötre davranışı incelenerek NFS katkısının kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerine etkileri belirlenmiştir. Çalışma sonunda elde edilen tüm bilgiler ışığında ulaşılan sonuçlar ve sunulan öneriler aşağıda sıralanmıştır.

- Enjeksiyon malzemelerinin taze halde sağlaması gereken üç temel özellik olan akışkanlık, penetrasyon ve hacim sabitliği limit değerleri sağlamıştır.
- NFS katkısı kullanılan hiçbir seride viskozite düzenleyici katkı maddesine ihtiyaç duyulmamıştır. Bu bakımdan NFS, hacim sabitliği özelliğini dengelemede viskozite düzenleyici kimyasal katkı maddeleri yerine tercih edilebilecek doğal bir alternatiftir. Reolojik özellikler incelendiğinde, NFS ilavesi plastik viskozite ve eşik kayma gerilmesi değerlerini düşürmektedir.
- NFS katkısının temel fiziksel özelliklere etkileri incelendiğinde kılcallıkla su emilimini düşürdüğü görülmüştür. Diğer fiziksel özelliklere belirgin bir etkisi görülmemiştir. Boşlukların büyük çoğunluğu dışa açıktır. NFS katkısının toplam boşluk miktarına belirgin bir etkisi görülmemiştir.
- Serilerin 28. ve 56. günlerinde yapılan eğilme dayanım deneyleri sonucunda NFS ilavesinin kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin eğilme ve basınç dayanımını artırdığı görülmüştür.
- Mekanik deney sonuçlarında dikkat edilmesi gereken bir diğer husus optimum karışım oranlarının belirlenmesidir. %0,3 oranında NFS katkısı içeren seri hem eğilme dayanımında hem de basınç dayanımında tüm serilerden daha düşük bir performans göstermiştir. Bu durum liflerin topaklanması sonucu dağılımın uniform olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle enjeksiyon malzemesi tasarlanırken bu durum göz önünde bulundurularak optimum katkı oranına karar verilmelidir. Bu çalışma için optimum NFS katkısı %0,2 olarak belirlenmiştir.
- Kuruma rötresi ölçümleri sonucunda NFS katkılı enjeksiyon malzemelerinin katkısız olana göre daha az rötre yaptığı ortaya çıkmıştır. Topaklanma gözlenen NFS 3 serisinde ise referans seriye benzer şekilde yüksek rötre değerleri ölçülmüştür. Rötre davranışı açısından da optimum katkı oranı önem taşımaktadır.

Bütün deneysel çalışmalar sonucunda, optimum miktarda kullanılan NFS katkısının kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin mekanik performansını düşük oranda da olsa artırması, rötre büzülmelerinden kaynaklanan çatlaklara karşı dayanım sağlaması ve hacim sabitliği özelliğini dengelemesi gibi olumlu katkılar sunduğu görülmüştür. Küresel ısınma, iklim değişikliği ve çevre kirliliğinin büyük sorunlar oluşturduğu günümüzde biyo-esaslı, yenilenebilir ve sürdürülebilir yapı malzemeleri büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle NFS ve diğer lifli katkı maddelerinin araştırılması, geliştirilmesi ve yapı malzemelerinde kullanımı inşaat sektörü için umut verici bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

Teşekkür

Çalışmamızı FYL-2023-5642 numaralı araştırma projesi ile destekleyen Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

[1] Baltazar, L.G., Henriques, F.M.A. ve Cidade, M.T., (2019). "Rheology of Natural Hydraulic Lime Grouts for Conservation of Stone Masonry-Influence of Compositional and Processing Parameters" Fluids, Vol.4: 13.

[2] Binda, L., Saisi, A. ve Tedeschi, C., (2006). ''Compatibility of Materials Used for Repair of Masonry Buildings: Research and Applications'', Fracture and Failure of Natural Building Stones - Applications in the Restoration of Ancient Monuments, Springer, ISBN: 1-4020-5076-3, Netherlands.

[3] Yao, W., Li, J. ve Wu, K., (2003). "Mechanical Properties of Hybrid Fiber-Reinforced Concrete at Low Fiber Volume Fraction" Cement and Concrete Research Vol. 33, Issue 1: 27-30.

[4] Baltazar, L.G., Henriques, F.M.A., Jorne, F. ve Cidade, M.T., (2013). "The use of Rheology in the Study of the Composition Effects on the Fresh Behaviour of Hydraulic Lime Grouts for Injection of Masonry Walls," Rheologica Acta, Vol. 52(2): 127-138.

[5] ASTM D 6910, (2009). Standard Test Method for Marsh Funnel Viscosity of Clay Construction Slurries, ASTM, Pennsylvania.

[6] TS EN 445, (2012). Şerbet-Öngerilmeli Tendonlar İçin Deney Yöntemleri, TSE, Ankara.

[7] BS EN 1771, (2004). Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures - Test Methods - Determination of Injectability and Splitting Tests, British Standards, United Kingdom.

[8] ASTM C 940, (2010). Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory, ASTM, Pennsylvania.

[9] TS EN 1015-11, (2000). Kâgir harcı-Deney Metotları-Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Basınç ve Eğilme Dayanımının Tayini, TSE, Ankara.

[10] Santarelli, M. L., Sbardella, F., Zuena, M., Tırıllo, J. ve Sarasını, F., (2014). "Basalt Fiber Reinforced Natural Hydraulic Lime Mortars: A Potential Bio-Based Material for Restoration", Materials&Design Vol: 63: 398-406

28 EYLÜL 2024

7. ULUSLARARASI TARİHİ YAPILARIN GÜÇLENDİRİLMESİ VE GELECEĞE GÜVENLE DEVRİ SEMPOZYUMU

7. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRENGTHENING HISTORICAL BUILDINGS AND TRANSFERRING THEM SAFELY TO THE FUTURE

7. SEMPOZYÛMA NAVNETEWEYÎ LI DERBARÊ QEWÎKIRIN Û PARASTINA AVAHÎYÊN DÎROKÎ

DİYARBAKIR, SEZAİ KARAKOÇ KÜLTÜR MERKEZİ

A SALONU - 4A OTURUMU

Oturum Başkanları
Mehmet Ali Taşdemir, Ahmet Onur Özergene

Tarihi Yığma Yapıların Sismik Değerlendirmesi ve Güçlendirilmesi için Modelleme Stratejileri
Lagomarsino, S.

Tarihi Gümüşhane Kamberli Köprüsü'nün Sismik Davranışının İncelenmesi
Oğuzhan Uğurlu, Atakan Yıldırım, Ahmet Muhammet Mecit Işık, Oğuzhan Çelebi, Mahmut Kılıç, Abdulkadir Cüneyt Aydın

Tarihi Yığma Yapıların Sismik Analizine Yönelik Prosedürler
Cesar Alfonso Alanoca Chambi, Rashid Mangushev, Lidia Kondratieva

Tekirdağ Rüstem Paşa Camii'nin Yapısal Analizi, Koruma ve Güçlendirme Önerileri
Selin Koca, Ahmet Bal

Kohezif Ara Yüzey Elemanlar ile Modellenen Dairesel Yığma Kemerlerinin Kırılma Mekanizmalarının Belirlenmesi
Sedat Kömürcü

TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI ANKARA ŞUBESİ
TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI DİYARBAKIR ŞUBESİ
ODEYA ENDAZYARÊN AVAHÎYÊ

TARİHİ GÜMÜŞHANE KAMBERLİ KÖPRÜSÜNÜN SİSMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Oğuzhan UĞURLU[1], Atakan YILDIRIM[2], Ahmet Muhammet Mecit İŞİK[3], Oğuzhan ÇELEBİ[4], Mahmut KILIÇ[5], Abdulkadir Cüneyt AYDIN[6]

[1]Arş. Gör., Atatürk Üniversitesi, oguzhan.ugurlu@atauni.edu.tr
[2]Arş. Gör., Atatürk Üniversitesi, atakan.yildirim@atauni.edu.tr
[3]İnş. Müh., Atatürk Üniversitesi, m.ahmetmecit@gmail.com
[4]Arş. Gör. Dr., Atatürk Üniversitesi, celebioguzhan@atauni.edu.tr
[5]Doç. Dr., Atatürk Üniversitesi, mahmut.kilic@atauni.edu.tr
[6]Prof. Dr., Atatürk Üniversitesi, acaydin@atauni.edu.tr@atauni.edu.tr

Özet

Bu çalışmada Gümüşhane İlinde bulunan Tarihi kemer yığma Kamberli köprüsünün deprem analizi yapılarak yapısal davranışının tespit edilmesi suretiyle gerektiğinde güçlendirme prosedürlerinin önerilmesi amaçlanmıştır. Kamberli köprüsüne son zamanlarda ülkemizde meydana gelen 06 Şubat 2023 Tarihli Kahramanmaraş merkezli depremler olan Elbistan, Pazarcık ve Nurdağı depremlerin etkisi altında zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler uygulanmıştır. Köprü yapısında oluşan ivme, yer değiştirme, basınç ve çekme gerilmeleri ve birim şekil değiştirme değerleri incelenmiştir. Çalışma sonunda köprü yapısının mesnetlerinde depremden kaynaklı oluşan çekme gerilmelerinin karşılanması için zemine güvenle yük aktarabilecek yüksek dayanımlı harçlarla birleşim yapılması gerektiği önerilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Güçlendirme, Kamberli Bridge, Kemer Formlu Yapı, Sismik Davranış, Yığma Yapı, Zaman Tanım Alanında Analiz.

Abstract

In this study, it was aimed to propose strengthening procedures when necessary by determining the structural behavior of the historical arch masonry Kamberli bridge in Gümüşhane Province by performing an earthquake analysis. Nonlinear analyzes in the time domain were applied to the Kamberli bridge under the effect of the Elbistan, Pazarcık and Nurdağı earthquakes, which are the Kahramanmaraş-centered earthquakes dated February 6, 2023, which occurred in our country recently. Acceleration, displacement, compressive and tensile stresses and strain values occurring in the bridge structure were examined. At the end of the study, it was suggested that the supports of the bridge structure should be combined with high-strength mortars that can safely transfer the load to the ground in order to meet the tensile stresses caused by the earthquake.

Keywords: Strenghtening, Kamberli Bridge, Arch Shape Structure, Seismic Behavior, Masonry Structure, Time Domain Analysis.

1. Giriş

Mevcut stratejik yapıların performansının incelenmesi ve ardından güçlendirmelerinin yapılması günümüzde yaygınlaşmıştır. Bazı Tarihi kemer köprüleri geçmişten günümüze kadar aktif olarak kullanılmaktadır. Genellikle ticaret geçiş yerleri olarak kullanılan Tarihi kemer köprü yapıları birçok depreme maruz kaldığı da düşünülmektedir. Bu tür yapıların sismik davranışlarının tahmini için birçok analiz yöntemi geliştirilmiştir [1]. Farklı yaklaşımlarla sunulan analiz yöntemlerinin kullanılmasıyla Tarihi köprü yapılarında sismik analizler yürütülmüştür [1,2]. Günümüzde halen daha stratejik yerlerde bulunan bu yapıların korunarak gelecek nesillere aktarılması önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Köprü yapılarının sonlu eleman modelleri mikro [3] ve makro [4] model olarak kurulmaktadır. Analizlerde her bir düğüm noktasından sonuçların alınması ve tüm bölmelerde ki gerilme dağılımlarının elde edilmesi için mikro modeller daha avantajlı olmaktadır. Ancak hesap karmaşıklığı ve analizlerin uzun sürmesi gibi olumsuz durumları mikro model kurulurken dikakte alınması da gereklidir [5]. Kemer formlu yığma köprü yapıların sismik davranışlarının belirlenmesi için sonlu eleman modelleri kurularak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler, dorusal olmayan kinematik analizler ve doğrusal olmayan statik analizler (pushover) uyugulanmıştır [1,2,6–8]. Ayrıca ivme ölçerler ve destekli yapı sağlığı izleme yazılımlarının kullanılmasıyla da operasyonel modal analizler de yürütülmüştür [9]. Günümüzde kemer formlu yığma köprü yapıların sismik değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi için birçok çalışma yürütülmüştür. Zampieri vd. (2015) üç açıklı yığma kemer köprüsünün sismik kırılganlıklarını belirlemişlerdir. Çalışma sonunda köprüde belirgin hasarların oluştuğu ve Sismik Güçlendirme Yönetim Çerçevesince (SRMF) köprünün güçlendirilmesi gerektiği önerilmiştir [6]. Rovithis ve Kyriazis (2016) Batı Yunanistan'ın Kefolanya Adasında bulunan 750 m uzunluğunda ki De Bosset yığma kemer köprüsünde birim şekil değiştirme esaslı doğrusal olmayan analizler uygulamışlardır. Analiz sonuçlarınca güçlendirme uygulamasının yapılmasına karar verilmiştir. Zemin iyileştirme, yapısal güçlendirme ve bozulmuş duvar bölümlerinin yeniden inşasını birleştiren güçlendirme yöntemi köprüde uygulanmıştır. Köprü güçlendirmenin verimliliği köprünün maruz kaldığı depremler sonrası yapılan performans analizi sonuçlarıyla ispatlanmıştır [10]. Hacıefendioğlu vd. (2017) tepki yüzey yöntemini kullanarak Monte Carlo Simülasyonu ile Samsunda bulunan 2 açıklıklı Kurt Köprüsünü rastgele yer hareketine göre olasılıksal analizini yürütmüşlerdir [11]. Özmen ve Sayın Elazığ sınırları içerisinde bulunan yığma kemer yapılı

Dutpınar Köprüsünde sismik değerlendirme yapmışlardır [12]. Tek açıklıklı köprüde Bingöl Depreminin verilerinin kullanılmasıyla zaman tanım alanında analizler uygulanmıştır. Çalışma sonunda köprü yapısında lokal hasarlar tespit edilmiştir [12]. Benzer bir çalışma olarak Malatya İlinde bulunan Veli Palas köprüsü sismik olarak değerlendirilmiştir [13]. Barbieri (2019) yığma kemer köprü yapılarının sismik kırılganlıklarının incelenmesi için iki yaklaşım geliştirmiştir [14]. Yaklaşımlardan ilki doğrusal olamyan statik analize karşılık gelen laboratuvar ortamında ki yıkıcı test metodudur. İki yöntem ise yer ivmesinin aşılmasının olasılıksal değerlerini tahmini sismik hasar görebilirlik ile ilişkilendirmeye dayanmaktadır [14]. Zampieri vd. (2021) 7 açıklığa sahip Claro River Köprüsünde malzeme ve geometriyi lineer olmayan malzeme olarak tanımlayarak köprünün sonlu elemanlar makro modelini kurmuşlardır. Sismik değerlendirme için çalışmada doğrusal olmayan statik itme analizini kullanmışlardır [15]. Saygılı ve Lemos (2021) kısa ve uzun açıklıklı iki yığma kemer köprünün sismik kırılganlıklarını zaman tanım alanında analiz yöntemiyle incelemişlerdir [16]. Çalışma sonuçları kısa açıklıklı köprünün uygulanan deprem ivme verilerine karşılık minimum hasar düzeyinde kaldığını ve uzun açıklıklı köprüde önemli miktarda sismik kırılganlığın izlendiğini göstermiştir [16].

Bu çalışmada Gümüşhane İlinde bulunan tek açıklıklı yığma kemerli Kamberli Köprüsü'nün sismik değerlendirmesi yapılmıştır. Köprü'nün sonlu elemanlar makro modeli bilgisayar tabanlı Ansys APDL (Ansys Inc., PA, USA) ortamında kurularak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler uygulanmıştır. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerde 06 Şubat Kahramanmaraş merkezli Elbistan, Pazarcık ve Nurdağı depremlerine ait istasyon verileri kullanılmıştır. Analiz parametreleri olarak, köprü yer değiştirmeleri, ivmeler, basınç gerilmeleri, çekme gerilmeleri ve birim şekil değiştirme değerleri dikkate alınmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

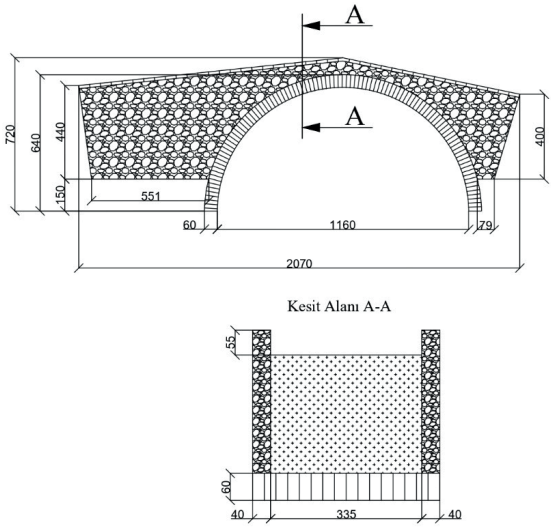
Materyal ve yöntem bölümünde yığma kemer köprü yapısı tanıtılmıştır. Köprü yapısının sonlu elemanlar modeli ve zaman tanım alanında analizler belirtilmiştir.

2.1. Köprü Yapısının Tanıtılması

40.4829 Enlem ve 39.4625 Boylamda, Trabzon – Gümüşhane yolunun 4. km'de Canca Mahallesinde konumlanan Kamberli köprüsü 19.yy'da inşa edildiği düşünülmektedir [17]. Köprü yapısı tek açıklıklı, kemer formlu ve yığma taş duvarlardan oluşmaktadır (Şekil 1). Köprünün kemer kısmı direk zeminle bağlantılı olduğu görülmektedir. Köprünün toplam uzunluğu 20.70 m, genişliği 5.15 m ve toplam yüksekliği 7.20 m'dir (Şekil 2).



Şekil 1- Kamberli köprü



Şekil 2- Köprünün enine ve boyuna kesit planları (ölçümler cm cinsindendir)

2.2. Sonlu Elemanlar Modeli

Köprü yapısının sonlu elemanlar modeli yapının sismik davranışının incelenmesi için oluşturulmuştur. Sonlu elemanlarda kullanılacak katı cismin oluşturulabilmesi için söz konusu köprünün rölevesi alınmıştır. Rölevesi alınan köprünün katı cisim modeli SOLIDWORKS 2019 (Dassault Systems, Massachusetts, USA) programında oluşturulmuştur. Bu katı model kemer, yığma duvarlar, dolgu malzemesi gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Köprünün katı cisim modeli, tarihi yığma yapıkların sonlu eleman modellerinde sıklıkla kullanılan makro modelleme tekniğine uygun olacak biçimde yapılmıştır [1,2, 4-16]. Makro modelleme tekniği, yığma yapılar için kullanılan taş/tuğla ve harcın mekanik özelliklerini birleştirerek tek bir kompozit yapı oluşturmayı sağlayan bir yöntemdir [1,2, 4-16]. Bu yöntemde, kompozit yapının mekanik özellikleri, taş/tuğla ve harcın mekanik özelliklerine bağlı farklı formülasyonlardan oluşmaktadır [8,18].

SOLIDWORKS'te oluşturulan katı cisim ANSYS programına aktarılmıştır. Kemer, yığma duvarlar ve dolgu malzemesinin eleman tipi 8 düğüm noktalı Solid65 seçilmiştir. Solid65, beton, yığma köprüler, yığma camiler vb. gevrek malzemeler davranışını oldukça iyi temsil eden bir eleman tipidir [7,12,18]. Kemer ve yığma duvarların malzeme modeli 4 parametreli William and Warnke modeli olarak seçilmiştir [18]. Bu malzeme modeli, gevrek malzemelerin çekme ve basınç davranışını iyi biçimde yansıtmakta olup yığma yapıların sismik tepkilerini simüle etmede sıkça kullanmaktadır. Köprünün içerisindeki dolgunun malzeme modeli ise Drucker-Prager olarak tercih edilmiştir [1,2]. Bu malzeme modeli dolgu malzemesinin elastik plastik davranışını çok iyi bir biçimde sergilemekte olup literatürde çokça kullanılmaktır. Kemer ve yığma duvarların malzeme özellikleri Gönen ve Soyöz [18] tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır. Dolgunun malzeme özellikleri ise Pela vd. [1] tarafından yapılan çalışmadaki veriler kullanılmıştır. Nümerik modelde kullanılan bütün malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1- Çalışmada kullanılan deprem kayıtlarına ait özellikler [1, 18]

Malzeme Özellikleri	Kemer	Yığma Duvarlar	Dolgu
f_c (MPa)	6.70	6.20	-
f_t (MPa)	0.88	0.80	-
E (GPa)	6.7	6.2	0.5

ρ (t/m^3)	2.54	2.5	1.8
ν	0.22	0.22	0.2
C(GPa)	-	-	0.05
ϕ (°)	-	-	20

Köprünün sonlu modelinin sonlu eleman ağı boyutu ortalama 0.4 m olarak seçilmiş ve yapıya uygulanmıştır. Yapının taş kütlesine oturan alt kısmı ve boyuna kesitinin sağ ve sol tarafları ankastre mesnet ile sabitlenmiştir. Köprünün doğrusal olmayan analizleri için köprünün sönüm oranı %5 olarak belirlenmiştir.

2.3. Zaman Tanım Alanında Analiz

Yığma kemer formu yapısına ait Kamberli köprüsünün sismik davranışının incelenmesi zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler uygulanmıştır. Yığma köprü yapısı için sabit sönüm oranı tüm modlar için %5 olarak alınmıştır. Zaman tanım alaında analizler için 06 Şubat 2023 Tarihinde Kahramanmaraş merkezüssü olarak meydana gelen Elbistan, Pazarcık ve Nurdağı deprem verileri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan depremlere ait tarih, istasyon, enlem, boylam, en yüksek ivme değeri (PGA) ve moment büyüklükleri (Mw) Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2- Çalışmada kullanılan deprem kayıtlarına ait özellikler [19]

Deprem	Tarih	İstasyon	Enlem	Boylam	PGA (g)	Büyüklük (Mw)
Elbistan	06.02.2023	Göksun	38.089	37.239	0.648	7.6
Pazarcık	06.02.2023	Pazarcık	37.288	37.043	2.07	7.7
Nurdağı	06.02.2023	Nurdağı	37.304	36.92	0.454	6.6

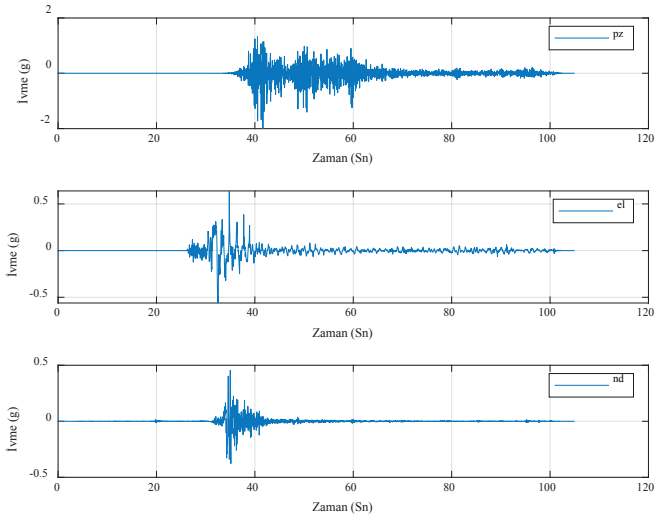
Kamberli kemer yığma köprüsünün Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 kapsamında zemin sınıfı az ayışmış kayaçlar (ZB zemin sınıfı) olarak kabul edilmiştir [20]. 40.829 Enlem ve 39.4625 Boylam lokasyonlarında olan köprünün ZB zemin sınıfının dikkate alınmasıyla DD-1 ve DD-2 deprem yer hareketi düzeylerindeki yerel deprem parametreleri Tablo 3'de verilmiştir. Tablo 3'de ki verilerin kullanılmasıyla yapıya ait yatay elastik ivme spektrumu eğrisi elde edilmiştir. Tablo 3'de gösterilen DD-1 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan deprem yer hareketi düzeyini, DD-2 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem yer hareketi düzeyini, S_{DS} kısa periyot tasarım ivme

spektral katsayısını, S_{D1} 1.0 sn periyot için tasarım spektral ivme katsayısını, S_S kısa periyot harita spektral ivme katsayısını, S_1 1.0 sn periyot için harita spektral ivme katsayısını ve PGA ise en yüksek yer ivmesini temsil etmektedir [20].

Tablo 3- Kamberli köprü yapısının yerel deprem parametreleri [19]

Deprem yer hareketi düzeyi	S_{DS}	S_{D1}	S_1	S_S	PGA (g)
DD-1	0.763	0.211	0.264	0.848	0.355
DD-2	0.384	0.119	0.149	0.427	0.183

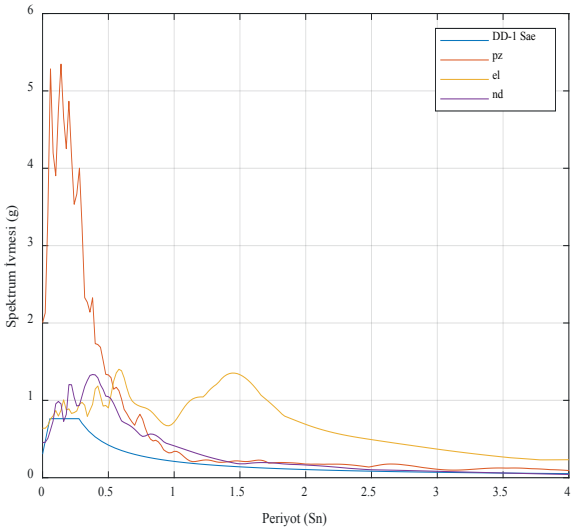
Şekil 3'de depremlere ait ivme zaman grafikleri ve Şekil 4'de deprem spektrumlarının Kamberli köprü yapısına ait yatay elastik ivme spektrumlarıyla birlikte çizdirilmiş durumları verilmiştir.



Şekil 3- Çalışmada kullanılan depremlere ait ivme zaman grafikleri

Şekil 3'te Pazarcık depremi (pz) 42.sn de en büyük yer ivmesi değeri 2.07g'yi, Elbistan depremi 35.sn'de en büyük yer ivmesi değeri 0.639 g'yi ve Nurdağı depremi ise 38.sn de 0.353 g'yi oluşturduğu görülmektedir. Tablo 3'de yapıya ait en yüksek ivme değeri olan 0.355 g değerini Elbistan ve

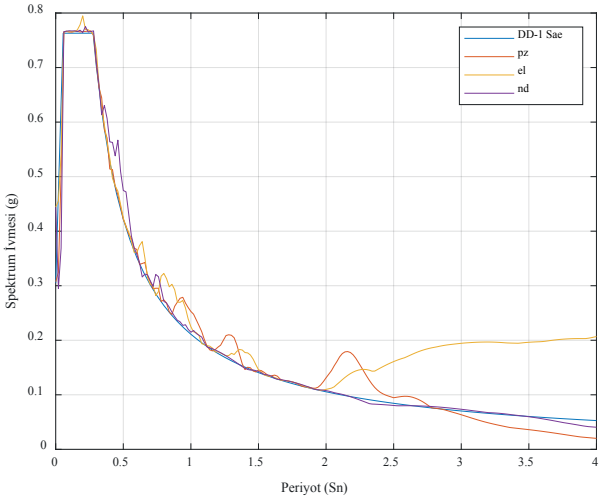
Pazarcık depremlerinin aştığı Nurdağı depreminin ise aşmadığı tespit edilmiştir.



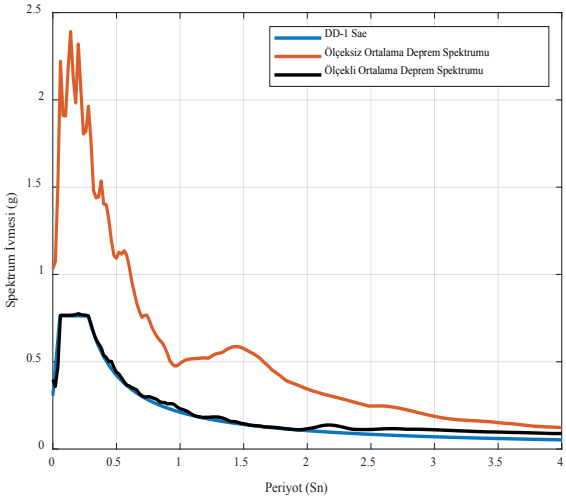
Şekil 4- Deprem spektrumları

TBDY 2018'e göre zaman tanım alanında yapılacak analizlerde kullanılmak üzere deprem yer hareketleri, seçilen deprem kayıtlarının yatay elastik ivme spektrumuna uyuşum sağlanacak şekilde dönüştürülmesi gerekmektedir [20]. TBDY 2018'de dönüştürülen deprem yer hareketlerinin spektrumlarının ortalamaları, tüm periyotlar için tasarım spektrumu ordinatlarından daha küçük olmayacaktır ifadesi geçmektedir [20]. Şekil 4'te köşe periyot aralıklarında yani orta periyot aralıklarında Pazarcık, Elbistan ve Nurdağı depremlerine ait spektrum değerleri aynı aralıklarda yatay elastik ivme spektrumu değerlerini çok aşmakta olduğu görülmektedir. Bu durumda TBDY 2018 kapsamında deprem spektrumu eğrileri Şekil 5'te de gösterildiği gibi ölçeklenerek yatay elastik ivme spektrumuyla eşleştirilmiştir. Şekil 6'da da ölçekli ve ölçeksiz ortalama spektrum eğrilerinin yatay elastik ivme spektrumuyla beraber çizdirilmiş halleri sunulmuştur. Yatay elastik ivme spektrumunda yaklaşık 0.2 – 0.4 sn arasında 0.763g spektrum ivmesi ve aynı aralıkta 0.77g spektrum ivmesi ise ortalama deprem spektrumu ivmesi hesaplanmıştır. Ölçeksiz ortalama deprem spektrum ivmesi 0.14 sn'de 2.39 g olarak karşımıza çıkmaktadır. Burda ölçeknenen deprem spektrumlarına bağlı olarak yapının

zaman tanım alanında kullanılması gereken deprem ivme kayıtları da Şekil 7'de gösterildiği gibi hazırlanmıştır.



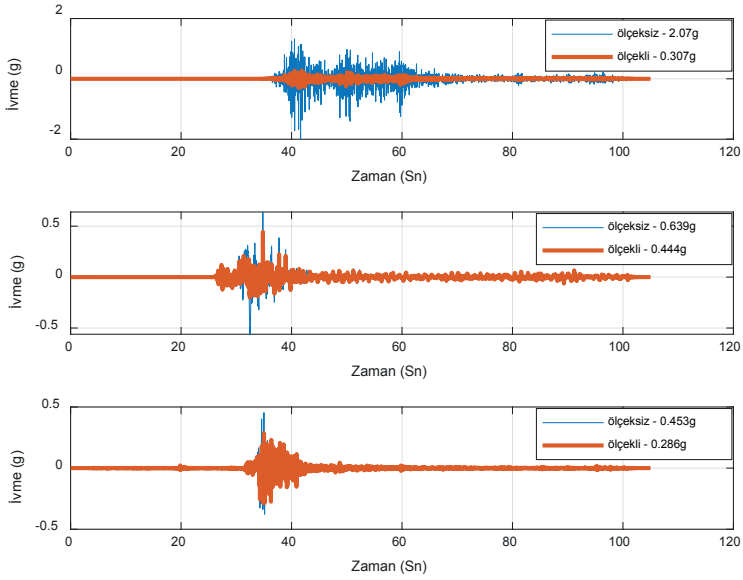
Şekil 5- Ölçeklendirilmiş deprem spektrumları



Şekil 6- Ortalama deprem spektrumları

Ölçeklenen deprem ivme verilerine göre oluşan en yüksek yer ivme değerleri Pazarcık, Elbistan ve Nurdağı depremleri için sırasıyla 0.307g, 0.444g ve 0.286g olarak elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan deprem yer

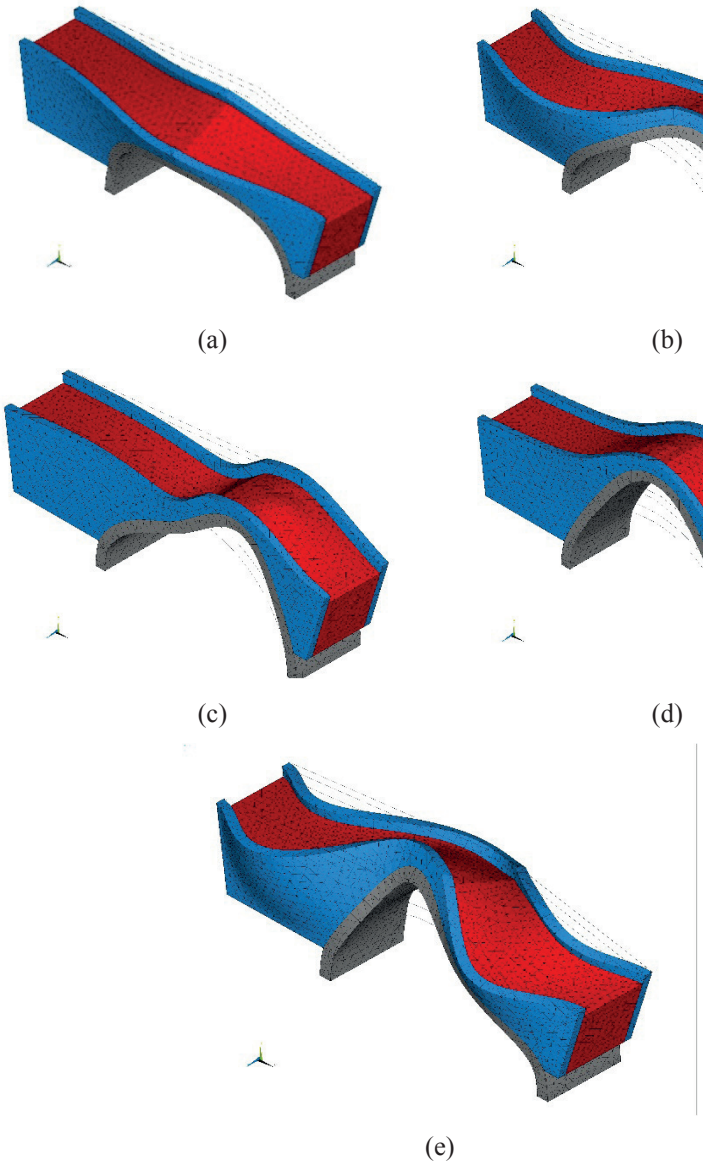
ivme değerlerinin ortalama en büyük değeri 0.346 g olarak hesaplanmıştır. Tablo 3'de PGA değerini yaklaşık olarak yakaladığı için ve spektrum uyumu sağlandığı için zaman tanım alanında bu deprem kayıtları kullanılmıştır.



Şekil 7- Ölçeklenmiş ivme zaman eğrileri

3. Analiz Sonuçları

Yığma kemer köprü yapısına zaman tanım alanında analizlerden önce ilk olarak modal analiz uygulanmıştır. Analiz sonuçları köprü yapısının 1.mod, 2.mod, 3.mod, 4.mod ve 5.mod frekanslarının sırasıyla 14.98 Hz, 23.11 Hz, 24.58 Hz, 26.63 Hz ve 32.4 Hz olduğunu göstermiştir. Eğilme modunda göçmesi planlanan köprü yapısı Tablo 3'de sunulan yerel deprem parametrelerine göre orta periyot dönemlerinde en büyük yer değiştirme ve ivme değerlerine maruz kalabliceği öngörülmüştür. Köprü yapısına ait mod şekilleri Şekil 8'de sunulmuştur. Köprünün tüm modlarının eğilme modu olduğu Şekil 8'den anlaşılmaktadır.



Şekil 8- Mod şekilleri; a) 1.mod, b) 2.mod, c) 3.mod, d) 4.mod, e) 5.mod

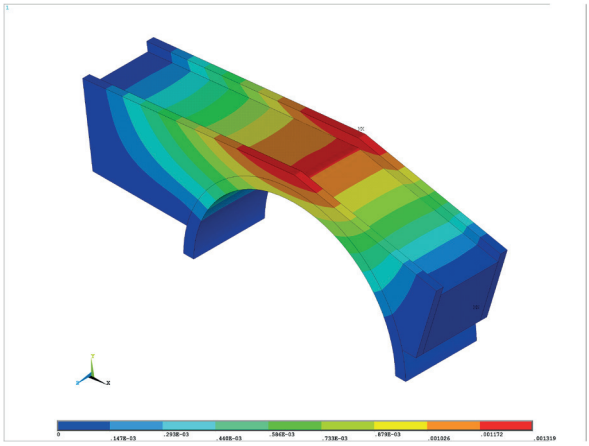
Köprü yapısının deprem davranışının belirlenebilmesi için Bölüm 2.3'te tanımlanan depremlerin etkisi altında zaman tanım alanında analizler uygulanmıştır. Zaman tanım alanında köprü yapısında oluşan basınç gerilmeleri, çekme gerilmeleri, birim şekil değiştirme değerleri, yer değiştirmeler

ve ivme değerleri elde edilmiştir. Tablo 3'te 3 farklı deprem verisinin köprü yapısında oluşturduğu gerilme, şekil değiştirme ve yer değiştirme değerleri sunulmuştur. Köprü yapısında en büyük yer değiştirme değerini Elbisatn depreminin 1.319 mm değeriyle oluşturduğu hesaplanmıştır. Çekme gerilmesini 0.66 MPa değeriyle Pazarcık depreminin ve basınç gerilmesini ise 1.21 MPa değeriyle Elbistan depreminin oluşturduğu belirlenmiştir. Köprü yapısında en büyük ivme değerini 0.613 g değeriyle Pazarcık depreminin ve şekil değiştirmenin en büyük değerini ise Elbisatn depreminin oluşturduğu tespit edilmiştir. Fraklı depremlerin köprü yapısında farklı büyüklükleri oluşturmasının nedeni depremin karakteristiklerinden ve yapının dinamikliğinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Tablo 4'te köprü yapısında ortalama olarak 1.125 mm yer değiştirme, 0.636 MPa çekme gerilmesi, 0.97 MPa çekme gerilmesi, 0.562 g ivme değeri ve 0.00032 şekil değiştirme değerleri verilmiştir.

Tablo 4- Köprü yapısında oluşan gerilme, şekil değiştirme, yer değiştirme ve ivme değerleri

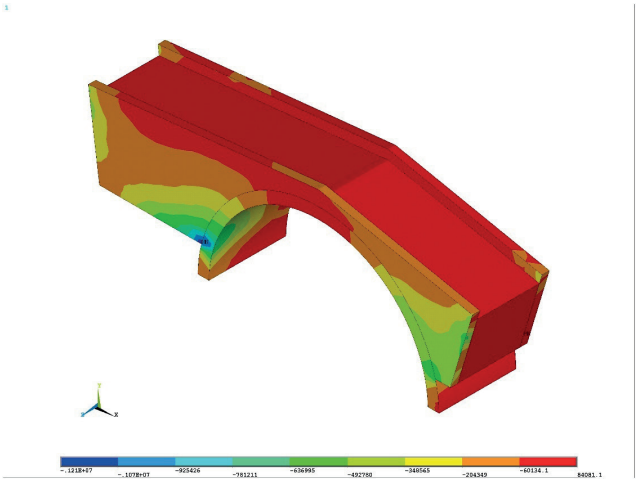
Depremler	Yer Değiştirme (mm)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Basınç Gerilmesi (MPa)	İvme (g)	Şekil Değiştirme (mm/mm)
el	1.319	0.61	1.21	0.483	0.00054
nd	1.059	0.64	0.88	0.591	0.00020
pz	-0.997	0.66	0.82	0.613	0.00022
Ortalama	1.125	0.636	0.97	0.562	0.00032

Şekil 9'da köprü yapısında Elbistan depreminden kaynaklı oluşan yer değiştirme dağılımları verilmiştir. Yer değiştirmelerin köprünün açıklık ortasında yani eğilme momentlerinin maksimum olduğu bölgede gözlemlenmiştir. Köprünün mesnetlerinde hareketin neredeyse hiç olmadığı tespit edilmiştir. Yer değiştirmelerin deprem etkisiyle en fazla salınım beklendiği yerlerde olması beklenen bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Celep ve Kumbasar, yığma yapılar üzerinde yaptıkları çalışmada, taşıyıcı olmayan elemanlardaki hasarın gözlemlenebilmesi için efektif göreli kat ötelemesi değerinin 0.001'i aşması gerektiğini göstermişlerdir [22]. Köprü yapısında oluşan göreli ötelememe değeri maksimum olarak 0.000183 olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda yer değiştirmeye bağlı olarak köprü yapısında herhangi bir hasarın oluşması beklenmemektedir.



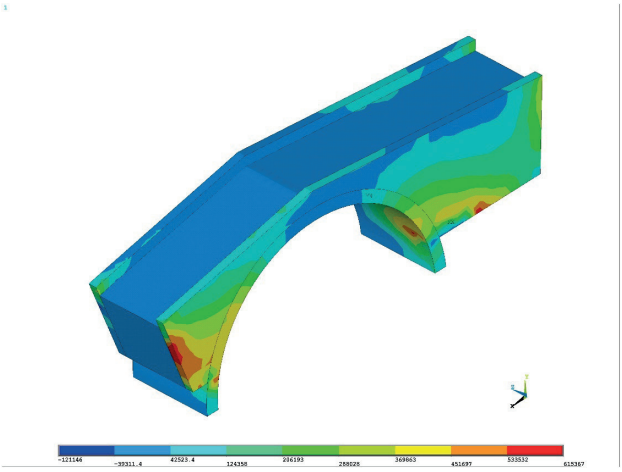
Şekil 9- Yer değiştirme dağılımları (dağılım değerleri m cinsindendir)

Şekil 10'da Pazarcık depreminden kaynaklı olarak gelişen basınç gerilmesi dağılımları verilmiştir. Köprü yapısında oluşan basınç gerilmeleri beklenildiği gibi köprünün üst bölgelerinde meydana gelmiştir. Köprü yapısının maruz kaldığı en büyük basınç gerilmesi değeri kemer ve yığma duvar malzemesinin basınç dayanımının (6.7 MPa) [18] çok altında kaldığı için basınç gerilmesinden kaynaklı olarak yığma duvar ve kemer bölgesinde herhangi bir hasarın meydana gelmediği düşünülmektedir. Ancak dolgu malzemesinin basınç dayanımı (1.20 MPa) [18] aşıldığı için dolgularda sınırlı seviyede hasarların oluşması beklenmektedir.



Şekil 10- Basınç gerilmesi dağılımları (dağılım değerleri Pa cinsindendir)

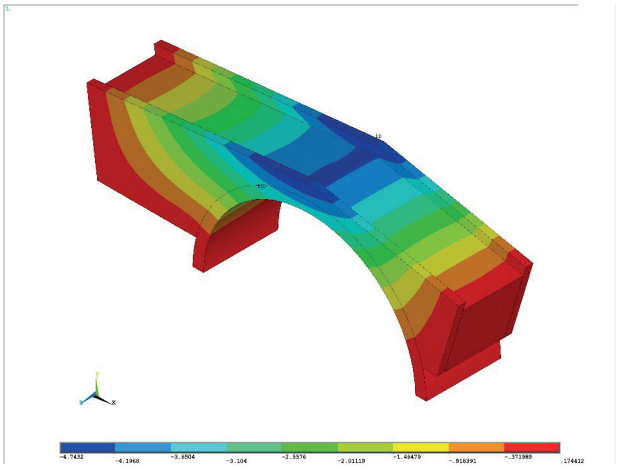
Şekil 11'de köprü yapısında Pazarcık depreminden kaynaklı olarak gelişen çekme gerilmelerinin dağılımları verilmiştir. Pazarcık depreminden kaynaklı olarak köprünün mesnet ve kemer bölgelerine yakın yerlerde 0.66 MPa çekme gerilmelerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Pela vd. (2009) yığma kemer köprülerinden hasar gözlemlenebilmesi için çekme gerilmesi değerinin 1 MPa'nın üzerinde olması gerektiğini ifade etmişlerdir [2]. Ayrıca Gönen ve Soyöz yığma kemer köprü yapılarında yığma duvarın çekme dayanımının 0.88 MPa, kemer duvarın çekme dayanımının 0.80 MPa ve dolgu malzemesinin çekme dayanımının 0.10 MPa olabileceğini ifade etmişlerdir [18]. Bu durumda çekme gerilmelerinden kaynaklı olarak sadece dolgu malzemelerinde hasarların gözlemlenebileceği sonucuna varılmıştır. Şekil 12'de Pazarcık depreminden kaynaklı olarak köprü yapısında oluşan ivmelenmeler görülmektedir. Köprünün mesnetlerinden uygulanan 0.307g en yüksek yer ivmesinin köprünün üst kısımlarına çıkarak belirgin bir şekilde arttığı elde edilmiştir.



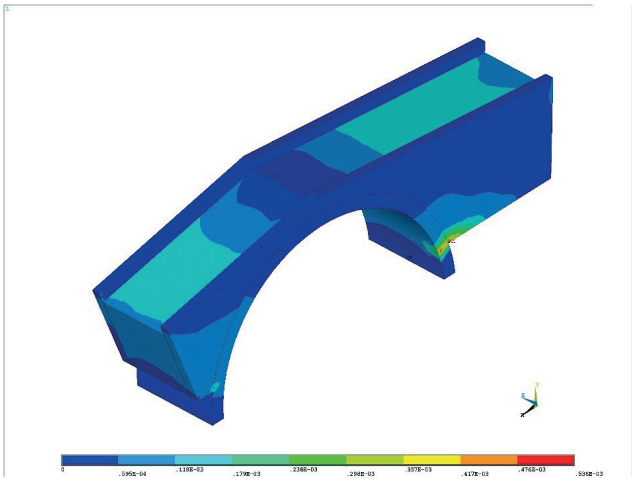
Şekil 11- Çekme gerilmelerinin dağılımı (dağılım değerleri Pa cinsindendir)

Yapının hakim mod periyodu 0.0667 sn olarak hesaplanmıştır. Köprü yapısının Tablo 3'te gösterilen yerel deprem parametrelerinin kullanılmasıyla hesaplanan köşe periyot değeri T_A ve T_B sırasıyla 0.0553 ve 0.276 sn'dir. Pazarcık, Elbistan ve Nurdağı depremlerinin ise hakim periyot değerleri sırasıyla yaklaşık olarak 0.3, 0.4 ve 0.6 sn'dir. Söz konusu incelenen yapı yatay elastik ivme spektrumunun orta periyot dönemlerinde olduğu yapılan modal analiz sonuçlarınca tespit edilmiştir. Yapıda en büyük ivme değerini oluşturan Pazarcık depremi 0.3 sn hakim periyot değeriyle orta periyot dö-

nemlerinde 0.613 g ivme değerini oluşturmuştur. Bu bölgelerde beklenen ivmelerden daha yüksek bir ivme değeri oluşturduğundan dolayı köprü yapısında ivmelenmelerin yoğun olduğu yerlerde hasarların meydana gelmesi öngörülmektedir. Ancak yer değiştirme, basınç ve çekme gerilmelerinden kaynaklı olarak yığma duvar ve kemerlerde hasarların beklenmemesi bu düşünceyi destekler nitelikte olmamaktadır. Bu durumda deprem yer ivmelerinden kaynaklı olarak dolgu malzemesinde hasarların meydana gelebileceği düşüncesi daha hakim olmaktadır. Köprü yapısında ivmelerden kaynaklı oluşabilecek hasarların daha detaylı olarak incelenebilmesi için çalışmada yapılan sismik ve zemin koşulları kabullerinin yerine yapı zemin etkileşimi içeren saha çalışmalarının yapılabileceği düşünülmüştür. Şekil 13'te köprü yapısında Elbistan depreminden kaynaklı oluşan birim şekil değiştirme dağılımları verilmiştir.



Şekil 12- Köprü yapısında oluşan ivmelenmeler (dağılım değerleri m/sn^2 cinsindendir)



Şekil 13- Birim şekil değiştirme dağılımları

TBDY 2018'e göre izin verilen en düşük beton sınıfı olan C25/30 Young modülü 30000 MPa'dır. Deformasyon açısından bu beton sınıfının sınırlı hasar değeri 0.0025, kontrollü hasar sınır değeri 0.0135, çökme önleme hasar sınır değeri ise 0,018'dir [20]. Yığma duvarların elastisite modülü Tablo 1'de 6200 MPa olarak tanımlanmıştır. Şekil değiştirme değerleri Hook yasasına göre elastisite (Young) modülü ile ters orantılı olduğundan, yığma kemer duvarlar için tahmini sınırlı hasar değeri 0.000515 olup kontrol edilebilir hasar sınır değeri ise 0.00278 olabileceği düşünülmüştür. Depremler nedeniyle kalıcı deformasyona uğraması beklenmeyen yığma kemer duvarların mesnet bölgelerine yakın alanlarında minimum 0.00054 ve maksimum 0.000222 değerleri oluşmuştur. Bu durumda şekil değiştirme esaslı olarak köprü yapısının kemerlerinde sınırlı düzeyde hasar olabileceği kanaatine varılmıştır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada Gümüşhane – Trabzon yol güzergahında bulunan Tarihi Kamberli köprüsünün sismik davranışı incelenmiştir. ANSYS programında sonlu elemanlar modeli oluşturulan köprüde Pazarcık, Elbistan ve Nurdağı depremleri etkisi altında zaman tanım alanında analizler uygulanmıştır. Analiz sonuçlarında yer değiştirme, şekil değiştirme, basınç gerilmesi, çekme gerilmesi ve ivme değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar

literatürde verilen bazı sınır değerleriyle mukayese edilerek tartışılmıştır. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar şöyle sıralanabilir:

- Yığma kemer köprü yapısında Elbistan depreminden kaynaklı olarak en büyük yer değiştirme değeri 1.25 mm ve ortalama yer değiştirme değeri 1.125 mm olarak hesaplanmıştır. Bu değerler ve literatürde sunulan yer değiştirme sınır değerinin dikkate alınmasıyla köprüde yer değiştirmeden kaynaklı hasarın beklenmediği tespit edilmiştir.
- Köprü yapısında maksimum çekme ve basınç değerleri sırasıyla 0.66 MPa ve 1.21 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değerlere bağlı olarak köprü yapısının sadece dolgu malzemesinde sınırlı hasarların meydana gelebileceği öngörülmüştür.
- Köprü yapısında Pazarcık depreminden kaynaklı olarak kemer bölgelerinde 0.613 g ivme değerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Bu ivme değerinin köprünün orta periyot dönemlerinde etki etmesi muhtemel bir hasarın oluşabileceği öngörüsünü oluşturmuştur.
- Köprü yapısında en büyük şekil değiştirmelerin mesnete yakın bölgelerde oluştuğu tespit edilmiştir. Mesnetlere yakın bölgelerde en büyük şekil değiştirme değerinin 0.00054 olduğu tespit edilmiştir. TBDY 2018'e ve Hooke yasasına göre yapılan kabüle göre köprünün mesnete yakın yerlerinde sınırlı hasarların meydana gelebileceği düşünülmüştür.

Köprü yapısında analizler ZB zemin sınıfı kabul edilerek yapılmıştır. Analiz sonuçlarının doğrulanması için yapı zemin etkileşimini dikkate alan saha çalışmalarının yapılarak analizlerin tekrarlanması önerilmiştir. Yapılan analiz sonuçlarına göre köprünün mesnete yakın yerlerinin hacimsel olarak boyutunun arttırılmasıyla deprem etkilerinin sönümlenmesi gerektiği önerilmiştir. Ayrıca dolgu malzemelerinin onarılması da ilave güçlendirme önerisi olarak tavsiye edilmiştir.

Kaynaklar

[1] L. Pelà, A. Aprile, A. Benedetti, Comparison of seismic assessment procedures for masonry arch bridges, Constr. Build. Mater. (2013). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.046.

[2] L. Pelà, A. Aprile, A. Benedetti, Seismic assessment of masonry arch bridges, Eng. Struct. (2009). https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.012.

[3] A.R. Tóth, Z. Orbán, K. Bagi, Discrete element analysis of a stone masonry arch, Mech. Res. Commun. (2009). https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2009.01.001.

[4] P.J. Fanning, T.E. Boothby, Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges, Comput. Struct. (2001). https://doi.org/10.1016/S0045-7949(01)00109-2.

[5] A. Thavalingam, N. Bicanic, J.I. Robinson, D.A. Ponniah, Computational framework for discontinuous modelling of masonry arch bridges, Comput. Struct. (2001). https://doi.org/10.1016/S0045-7949(01)00102-X.

[6] P. Zampieri, M.A. Zanini, C. Modena, Simplified seismic assessment of multi-span masonry arch bridges, Bull. Earthq. Eng. (2015). https://doi.org/10.1007/s10518-015-9733-2.

[7] A.C. Aydin, S.G. Özkaya, The finite element analysis of collapse loads of single-spanned historic masonry arch bridges (Ordu, Sarpdere Bridge), Eng. Fail. Anal. (2018). https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.11.002.

[8] P. Zampieri, S. Perboni, C. Denis Tetougueni, C. Pellegrino, Different approaches to assess the seismic capacity of masonry bridges by non-linear static analysis, Front. Built Environ. (2020). https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00047.

[9] B. Sevim, A. Bayraktar, A.C. Altuniik, S. Atamtürktür, F. Birinci, Finite element model calibration effects on the earthquake response of masonry arch bridges, Finite Elem. Anal. Des. (2011). https://doi.org/10.1016/j.finel.2010.12.011.

[10] E.N. Rovithis, K.D. Pitilakis, Seismic assessment and retrofitting measures of a historic stone masonry bridge, Earthq. Struct. (2016). https://doi.org/10.12989/eas.2016.10.3.645.

[11] K. Hacıefendioğlu, H.B. Başağa, S. Banerjee, Probabilistic analysis of historic masonry bridges to random ground motion by Monte Carlo Simulation using Response Surface Method, Constr. Build. Mater. (2017). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.101.

[12] A. Özmen, E. Sayın, Seismic assessment of a historical masonry arch bridge, J. Struct. Eng. Appl. Mech. (2018). https://doi.org/10.31462/jseam.2018.01095104.

[13] A. Özmen, E. Sayın, E. Sayin, Seismic Response of Single Span Masonry Arch Bridges Located in Elaziğ and Malatya SEISMIC RESPONSE OF SINGLE SPAN MASONRY ARCH BRIDGES LOCATED IN ELAZIĞ AND MALATYA, Int. J. Bridg. Eng. 11 (2023) 23–41. https://www.researchgate.net/publication/371179149 (accessed May 12, 2024).

[14] D.M. Barbieri, Two methodological approaches to assess the seismic vulnerability of masonry bridges, J. Traffic Transp. Eng. (English Ed. (2019). https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.09.003.

[15] P. Zampieri, C.D. Tetougueni, C. Pellegrino, Nonlinear seismic analysis of masonry bridges under multiple geometric and material considerations: Application to an existing seven-span arch bridge, Structures (2021). https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.009.

[16] Ö. Saygılı, J. V. Lemos, Seismic vulnerability assessment of masonry arch bridges, Structures (2021). https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.057.

[17] İ. Haciahmetoğlu, Gümüşhane il merkezindeki Türk-İslam devri mimari eserler, (2007). https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/521059 (accessed May 13, 2024).

[18] S. Gönen, S. Soyöz, Seismic analysis of a masonry arch bridge using multiple methodologies, Eng. Struct. (2021). https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111354.

[19] AFAD - TADAS, (n.d.). https://tadas.afad.gov.tr/ (accessed November 24, 2022).

[20] Başbakanlık Mevzuatı Geliştirme ve Yayın Genel Müdürlüğü, (n.d.). https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm (accessed September 17, 2022).

[21] AFAD | deprem.gov.tr, (n.d.). https://deprem.afad.gov.tr/last-earthquakes (accessed November 24, 2022).

[22] H. Güllü, H.S. Jaf, Full 3D nonlinear time history analysis of dynamic soil–structure interaction for a historical masonry arch bridge, Environ. Earth Sci. (2016). https://doi.org/10.1007/s12665-016-6230-0.

PROCEDURES FOR SEISMIC ANALYSIS OF HISTORIC MASONRY BUILDINGS

Cesar Alfonso Alanoca CHAMBI[1], Rashid MANGUSHEV[2], Lidia KONDRATIEVA[3]

[1]MSc., Saint Petersburg of Architecture and Civil Engineering,
alanoca.cesar@yandex.ru
[2]PhD, Saint Petersburg of Architecture and Civil Engineering,
ramangushev@yandex.ru
[3]PhD, Saint Petersburg of Architecture and Civil Engineering,
kondratjevaln@yandex.ru

Abstract

The procedures for evaluating the damage and structural condition of a historic masonry building, evaluating its expected seismic behavior for the seismic level of design considered that depends on the place and geological and geotechnical characteristics of the site of the historic buildings. In this case, the Church of the Assumption of the Blessed Virgin Mary in Villavesco will be taken as an evaluation model.

The procedures and types of study of the structure from the geometric point of view, proceeding to analyses that will allow the composition of the structure, the possible damage and the current conditions of the structure itself to be assessed. Obviously, the analyses that will be carried out will be of the NDT type, that is, non-destructive tests: as a cultural heritage asset, the structures or buildings subjected to tests, such as thermography, and sonic tests, which will not cause damage.

These diagnostic tests will be useful for numerical analyses. The analyses carried out aim to help understand the behavior of the structure in seismic

conditions, with a standard return period. The area in which the structure is located is very important to determine the seismic risks, based on a design spectrum, churches are structures that are easily damaged in earthquakes they are also structures that are considered very important since at certain times they house considerable amounts of people due to the daily activities they develop, therefore, it is useful to proceed with initial linear analyses to understand what level of safety the structure has and if it requires interventions to improve its behavior in the face of dynamic seismic loads.

The analyses carried out have to be of a progressive order of complexity and refer to individual parts of the building until the entire structural model is reached. These analyses will allow an initial assessment of the seismic response, indicating the parts most exposed to damage and an overall level of safety of the historic building.

It is decisive to know the type of characteristics of the seismic design spectrum and to obtain the dynamic mechanical physical characteristics of the soil, with a dynamic soil-structure interaction (DSSI) will be carried out and the response of the historic building to a seismic event can be obtained, through a finite element analysis and computer programs such as MIDAS.

Keywords: seismic impact, END non-destructive tests, dynamic soil-structure interaction (DSSI).

1. Introduction

Seismic events are a primary risk factor for cultural heritage in different parts of the world, where their conservation is objective. The old masonry churches are particularly subject to seismic damage, even more so in areas prone to constant seismic activation, due to their constructive characteristics. The analysis procedure of a historic masonry church will be provided, where its structural characteristics and current conditions must be evaluated in terms of possible deterioration and initial damage and, finally, estimating its expected seismic behavior for the level of earthquake design considered for the site.

Some tests should be carried out to assess the composition of the structure, the possible damage and the current conditions of the structure itself. Obviously, the analyses that are recommended will be of the NDT type, that is, non-destructive analyses; The church may be subjected to tests, such as thermography and sound tests, which will not produce any damage. These tests are diagnostic tests that will be useful to proceed with numerical analyses.

The analyses carried out aim to help understand the behavior of the structure in seismic conditions, with a standard return period specific to each zone.

The purpose of the soil-structure dynamic interaction analysis is to determine the influence of a seismic event through its foundation, and to determine the behavior of the historic building in the face of this seismic event and to determine what percentage of the old structure is susceptible to structural damage and from these results determine anti-seismic systems for this type of historic buildings and the restoration of the structural elements which are prone to structural damage. Collapse.

1.1. Historic Building (The Church)

1.1.1. The Story

The architecture of the “Chiesa dell’ Assunzione della Beata Vergine Maria” recalls the period of the Counter-Reformation. Thanks to the documentation

found on the site of the Lombardy Cultural Heritage Authority, it is possible to trace some fundamental dates related to the changes, which took place over time, of the church analyzed.

Another piece of information dates from 1695 where the chapel of the Blessed Virgin of the Rosary is mentioned for the first time on the right side. In 1733 a new choir was built, commissioned to Giovanni Giudici, to replace the wooden choir, which was in ruins. The altar is indicated as new in a document dated January 22, 1734. In other documents, it is described from 1770 as consisting of a circular tabernacle, supported by eight decorated marble columns.

1.1.2. Restoration

Although the oldest interventions in the structure of the church are not known, generally these ancient structures did not suffer restoration for a seismic event, on the contrary they only have maintenance of the structure in a superficial way. It is always very important to also observe the changes that have been made in the recent past. To assess the effects of any modifications:

•Conservative restoration of the bell tower, 1980

•Consolidation and refinement of walls, 1985

•Consolidation of the façade and renovation of the plaster, 1993-1998

•Ordinary maintenance of roof surfaces, replacement of fiber cement slabs with fiber cement slabs, 2020 – 2022

•Renovation of damaged plaster of the bell tower, 2020 – 2022.

1.1.3. Geometric Description

The structure is typical of Christian basilicas with a longitudinal plan, rectangular in shape. As can be seen in the figure below, which represents the current situation of the church, the entrance is located directly on the road, elevated above it thanks to a few steps and a porch.

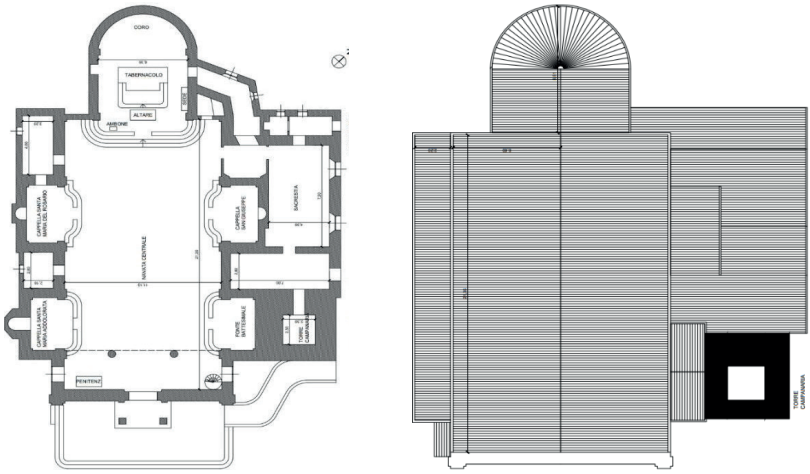


Figure 1: Structural Plan



Figure 2: Longitudinal section



Figure 3: Southwest elevation



Figure 4: The Church

1.2. Seismic Damage and Vulnerability

1.2.1. Seismic Risk

The damage that usually occurs in historic masonry buildings indicated the need to assess their seismic vulnerability and, if necessary, to carry out interventions for their seismic improvement, in order to reduce seismic risk.

Next, the different limit mechanisms and the A-DC model will be presented, for the evaluation of damage in churches after an earthquake, which represents the current basis used to detect damage in historic churches. This has been widely used in recent years, after the earthquakes that occurred in different parts of the world that severely affected old structures.

Seismic risk basically depends on three main parameters, which are, respectively:

-P, Seismic Hazard, which is the probability of a specific level of ground movement at a specific location.

-V, Vulnerability, which is a measure of a construction to resist seismic actions.

-E, Exposure, which can be defined in different ways depending on the contest, but basically represents value.

Of course, risk, by its definition, cannot be eliminated, but it can be reduced by focusing on some elements that contribute to it, basically vulnerability.

1.2.2. Mechanical Model for the Analysis of an Ancient Structure

For the analysis of the global mechanisms of damage to the structure, in the case of structures, different methods can be used, such as:

•Dynamic modal analysis, this type of analysis, in the linear field, is widely used. It identifies the main vibration modes in each direction of the system with reference to a response spectrum, the stress levels of the structural elements and the structure can be verified. Therefore, it allows to calculate all the vibration modes of the structure under analysis, the vibration period associated with each mode and the participating mass for each vibration mode.

•Nonlinear static analysis, this type of analysis considers the non-linearity of the materials and, unlike the linear analysis, evaluates the behavior of the structure, analyzing the force-displacement law, and finding the displacement capacity in the SLU condition, close to the activation of the collapse mechanism. Checks can be performed by taking into account a model that represents the overall behavior of the structure. This analysis consists of the application of gravitational loads and a system of horizontal forces that are scaled until the final conditions are reached.

•Nonlinear dynamic analysis, this type of analysis consists of the calculation of the seismic response by integrating the equations of motion using a nonlinear model of the structure. To use this type of analysis, it is necessary to consider different types of accelerograms, which must be compatible with each other with the response spectrum with respect to the type of subsoil. Therefore, this analysis is used and recommended under very particular conditions; It is not a standard analysis that is always carried out.

•Dynamic analysis soil-structure interaction, this type of analysis consists of the calculation of the seismic response at the base of the building, through the building has contact with the ground in this case through the foundations of the building since it is very important to be able to understand that the dynamic loads are transferred from the ground to the building through the foundations.

•Dynamic analysis in the soil, this type of analysis consists of evaluating and determining the behavior of the earthquake in the different types of soil strata where the structure is built, as well as the type of geology and geological faults near the object of study, it is important to determine how to be the amplitude, frequency and period of the soil since in many cases they depend on these values for the failure to occur by resonance.

Referring to local boundary conditions, i.e. when a limited portion of the building can be damaged and evolve towards collapse, it is necessary to recognize a possible kinematic chain

•The linear kinematic analysis calculates the horizontal multiplier of the loads that activate the collapse mechanism based on the initial configuration of the chain, from this the evaluation of the corresponding seismic action can be made.

•Nonlinear kinematic analysis includes the variation of geometry as the mechanism develops; it is more accurate than the former and is used for subsequent verification once the linear analysis gives negative results.

1.3. Damage Limit Mechanisms

The mechanisms of damage observed in an ancient church after an earthquake are recurrent and recognizable as each component of the church has its own specific mode of damage; To facilitate the observation of these modalities, especially for the brick masonry church, the concept of "macro element" was introduced, that is, an architectural element or part that is characterized by an autonomous seismic response with respect to the rest of the components. Thanks to an in-depth analysis over the years, through the study of damage and severe events that occurred in the past, it is possible to

recognize how macro elements, identifiable in the structure, tend to show the behavior of a rigid body; Therefore, a macro element is also identifiable in the sense that it behaves independently of the rest of the structure.

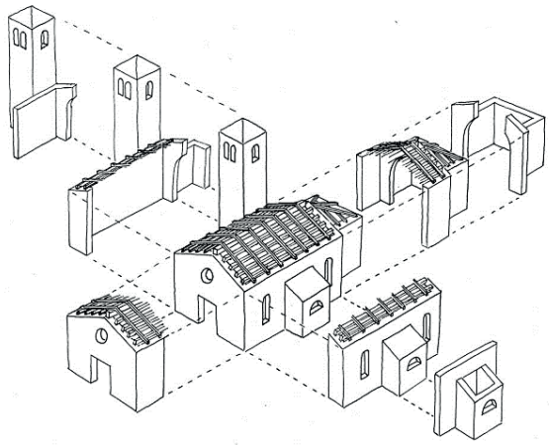


Figure 5: Schematization of macro elements of historic buildings

The structure of the church is divided into a finite number of macro elements, which are 9, and in total 28 mechanisms of damage are proposed, divided between the different types of macro elements; The different types of macro-element that we can have been:

- The façade
- The triumphal arch
- The transept
- The dome
- The bell towers
- The porch
- The ship
- The apse
- The chapels

Using a correct model, it is possible to evaluate the vulnerability index, starting first from the subdivision of the macro elements. As indicated in "Allegato C - Modello per la valutazione della vulnerabilità sismica delle chiese before proceeding, it is necessary to verify the presence of macro elements, because obviously not all of them could always be present and, consequently, to understand which mechanisms of damage are already negligible.

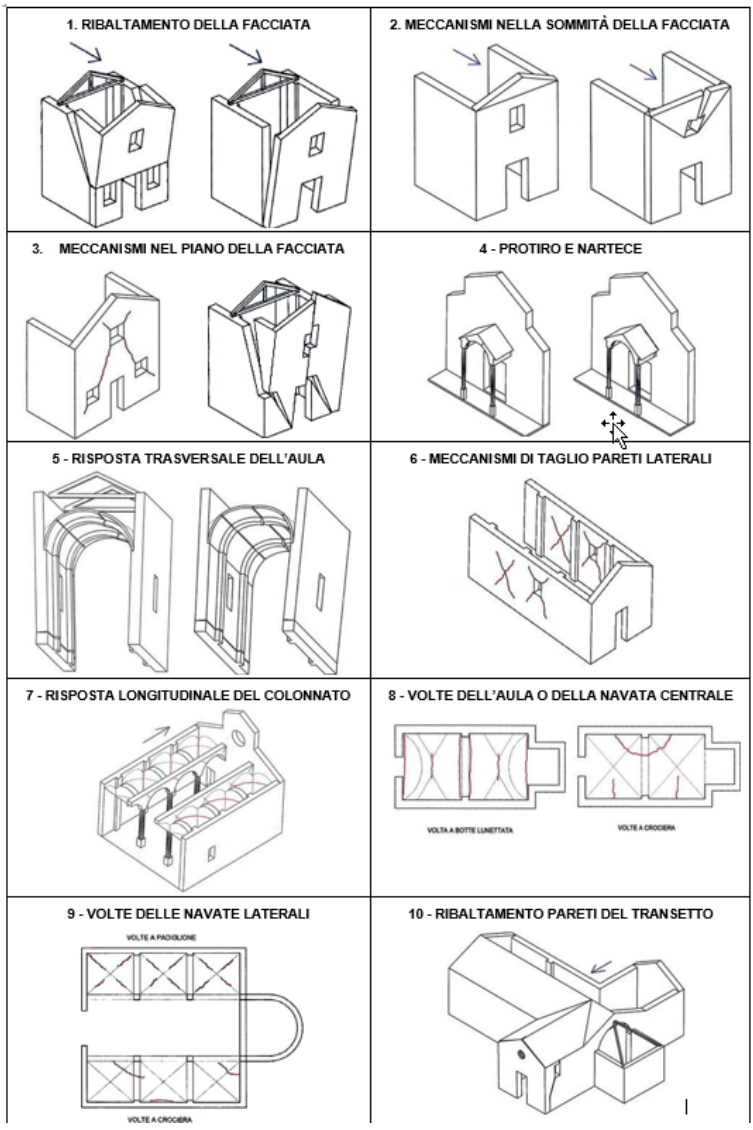


Figure 6: Mechanism of damage

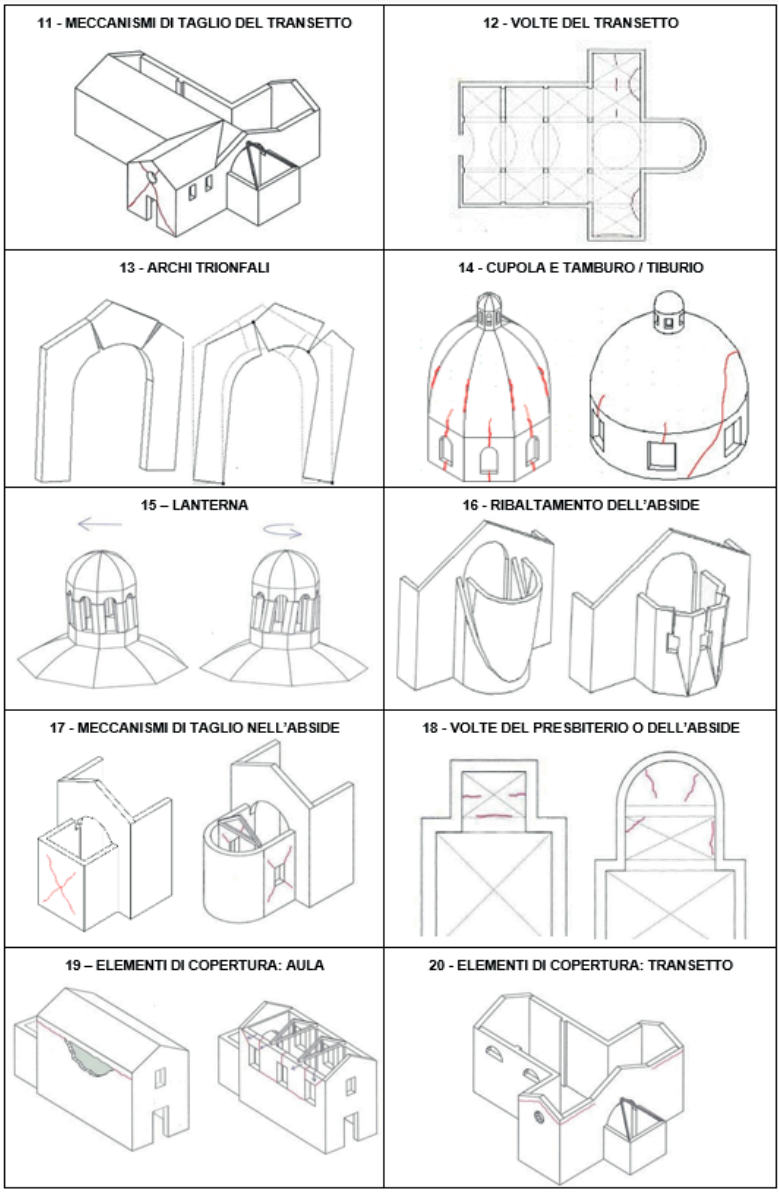


Figure 7: Mechanism of damage

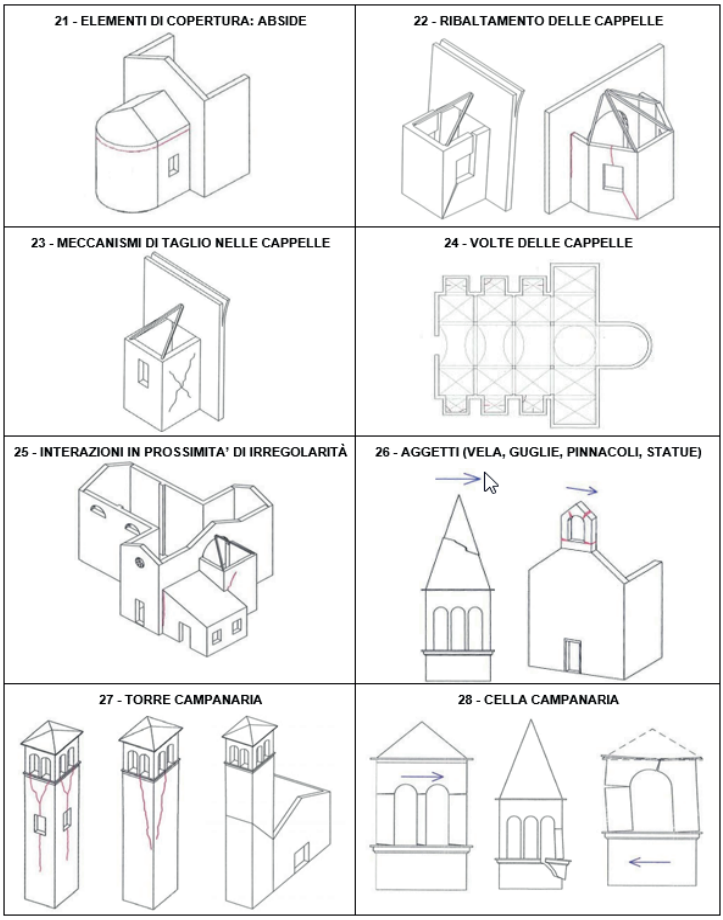


Figure 8: Mechanism of damage

1.4. Case Study Mechanics of Harm

Knowledge of the mechanisms of damage thus allows us to examine the seismic behavior of churches in a safer and deeper way. Obviously, among all the mechanisms mentioned, only a few are recognizable within the structure we analyze. In particular, the most common mechanisms refer to:

•The façade tilting mechanism, one of the most frequent and recurrent mechanisms in the event of an earthquake, consists of the rigid rotation of the wall considered around a horizontal hinge placed on the ground. For the

façade, there are also other sub mechanisms that depend on the position of formation of the hinge around which the rotation occurs.

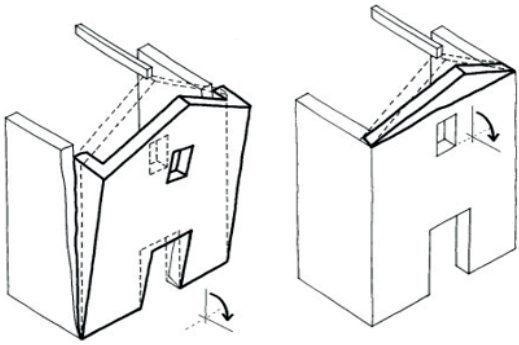


Figure 9: Facade cracking mechanism

This type of damage usually occurs in the absence of homogeneity of the masonry and bonding with bracing or angled. The presence of an internal strap, shown in the previous chapter, is useful to try to avoid this mechanism.

•The out-of-plane rotation of the side walls, the behavior of these parts of the structure also depends on other elements, such as possible connections with other construction elements such as, in our case, the sacristy, the chapels and the roof.

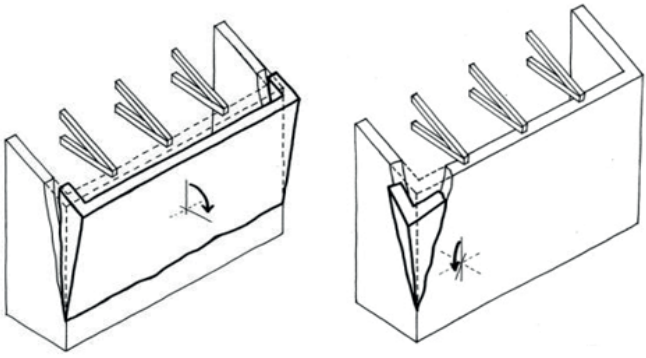


Figure 10: Sidewall cracking mechanism

•The mechanisms of damage in the bell tower, this, after the façade, is one of the most subject and vulnerable elements. For the bell tower, the mechanisms are related to both the tower and the belfry, as shown.

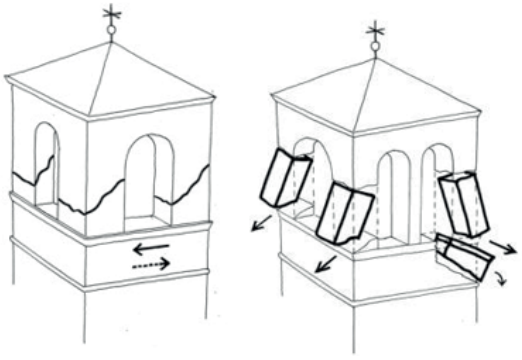


Figure 11: Bell tower cracking mechanism

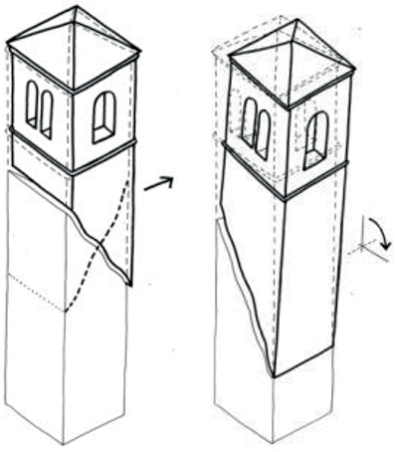


Figure 12: Bell tower cracking mechanism

1.5. Model Features for Analysis

To establish a model for seismic analysis, different types of data and information are needed. The NTC code indicates a general list of requirements that the engineer must adapt to the context.

Among these we find:

• Historical-critical analysis, to define the history and the changes undergone over time by the building itself.

• The survey must be complete, taking into account the previous point, therefore any changes suffered over time.

• Properties and characteristics of materials, through known information or any instrumental research in situ.

• Levels of knowledge and confidence, is the parameter on which the analysis of a building is based, useful for evaluating the mechanical properties of the structure:

-CL1, artifact survey, limited controls, with FC4 = 1.35; This level of knowledge is related to limited on-site checks of construction details, where only materials are analyzed on site.

-LC2, artifact survey, extended controls, with FC = 1.2, construction details and investigations on materials are analyzed.

-LC3, thorough checks and in-depth investigations, FC = 1, geometric prospecting, thorough detail checks and in-depth analysis.

The definition of a confidence factor, based on the amount of information obtained, is important for the assessment of seismic safety and the planning of measures to improve cultural property.

•Actions, calculation of all load combinations, careful study of structural, non-structural, permanent and variable loads.

•Design the seismic improvement intervention taking into account the vulnerability of the situation, depending on the understanding of the building

1.6. Non-destructive Testing for Masonry

One of the most widely used methods for studying the behavior and characteristics of masonry is the technique of non-destructive testing, NDT also known as non-destructive testing (NDE), non-destructive inspection (NDI) and non-destructive evaluation.

From this type of test, it is very easy to evaluate some characteristics of masonry, such as:

-Variations in the construction of walls.

-Lack of wall insulation.

-Subsurface anomalies such as voids, cracks near the surface.

-Thermal bridge of mortar obstructions in wall drainage cavities.

-Definition of the material characteristic.

-Evaluation of the Elastic Modulus.

-Evaluation of the thickness of the structural elements.

1.7. In Situ Test

For all old structures, non-destructive diagnostic tests must be performed. The tests carried out are generally non-destructive and refer to the analysis of the structure to obtain meaningful information from the structural elements. Thermographic, sonic, and thickness measurements should be performed.

1.7.1. Thermography

This type of non-destructive testing is treated by the UNI 9252:1988 standard, it is widely used as it is very advantageous because it allows the composition (morphology) of the plastered walls to be identified, where it is not possible or in any case the use of destructive tests is to be avoided. Thermography is a type of non-destructive analysis that is based on the acquisition of infrared images, it was developed in the 1960s by the military.

Thermography can be performed passively or actively:

1. Passively you only have a room and natural temperature.

2. In the active method, on the other hand, the surface involved in the analysis is heated (not considered in this thesis).

This type of proof is based on the Stefan-Bolzmann law, which states that:

"Every object at temperature T emits an amount of energy proportional to the fourth power of its absolute temperature"

$$E = e * \sigma * T^4 * d \quad (1)$$

Where:
- T is the absolute temperature [K].
- E is the energy flow [W/m2].
- σ is a constant $5.67 \cdot 10^{-8}$ [W/m^2K^4].
- e is emissivity.

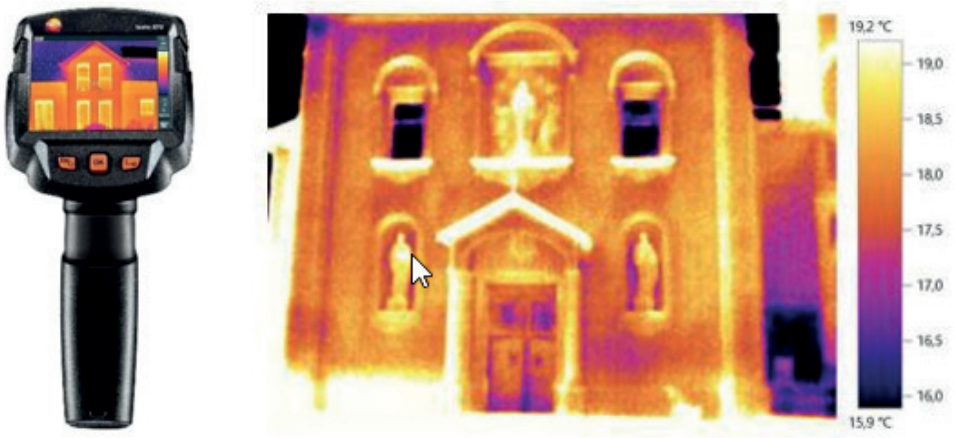


Figure 13: Example of early thermography results

To calibrate the thermograph, you start with the acquisition of environmental data, such as temperature, humidity and dew point.

1.7.2. Sonic and Ultrasonic Testing

To evaluate the overall behavior of the structure, sonic tests must be carried out at different points in the old building (Church). Sonic tests are very important for the characterization of structural elements and, they should not be taken for granted, they are non-destructive tests and, therefore, yield qualitative results. These tests are based on the transmission of elastic waves that, having a given speed, suggest the type of material of the element studied and possibly the presence of a defect or a mortar joint, which usually dampens the speed of the wave. These tests can be carried out according to three test methods:

-For transparency, the sender and receiver are on opposite sides

-For radio transmission, the two instruments are on adjacent sides

-On the surface, the least suitable for masonry structures

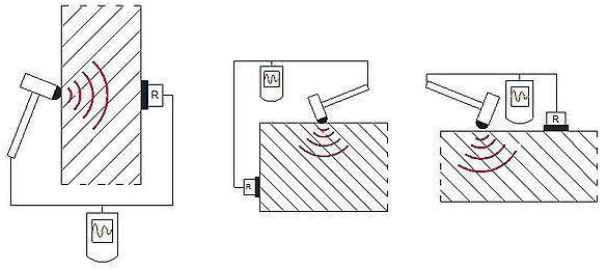


Figure 14: Diagram of sonic test modalities

Therefore, the test consists of evaluating the time of the ethers between the emitter and the receiver, and, knowing then the path of the wave, then the thickness of the walls, it is possible to trace the velocity data of the wave that suggest the state of conservation or the type of material, according to this formula:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad (2)$$

where “E” is Young’s modulus” and “ρ” is the density of the material.

For this type of test, it is necessary to:

-Prepare a grid of 36 points (generally, then depending on the case in question), on 1 square meter of surface, to have a sufficiently representative sample of the structure, 15 cm from each other.

-Use an instrumented hammer and tap it lightly at each point on the grid.

-Detect the intensity of the blow by means of a probe.

-Evaluate the speed of propagation.

1.7.3. In Situ studies and Soil Laboratory Work

To evaluate the physical mechanical dynamics of the soil where old buildings (Church) are built, in situ studies and laboratory work must be carried out, such as:

- Natural moisture content per ASTM D-2216-71
- Particle size analysis according to ASTM D-422
- Consistency limits
- Liquid Limit per ASTM D-4318
- Plastic Limit per ASTM D-4318
- Plasticity index
- Unified Soil Classification (S.U.C.S.) ASTM D-2487-66T
- Standard SPT ASTM-1586 and CPT penetration tests
- Direct Cut Test
- Consolidated Dynamic Triaxial Assay Not Drained

With these studies, it will be possible to determine the physical-mechanical characteristics of the soil for a seismic event and to be evaluated with a mathematic model in a finite element program.

1.8. Load Analysis

Charges are divided according to their intensity over time; According to the NTC 2018, there are different types of charges, which are listed below.

1.Permanent (B):

- ▪Self-weight of structural elements (G1).
- ▪Self-weight of all non-structural elements (G2).

2.Variable (Q): shares acting with instantaneous values that may be significantly different from each other during the nominal life of the structure:

- ▪Wind actions; dynamic loads.

3.**Seismic action E**, which generally depends on the parameters of the site, on the seismic hazard (probability of an earthquake occurring); there are horizontal and vertical components of ground movement.

1.8.1. Design Spectrum

For the analysis of the structure, a linear analysis method must be used, in which case we will need to find the behavior factor q to consider the effect of the nonlinear behavior. The behavior factor allows us to reduce the elastic spectrum and get the design spectrum.

he elastic response spectrum is a very useful graph as it provides the vibration periods (T), the value of the acceleration due to the earthquake, in relation to the damping, and of course the parameters are related to the different types of soil.

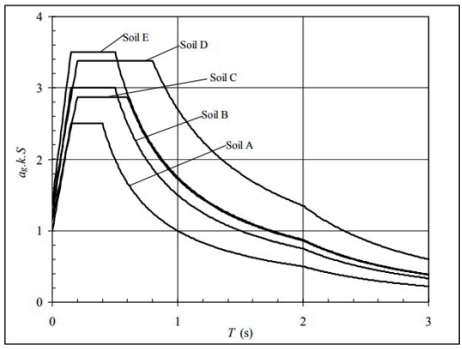


Figure 15: Eurocode 8, Design Response Spectrum for different types of soil

1.9. Geometric Modeling

Before proceeding with the creation of the model for finite element analysis, it is necessary to develop an architectural model that is as accurate as possible, in order to try to make the results of the analysis as reliable as possible.



Figure 16: Final architectural model

1.10. FEM Modeling

For the creation of the structural model, which will be used for subsequent analysis, the Abaqus/CAE software can be used; “Abaqus” is a software suite for finite element analysis and computer-aided engineering, originally released in 1978; With this software it is possible to model, analyze and visualize a structure with the finite element method and also display the results in graphical form.

To perform a dynamic analysis of soil-structure interaction, the MIDAS software can be used since with it a global analysis of the historic building and the soil can be made, through the soil-structure interaction.

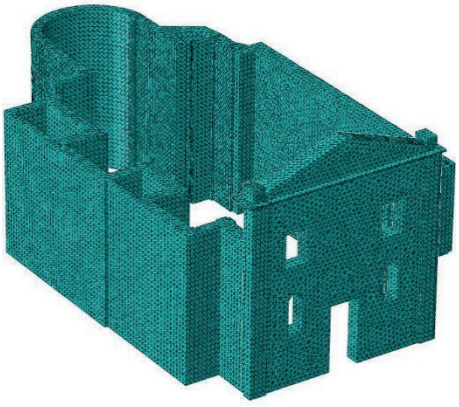


Figure 17: Example of creating a mass element mesh of the historic building

1.11. Analysis

1.11.1. Static Analysis

1.11.1.1. Structural wall and facade

The first check was a static analysis only of the load-bearing structure connected to the façade of the church. The static analysis is carried out by applying only the structure's own weight.

1.11.2. Modal Analysis

The modal analysis is carried out to study the behavior of the structure under consideration when subjected to vibration, thus being able to determine the natural frequencies of oscillation when the structure is subjected to free oscillation, for which three different modal analyses must be performed for old buildings.

2. Conclusion

For the preparation of an analysis, from a seismic point of view, the damage that could affect the historic building; it must be carried out through finite element simulations using structural analysis software such as MIDAS, which offers us the possibility of being able to perform an analysis of soil-structure dynamic interaction.

Investigations should be carried out, such as thermographic surveys, useful to analyze the masonry structure as the regulations for the reconstruction of ancient buildings suggest; from these analyses it can be deduced if the masonry is heterogeneous; Determining types and thickness of cracks, caused by differential settlements in the foundation of the old building.

With the subsequent analyses, the creation of the architectural model can be carried out; This model has to be as realistic as possible, also in terms of textures and graphics, to better ensure the reader's understanding of the structure. From the architectural model, the structural model can be obtained, which will be used for the analyses; and then make a global analysis of the entire structure based on a soil-structure analysis.

The global soil-structure analysis will allow determining the period of the soil and the structure when it is subjected to dynamic earthquake loads, which in case they are equal or partially the same the old building will be with a large percentage of collapse under seismic loads.

It is convenient to examine small portions of the structure in which non-destructive tests reveal that the degree of union and interlocking between the different layers is not good, in order to try to understand the causes of this condition and to plan future repairs and anti-seismic restorations of these elements of the old building, in this case a Church, such as the construction of anti-seismic systems at the base of the foundations and anti-seismic repairs of the structural elements of the old building, and ensuring that the period of the old building is not equal to the period of the ground.

3. References

D.M. 17/1/2018 – Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»

Circolare 21/1/2019, n.7 Consiglio Superiore LL.PP. – Istruzioni per l'applicazione dell'"Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»" of D.M 17/1/2018

L. Cantini, M.A. Parisi; "Cultural heritage and seismic risk evaluation. A critical review on the estimation of the safety level for historical buildings"; Proceedings, 10th International Masonry Conference, editors G. Milani, A. Taliercio and S. Garrity; Milan, Italy, July 9-11, 2018.

Tateo, V.; Sferrazza Papa, G. Seismic vulnerability of churches. First results of the study on three façade typologies, Atti Convegno ANIDIS, 2019.

EN 1998-1 (2004) (English): Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions, and rules for buildings [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC].

CNR-DT 207 R1/2018 – Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni.

EN 1992-1-1 (2004) (English): Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC].

DPCM 9 febbraio 2011, Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008, G.U., 2011.

M. Locatelli, «Analisi sismica della struttura della chiesa di San Domenico in Cagliari,» Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Milano, 2014.

Bosiljkov, Vlatko, Mojmir Uranjek, Roko *Žarnic*, and Violeta Bokan-Bosiljkov; "An Integrated Diagnostic Approach for the Assessment of Historic Masonry Structures"; Journal of Cultural Heritage, Volume 11 Issue 3, July-September 2010,

pp. 239-249; 2010.

M. Valente, G. Barbieri e L. Biolzi, «Seismic assessment of two masonry Baroque churches damaged by the 2012 Emilia earthquake, » Engineering Failure Analysis, vol. 79, pp. 773-802, 2017.

I. Grave, “Diagnostica e conservazione delle murature storiche: Studio preparatorio per il restauro conservativo della Chiesa dell’Assunzione della Beata Vergine Maria a Tavazzano con Villavesco”, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, 2022.

F. Gravante, “Structural assessment for Cultural Heritage: the church of S. Pietro in Casolate”, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Milano, 2019.

J. Gaeli, E. Marelli, “Analisi dei danni nelle chiese soggette a sisma: chiesa di s. Giovanni battista in s. Giovanni del dosso”, Master Thesis, Politecnico di Milano.

Sferrazza Papa. G.; Silva. B. “Assessment of Post-Earthquake Damage: St.

Salvatore Church in Acquapagana, Central Italy”, Buildings 2018, 8(3).

Bernardini. A.; Lagomarsino. S. The seismic vulnerability of architectural heritage. Structures & Buildings, January 2008.

G. Torelli, D. D’Ayala, M. Betti e G. Bartoli, «Analytical and numerical seismic assessment of heritage masonry towers» Bulletin of Earthquake Engineering, 18, pages 969–1008, 2020.

A. Kappos, “Design of earthquake resistant buildings”. Izgradnja, V. 64, no. 5-6, 2010, 305-344”, 2010.

E. Devetak, “Earthquake vulnerability assessment of a masonry monument including soil-foundation structure interaction”, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Milano, 2018-2019.

R. Fleres, “La vulnerabilità sismica degli edifici monumentali la chiesa normanna di Santa Maria della Valle a Messina”, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Milano, 2016.

STRUCTURAL ANALYSIS, CONSERVATION AND RETROFITTING PROPASALS FOR THE TEKIRDAG RUSTEM PASHA MOSQUE

Selin KOCA[1], Ahmet BAL[2]

[1]PhD C., İstanbul Technical University, kocas18@itu.edu.tr
[2]Dr, Tekirdag Namik Kemal University, abal@nku.edu.tr

Abstract

In this paper, the architectural and structural system properties of the Rüstem Pasha Mosque, one of the important buildings of Mimar Sinan, which was built in Tekirdag in the mid-16th century, are determined. The finite element model of the building is modelled in structural analysis programme according to the existing conditios; natural vibration periods and stress distribution are calculated. As a result of the analysis, it is very important to provide information about the current earthquake performance of the building and to determine the possible damage points in the future. The aim of the study is to increase the earthquake safety in conservation and restoration applications and to ensure that the building is safely transferred from next generation.

Keywords: Historical Masonry Buildings, Rüstem Pasa Mosque, Conservation, Earthquake, Repair, Retrofitting

TEKİRDAĞ RÜSTEM PAŞA CAMİ YAPISAL ANALİZİ, KORUMA VE GÜÇLENDİRME ÖNERİLERİ

Özet

16. yüzyılın ortalarında Rüstem Paşa tarafından Tekirdağ'da inşa ettirilen ve Mimar Sinan'ın eserlerinden biri olan Rüstem Paşa Cami'nin yapısal analizinin yapılarak mevcut deprem performansının değerlendirilmesi çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Öncelikle yapının mimari, taşıyıcı sistem ve malzeme özellikleri incelenmiştir. Yapının sonlu eleman modeli mevcut duruma göre yapısal analiz programında hazırlanmış; doğal titreşim periyotları ve gerilme dağılımları hesaplanmıştır. Yapılan analizler, yapının mevcut deprem performansını değerlendirmek ve gelecekteki olası hasar noktalarını belirlemek açısından büyük önem taşımaktadır. Çalışmanın amacı, koruma ve restorasyon uygulamalarında deprem güvenliğini artırarak yapının nesilden nesile güvenle aktarılmasını sağlamaktır.

Anahtar Sözcükler: Tarihi Yığma Yapılar, Rüstem Paşa Cami, Koruma, Deprem, Onarım, Güçlendirme

1. Introductıon

Tekirdag is a significant historical location, being one of the first Ottoman settlements in Rumelia [1]. Situated between the capitals of Edirne and Istanbul, Tekirdag was a critical port city with its coastlines facing west [2]. The complex, which was built on a hill overlooking the sea and spread over a large area, consisted of madrasa, caravanserai, imaret, bathhouse, and library, all arranged around the central mosque [3-4]. Very few buildings from the complex have survived to this day. During and after Rüstem Pasha's lifetime, a total of nine mosques were constructed, six of which were designed by Mimar Sinan [1]. While most of these mosques have lost their original identity over time, the mosque in Tekirdağ has largely preserved its original structure and survived to the present day [5]. Therefore, it holds significant value for architectural studies and historical heritage. Figure 1 shows photographs of the complex taken in the 1930s.



(a) *(b)*

Figure 1. Tekirdag Rüstem Pasha Complex in 1930s (a) A view of the complex from the sea (b) The location of the complex against the sea [6]

In Turkey, which is located in active earthquake zones, it is possible for historical masonry structures with cultural heritage value to withstand earthquakes without damage through repair and retrofitting. Seismic damage can be minimized through continuous maintenance and regular monitoring of structures. Extended periods of neglect weaken historic buildings and make them vulnerable to damage. Before the earthquake, it is necessary to determine the safety level of the structural systems of historical buildings again

earthquake, to define the examinations and researches to be carried out in order to determine the structural problems in detail, to determine the basic principles of calculation under earthquake and vertical loads, and to design and implement the interventions in accordance with the conservation principles in line with the results obtained accordingly.

Due to the brittle character of the materials used, the structures exhibit brittle behaviour under earthquake loads [7-8-9-10]. Their tensile strength is very low. Additionally, since the main load-bearing elements are the walls, these walls are also vulnerable to foundation settlement. The use of FRP materials, an innovative reinforcement method, is advantageous because they are resistant to external effects such as corrosion and can withstand high tensile stresses with low cross-sections. This makes them suitable for application in historical buildings, as they can enhance the structure's ductility and ability to handle tensile stresses.

The main objective of retrofitting intervention strategies in historic buildings is to achieve structural safety while adhering to conservation principles. Within this framework, the two primary goals for earthquake safety are to ensure the building's performance level based on its function and to preserve the historic building's value in a manner that respects its structural system and architectural features.

2. Archıtectural And Structural System Of Rustem Pasha Mosque

The Rüstem Pasha Mosque, with its double portico, is representative of the typical characteristics of classical Ottoman architecture (Figure 2a). The entrance gate of the mosque to the courtyard is designed as a simple arched door. The width and height of the door is 4.85m and the thickness is 2.13m, and the opening has iron bars [2]. (Figure 2b).



(a) *(b)* *(c)*

Figure 2. (a) The exterior view of the mosque (b) The entrance gate to the courtyard (c) Inner and outer porticoes

The mosque features two porticoes (Figure 2c). The outer portico measures 39 x 11.4 meters and is covered with a pitched roof. The inner portico, measuring 26.8 x 6.6 meters, has five bays and is covered with a central cavetto vault and two domes on each side [11]. Access to the domes is provided by pendentives, and round arches are used between the inner and outer porticoes. The mosque has smooth cut stone bearing walls built with yellow limestone. The columns of the mosque with double porticoes are made of Marmara marble. Arch, dome and pendentives are plastered. The posts of the windows are marble and the arches are limestone.

The mosque has a square plan and a single-area. The main space is covered by a central dome with a diameter of 13.7 meters (Figure 3a,b). This dome is supported by four elephantine columns, and the arches supporting the dome provide a large opening in the interior. The main dome transfers the load flow to the columns of the building by pendalives. The dome sits on a high pulley and is supported by buttresses from the outside. The surface of the main dome and pendentives are plastered but the limestone on the loadbearing walls is clearly visible (Figure 3c).



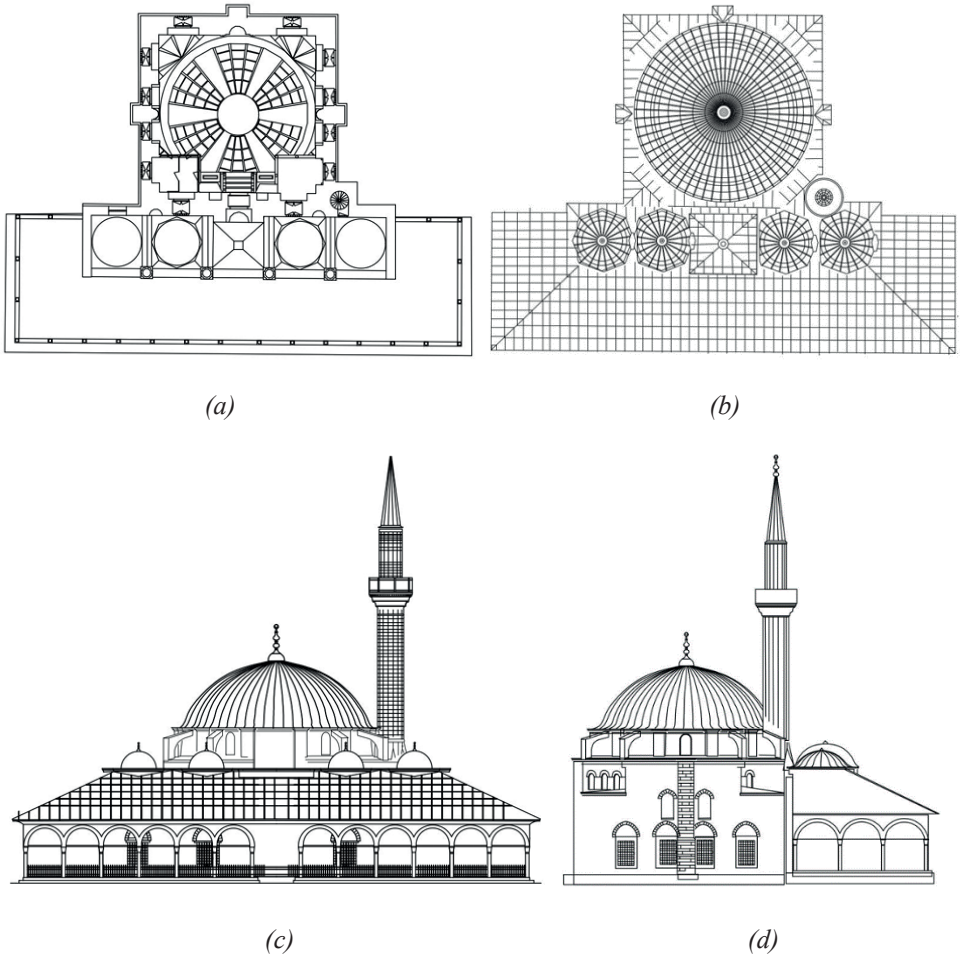
(a) *(b)* *(c)*

Figure 3. (a, b) Main dome of the mosque (c) Unplastered limestone on the walls

The mosque has a classical minaret with a single balcony situated on a square pedestal. The minaret, located in the northwest corner and attached to the load-bearing walls, has a diameter of 2.14 meters and a height of 34 meters [2].The decorative stone carvings on the minaret are fine examples of Ottoman stonework.

Since 1593, the mosque has survived in all its glory and has undergone various repairs and restoration works. The first restoration and repairs in the records were carried out by Sultan Abdülmecid in 1841 [12]. In the archives of the Ottoman Period, no records could be found about the interventions made to the mosque from its construction until the mentioned restoration [2]. The mosque, which was restored by the General Directorate of Foundations between 1955 and 1971, has been able to preserve its original structure [4]. The most recent restoration was completed by the Directorate General of Foundations in 2020. The deformed lead coatings on the dome were removed without damaging the structure. The cracks that appeared as a result of this removal were reinforced with injections, and the empty joints were filled. As a result of these works, the dome's lead coatings were replaced with the original material using an appropriate method [13].

The +1.00m elevation layout, roof layout, north and west facades of the building survey are shown in Figure 4a,b,c and d respectively.



(a) *(b)*

(c) *(d)*

Figure 4. Survey of the structure (a) Elevation Layout (b) Roof Layout (c) North Facade (d) West Facade

3. Structural And Performance Analysis

Per TEC 1998 [14] and TEC 2007 [15], the structure is considered to be located in a second-degree seismic zone and the effective ground acceleration coefficient is taken to be A_0=0.30. However, according to TBEC 2018 [16] and from AFAD Turkey Earthquake Hazard Map Interactive Web Application [17], for the specified soil type (ZC-Very compact layers of sand, gravel and hard clay or weathered, weak rocks with many cracks) and building coordinates, the peak ground acceleration (PGA) is determined to be 0.411g

(for DD-2, 10% probability of exceedance in 50 years, return period of 475 years). All analyses were carried out with this acceleration value. Also, the peak ground velocity (PGV) is given to be 26.121 cm/sec. Figure 5 shows the coordinates of the existing structure in the seismic hazard map.



(a)

Figure 5. Turkey's seismic hazard map, coordinates where the building is located

The load-bearing walls, buttresses, arches and domes constitute the structural system of the mosque. The square-planned building is modelled with 5 domes of 2.50m height with 5.00m openings in the inner portico and the main dome of 5.00m height with approximately 14.00m span. The three dimensional finite element model of the structure is modelled using SAP2000 structural software [18] following an on-site structural survey, using the material and geotechnical information. All elements are considered with their current dimensions and properties. A three-dimensional structural model is shown in Figure 6.

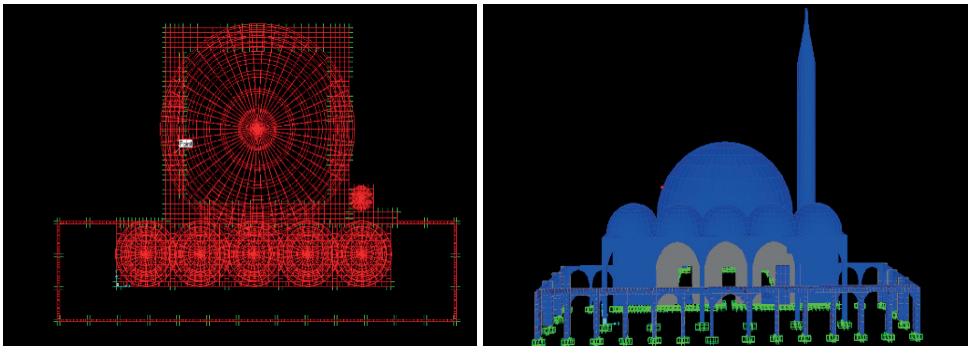


Figure 6. Three-dimensional structural model

Structural analyses are repeated for both principal directions and under sufficient load combinations. In this case, the structure is analysed under its own weight, wind, snow and earthquake loads. One of the most important loads of historical buildings is their own weight and the weight of the element used to support them. Especially in masonry structures, weight loads are more critical than other loads due to the large thickness and cross-section. The stiffness, natural vibration period and stress distribution are determined. Stresses in the masonry walls and domes are also checked to determine the safety of the structure.

The limestone used in the structure is modelled with a specific gravity of 2.6 g/cm^3, a unit volume weight of 1.87 g/cm^3, a compressive stress of 200 kg/cm^2 and a Poisson's ratio of 0.12 [19-20].

The first natural vibration period of the structure is T_1=0.432 sec. in X directions, the second period is T_2=0.418 sec. in Y directions and the third natural vibration period is T_3=0.341 sec. The mode shapes of the structure respectively are as given in Figure 7. The natural vibration periods and mode shapes of the structure provide general information about its overall condition. Considering the building size, construction technique, and material of the structure, it can be concluded that the prepared model closely resembles the original structure.

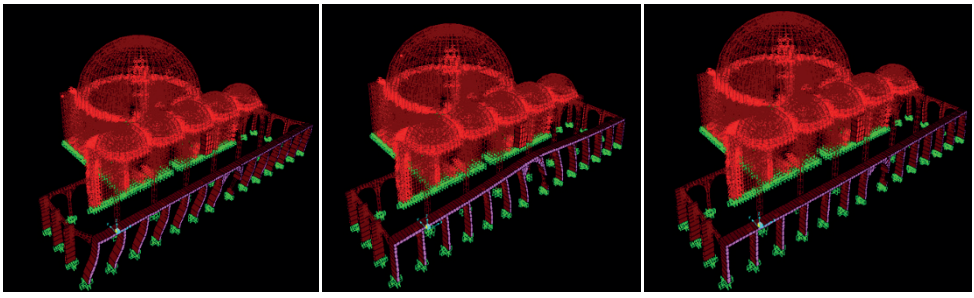
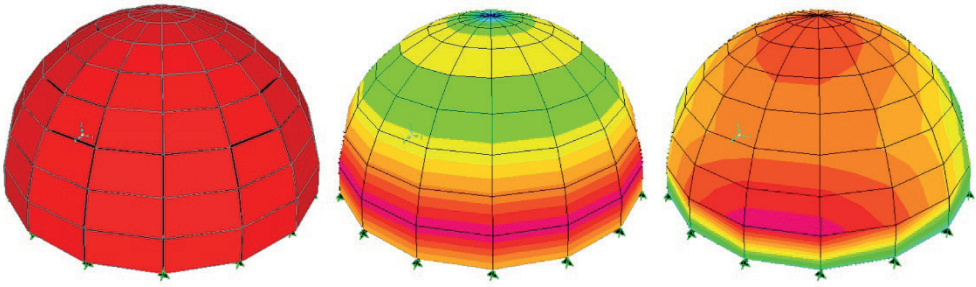


Figure 7. Mode shapes of the structure

When the stress distribution in the structure is checked, it is seen that the stresses increase especially at the corner points of the load-bearing walls and at the points where the domes join, and decrease in the areas where the buttresses added to the load-bearing walls from the outside. It is determined that the stresses increased at the lower points of the columns of the inner and outer porticoes of the building and at the joints of the arches with the columns.

The main dome is modelled separately in three dimensions (shell model) in SAP2000 [18] in order to determine the cracks that may occur in the future. The calculations are carried out according to the most unfavourable support conditions of the dome. Two models are developed: one for vertical loads (self-weight, snow) and one including earthquake loads.

The maximum vertical displacement of the dome under the effect of vertical loads is calculated approximately as d=1.41 mm and d=3.77 mm under the effect of earthquake. The first natural vibration period of the dome is obtained as T_1 = 0.23s. The maximum tensile stress $\sigma_ç$ =1.32kg/cm^2 in the dome under vertical loads and the maximum tensile stress $\sigma_ç$ =6.22kg/cm^2 calculated by including earthquake effects. Figure 8 shows the existing condition of the dome, normal stress distribution under vertical loads and the normal stress distribution of the model with earthquake loads included, respectively.



(a) *(b)* *(c)*

Figure 8. (a) A three-dimensional shell model of the main dome (b) Normal stress distribution under vertical loads (c) With earthquake loads included

The minaret of the structure is considered and modelled in SAP2000 [18] separately since it does not affect the mode shapes of the whole. Due to the fact that the minaret is thin and tall, it can be said to be a slender structure. Therefore, the natural vibration periods of the structure are expected to be longer than the main structure. Figure 9 represents the finite element model of the minaret, the first three mode shapes and stress distribution respectively.

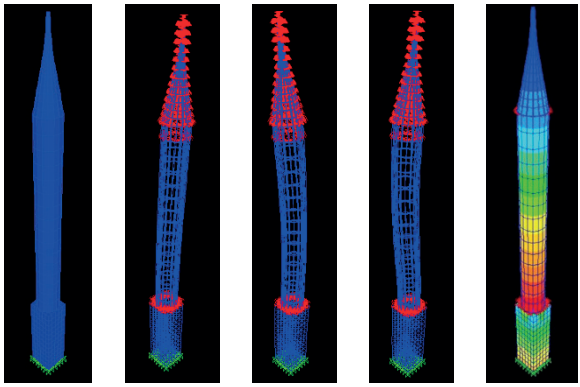


Figure 9. Structural analysis model of the minaret

The first natural vibration period of the minaret is T_1=0.980 sec. in X direction, the second natural vibration period is T_2=0.965 sec. in Y direction and the third natural vibration period is buckling mode and calculated as T_3=0.220 sec. When the stress distribution of the structure is analysed, it is observed that the stresses are higher at the bottom end where it joins with the pedestal, as is expected.

4. Conservatıon And Retrofıttıng Propasals

According to the stress distributions and mode shapes obtained after detailed modelling and analysis studies, structural retrofitting propasals for future restorations are evaluated in this section.

As a result of detailed calculations, it is possible to retrofit the main dome of the building according to the damages that may occur in the future. Firstly, it should be checked whether there are lead, metal or iron elements for tensile stresses at the dome levels. According to the stresses expected to occur in the dome, it can be retrofitted with the necessary reinforcement methods from its plastered interior or from the outside under the lead cladding. In this case, the main dome will be reinforced against earthquakes that may occur by protecting its original conditions. Due to the recent restoration of the mosque within the complex, no mortar pattern could be observed on the plastered and painted columns, bearing walls, arches, and domes, and no cracks have been detected.

However, the complex should be evaluated together with the other existing buildings. The buildings other than the mosque of the complex, which was built by Mimar Sinan in the most glorious time of the Ottoman Empire, are neglected and abandoned. Due to the lack of maintenance, the historical masonry buildings are very vulnerable to damage. Restoration and conservation works should be extended to the entire complex, and the other buildings should be opened to the public.

When examining the load-bearing masonry walls that remain unplastered in other buildings, it is observed that they consist of 50 cm of rubble stone and two layers of bricks. The stones are larger in the first layer at the bottom of the wall and decrease in size in the upper layers. The mortar thickness varies between 5-10 cm along the wall. It has been determined that large cracks have developed in the structure due to a lack of maintenance over time and the impact of earthquakes. The section used as a bazaar is in better condition compared to the other buildings. Rubble stone masonry is plastered in this section. However, it is seen that capillary cracks occur between the mortars. The Figure 10 summarises the other buildings in the Rüstem Pasha complex. Figure 10a represents buildings in neglect and 10b represents buildings in the bazaar.



(a) *(b)*

Figure 10. The other buildings in the Rüstem Pasha complex (a) Wall with a large crack (b) The capillary cracks

Retrofitting methods vary depending on the size of the cracks. Structures should be analyzed in detail when making retrofitting decisions. The unique character of the structure should be preserved through any interventions implemented. For wide cracks, the stitching technique, filling the crack by

grouting with appropriate mortar, re-building the damaged part of the wall can be selected; injection method is suitable for capillary cracks.

5. Conclusion

The Rüstem Pasha Mosque, examined in this study, is one of the rare buildings that represent its era and Mimar Sinan's work. Its single dome, double portico, and its integration with the other buildings in the complex are significant for both architectural and historical heritage. Since the building is a historical heritage and located in an area with high seismic hazard, ensuring earthquake safety and conservation is essential.

A total of 3 finite element models were created for the structure. These are the total building model including interior and exterior porticoes, main dome and load-bearing walls, main dome model and minaret model. Vertical (self weight and snow) and horizontal (earthquake) loads are included in all models. The natural vibration periods and stress distributions of the structure are analysed, the earthquake performance is evaluated and the observations are explained in detail. For the main dome, a model is prepared by considering both vertical loads alone and a combination of vertical and horizontal loads. Thus, the crack and damage zones that may occur in the dome are monitored.

This study will guide the structural retrofitting and conservation principles for the building in the future. Detailed analyses should also be carried out for other buildings within the complex and restoration works should be evaluated as a whole.

Acknowledgement

The authors would like to thank Prof. Dr. Oguz C. CELIK, TNKU Department, of Construction Works, TNKU Architecture Department 2nd year students and Architect Merve Nur YILDIZ their contributions to the study.

References

[1] Küçük, S. G. Comparative Examination of the Istanbul and Tekirdag Rüstem Pasha Mosques in Accordance with Location and Architectural Properties, Art-Sanat, 13, 117-141, 2020.

[2] Alkan, M. Tekirdag Rüstem Pasha Külliyah in Historical Process, Türk Dünyası, 244, 25-66, 2020.

[3] Türkiye Diyanet Foundation, Diyanet Encylopedia of Islam, 35, 293-294, Istanbul, 2008.

[4] Trakya Development Agency, On the Trail of Sinan the Architect: A Journey from One Capital City to Another, Istanbul, 2017.

[5] Türkiye Diyanet Foundation, Diyanet Encylopedia of Islam, 35, 288-290, Istanbul, 2008.

[6] VGMA, General Directorate of Foundations Archive, Turkey.

[7] Bal, A., Simsek, S. The Investigation of Retrofitting Alternatives in Historical Masonry Building with Fiber Reinforced Polymers and Project Application, Harran University Journal Of Engineering, 4, 3, 112-119, 2019.

[8] Kara, H. G. The Construction Properties, Safety, Repairment And Strengthening of Historical Masonry Structures, Istanbul Technical University, Graduate School, M.Sc. Thesis, Istanbul, 2009.

[9] Mahrebel, H. A. Properties, Damages, Structures, Repairing And Strengthening Techniques In Historıcal Buildings, Istanbul Technical University, Graduate School, PhD. Thesis, Istanbul, 2006.

[10] Sesigür, H., Çelik, O. C., Çılı, F. Structural Elements, Damage Types, Repair And Retrofitting in Historical Buildings, Yapi, 303, 10-21, 2007.

[11] Tekirdag Governorship. Rustem Pasha Complex. Retrieved from http://www.tekirdag.gov.tr/rustem-pasa-kulliyesi, 2023.

[12] Süleymanpaşa Municipality. Rüstem Pasha Complex. Retrieved from https://www.suleymanpasa.bel.tr/bilgi/Rüstempaşa-Külliyesi--146, 2023.

[13] Anadolu Agency. Historical Rüstem Pasha Mosque is Being Revitalized. Retrieved from https://www.aa.com.tr, 2023.

[14] TEC-1998. Turkish Earthquake Design Code. Ministry of Public Works and Settlement, Ankara, Turkey, 1998.

[15] TEC-2007. Turkish Earthquake Design Code. Ministry of Public Works and Settlement, Ankara, Turkey, 2007.

[16] TBEC-2018. Turkey Building Earthquake Code. Republic of Turkey Ministry of Interior Disaster and Emergency Management Authority, Ankara, Turkey, 2018.

[17] Disaster and Emergency Management Authority (AFAD). Turkey Earthquake Hazard Map. Retrieved from https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi, last accessed 07/24, 2023.

[18] SAP2000 (Computer Software), Computers and Structures Inc., Berkeley, CA, v. 14.0.0.

[19] Kumral, M., Şans, G., Yalçın, C., Kaya, M., Budakoglu, M. The Effects Of Physical And Chemical Properties On The Formation Of Historical Kufeki Stone In Catalca (Istanbul), Nigde Ömer Halisdemir University (NOHU) Journal of Engineering Sciences, 8, 1, 278-287, 2019.

TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI ANKARA ŞUBESİ
TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI DİYARBAKIR ŞUBESİ
ODEYA ENDAZYARÊN AVAHÎYÊ

KOHEZİF ARA YÜZEY ELEMANLAR İLE MODELLENEN DAİRESEL YIĞMA KEMERLERİN KIRILMA MEKANİZMALARININ BELİRLENMESİ

Sedat KÖMÜRCÜ[1]

[1]Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, komurcus@itu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada yığma kemerler basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği kullanılarak modellenmekte ve yığma kemerlerin doğrusal olmayan davranışları 3 boyutlu sonlu eleman modelleri kullanılarak analiz edilmektedir. Yığma kemerlerin doğrusal olmayan davranışı, kohezif bölge malzemesi (KBM) kullanılarak temas ve hedef elemanlarla elde edilmektedir. Sunulan model ile yığma kemerleri oluşturan yığma birim sayısı, yığma birimlerin yerleştirildiği açı değeri, kemer üzerinde yükün etki ettiği bölgeler göz önüne alınarak sistematik şekilde ara yüzey elemanlar oluşturulmaktadır. Oluşturulan model ile hem düzlem içi hem de düzlem dışı davranış incelenebilmektedir. Görülüyor ki; Yığma kemerlerin kırılma mekanizmaları pratik şekilde analiz edilebilmekte ve model kullanılarak mafsal bölgeleri başarıyla belirlenebilmektedir.

Anahtar Sözcükler: Basitleştirilmiş mikro modelleme, Kırılma mekanizması, Kohezif bölge malzemesi, Eğri eksenli yapılar, Plastisite, Yığma kemer.

Abstract

In this study, masonry arches are modeled using simplified micro modeling technique and nonlinear structural behavior of masonry arches are analyzed using 3D finite element models. Nonlinear behavior of masonry arches is obtained with the contact and target elements using cohesive zone material (CZM) model. Interface elements are systematically created by taking into account the number of masonry units, the angle value at which the masonry units are placed, and the loading conditions. With the created model, both in-plane and out-of-plane behavior can be examined. It is seen that; the collapse mechanisms of masonry arches can be analyzed practically and the hinge regions are determined successfully using the model.

Keywords: Cohesive zone material, Curved structures, Fracture mechanism, Masonry arch, Plasticity, Simplified micro modeling.

1. Giriş

Kemerlerin inşası, eski çağlardan beri mimarlık ve mühendislik alanlarında önemli bir konudur. Mezopotamya, Mısır, Yunan, Roma ve Türk mimarisinde kemerli ve tonozlu yapıların kullanıldığı bilinmektedir. Yığma kemerler, yüzyıllar boyunca mühendislik dehası ve estetik zarafetin kesişmesini temsil eden temel bir mimari ve yapısal unsur olmuştur. Kemerlerin dayanım ve stabilitesiyle ilgili bazı sorular her zaman var olmuştur. Harcın düşük çekme mukavemeti ile tuğla veya bloklar arasındaki zayıf bağlantılar nedeniyle, yığma yapı elemanları çekme ve eğilme dayanımları açısından zayıflık gösterir. Bu durum, yapıların taşıma kapasitesini azaltır ve tasarım seçeneklerini kısıtlar. Bu nedenle, tarihi yapıların korunması ve restorasyonu gibi konularda bu yapıların davranışları hakkında hem geçmişte hem de son yıllarda derinlemesine araştırmalar yapılmıştır.

Kemerler, dayanıklı ve yüksek mukavemetli yığma yapıların inşası açısından yığma duvar ve köprülerde kullanılan özel yapı elemanlarıdır. Ancak özellikle yığma yapılarda kavisli elemanların yapısal davranışlarını anlamak son derece karmaşıktır. Heyman'ın yığma yapıların sınır analizi teorisi üzerine yaptığı öncü çalışma, yığma kemerlerin yapısal davranışını anlamak adına temel oluşturmuştur [1]. Heyman'ın teorik çalışmaları, hesaplamalı ve analitik modellerin gelişiminde önemli rol oynamıştır. Lourenço, yığma yapılar için ileri düzey modelleme yöntemleri sunarak birçok çalışmaya ilham kaynağı olmuştur [2].

Çeşitli yükleme koşulları altında yığma kemerlerin davranışını anlamak için deneysel ve sayısal analizler önemli bir rol oynamıştır. Çeşitli geometrilerde oluşturulan yığma kemerlerin yanal yük taşıma kapasiteleri ve minimum kalınlıkları araştırılmıştır [3]. Kemerli yığma duvarların statik yüklere karşı düzlem dışı davranışları üzerine çalışma yapılmıştır [4]. Yığma kemerlerin sonlu eleman yapısal analizinde elastisite modülünün etkisi araştırılmıştır [5]. Bir diğer çalışmada yığma kemerlerin optimum itme eğrilerini belirlemek için sayısal bir yaklaşım gerçekleştirilmiştir [6]. Yığma kemerlerin analizlerinde kullanılmak üzere çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Yığma kemerlerin doğrusal olmayan değerlendirmesi için ayrık makro elemen yöntemi önerilmiştir [7]. Bir diğer çalışmada yığma kemerler için kuvvet tabanlı eğri eksenli kiriş elemanı önerilmiştir [8].

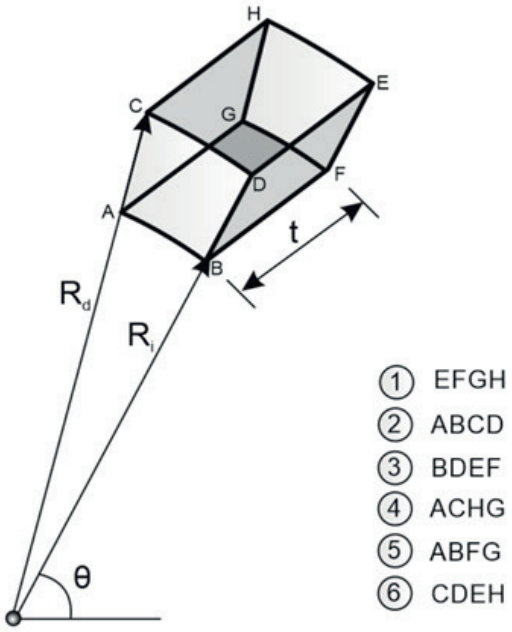
Yığma kemerler özellikle tarihi köprülerde yaygın olarak kullanılmıştır. Bu nedenle yığma köprülerde kemerlerin kullanımı üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Yığma kemer köprülerin geometrik özelliklerinin yapının dayanımına olan etkisi araştırılmıştır [9]. Yığma kemer köprülerde kullanılan dolgu malzemesinin modellenmesi için bir yaklaşım önerilmiştir [10]. Tarihi yığma kemerler için özellikle kritik bir konu olan sismik performans birçok çalışmada incelenmiştir. De Felice ve Giannini, kemer yapıların sismik davranışını ve düzlem dışı direncini araştırarak zayıflıkları vurgulamış, analiz ve koruma yöntemleri önermiştir [11]. Yığma kemer köprüler konusunda bir diğer sismik araştırma Pela ve ark. tarafından yapıldı [12]. Bir diğer çalışmada yığma kemerler için sismik kapasitenin parametrik olarak incelemesi yapılmıştır [13]. Düzensiz temellere ve kemer kalınlığına sahip yığma kemerlerin sismik kapasitesi incelenmiştir [14]. Güçlendirilen yığma kemerlerin deneysel testleri ve sayısal modellemesi yapılmıştır [15]. Çeşitli kompozitlerle güçlendirilmiş antik yığma kemerler ve tonozlar sayısal olarak analiz edilmiştir [16].

Bu çalışmada yığma kemerler sistematik bir şekilde kohezif ara yüzey malzemesi kullanılarak modellenmiş ve yığma kemerlerin kırılma mekanizmaları belirlenmiştir. Yığma kemerler için hem malzeme hem de ara yüzey elemanlar açısından yüksek derecede doğrusal olmayan bir davranışın incelenmesine olanak sağlayan bir sayısal modelin sunulması ve kemerlerin kırılma mekanizmaların pratik ve doğru bir şekilde belirlenmesi bu çalışmanın odak noktasını oluşturmaktadır. Oluşturulan model sayesinde kemerlerin yapısal davranışları başarılı bir şekilde belirlenmektedir.

2. Yığma Kemerin Modellenmesi

Yığma kemerleri oluşturan yığma birimler ve harcın modellenmesi için basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği farklı bir bakış açısıyla ele alınmaktadır. Bu yöntemin esası, yığma birimleri birbirine bağlayan harcın ayrı bir eleman olarak modellenmeyerek harcın yaptığı etkinin ara yüzey elemanlarla oluşturulmasına dayanmaktadır. Kullanılan semboller, metnin sonundaki semboller listesinde ayrıca belirtilmektedir. Şekil 1'de kemeri oluşturan yığma birim eleman görülmektedir. Burada R_i kemerin iç yarıçapını, R_d kemerin dış yarıçapını, t ise kalınlığını göstermektedir. Yığma kemer oluşturulurken θ açısına göre kemerin alacağı form belirlenmektedir. Yığma birim elemanı oluşturan köşe kısımları ABCDEFGH olarak isimlendirilmektedir.

Elemanı meydana getiren 6 adet yüzey alanı şekilde görüldüğü üzere 1-2-3-4-5-6 olarak numaralandırılmaktadır. Bu numaralandırma sistemi yığma kemer formunun oluşturulmasını pratikleştirmektedir. Yığma kemeri oluşturan yığma birimler, alan numaralandırma sistemi göz önüne alınarak sistematik şekilde oluşturulmaktadır.



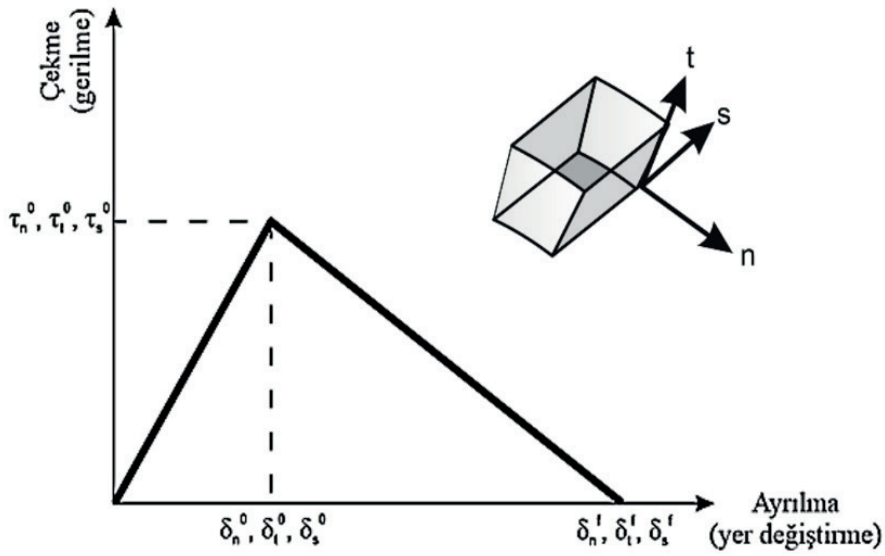
Şekil 1- Yığma birim geometrik parametreleri ve alan numaralandırması

2.1. Kohezif bölge malzemesi (KBM) davranışı

Yığma yapılar gibi birden fazla malzemenin kullanılmasıyla oluşturulan kompozit malzemelerde, kırılma ve ayrılma gibi durumlar malzemelerin tokluk ve süneklik gibi özelliklerini kısıtlamalarından ötürü yapısal analizlerin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi hususunda önemli birer rol oynarlar. Malzemeler arasındaki ara yüzeylerin bünye bağıntısını teşkil eden KBM, ara yüzeylerin birbirlerinden ayrılması için gerekli olan enerji olarak bilinen kritik kırılma enerjisi kavramını kullanarak yüklemeler ve ayrılma miktarı arasındaki ilişki sayesinde yapıda oluşacak olan kırılma mekanizmalarının belirlenmesini sağlar.

KBM modellenirken ara yüzey veya kontakt elemanlardan faydalanılır. KBM için malzeme davranışı bilineer veya eksponansiyel olarak seçilebilir. Buna ek olarak, malzemenin davranışı farklı modlara göre ayrı ayrı veya iki modun birleşimi şeklinde ele alınmaktadır. Ayrıca seçilen malzeme modeli, kritik kırılma enerjisi veya yüzeylerde meydana gelen ayrılmalar şeklinde farklı açılardan modellenebilir. Bu hususlar düşünüldüğünde, ara yüzey elemanlar veya kontakt elemanlarda kullanılan malzeme modelinin davranışının belirlenmesinin detaylı ve önemli bir durum olduğu görülmektedir.

Şekil 2'de görülen grafik kohezyonlu ek yerleri için çekme-ayrılma malzeme kanununu göstermektedir. Bu kanun, birbirine yapışmış malzemelerin gerilme altında nasıl ayrıldığını tanımlamak için kullanılır.



Şekil 2- Kohezif birleşimlerde malzeme davranışı

Burada görülen dikey eksen çekişi (birim alan başına kuvvet, yani gerilme) temsil eder. Yatay eksen ayrılmayı (yer değiştirme veya ayrılma mesafesi) temsil eder. Eğri, çekme gerilmesinin ayrılma ile nasıl değiştiğini gösterir. Başlangıçta ayrılma arttıkça çekme artar ve bir tepe değerine ulaşır. Tepe noktasından sonra, ayrılma artmaya devam ettikçe çekme azalır, bu da malzeme yumuşamasını ve nihayetinde kopmasını gösterir. Bu grafikte τ_n^0, τ_s^0,

τ_t^0 farklı yönlerdeki başlangıç çekme değerleri. δ_n^0, δ_s^0, δ_t^0 farklı yönlerdeki başlangıç ayrılma değerleri. δ_n^f, δ_s^f, δ_t^f malzemenin tamamen koptuğu noktadaki son ayrılma değerlerini göstermektedir. Çekme-ayrılma eğrisinin altındaki alan G_c olarak belirtilir ve bu kırılma enerjisini temsil eder. Bu, malzemeyi ayırmak için gerekli olan enerjidir. K_n, K_s, K_t malzemenin farklı yönlerdeki ayrılmaya karşı direncini temsil eden rijitlik parametreleridir. Bu değerler Denklem 1 ve Denklem 2 kullanılarak hesaplanabilir. Grafik, bir kohezyonlu malzemenin, onu ayırmaya çalışan kuvvetlere maruz kaldığında nasıl davrandığını göstermektedir. Malzeme başlangıçta ayrılmaya karşı direnç gösterir, ancak belirli bir noktadan sonra direnç azalır ve bu da malzemenin kopmasına neden olur. Bu kanun, malzemelerin ve yapıların incelenmesinde, özellikle yapışmış ek yerlerinin gerilme altında nasıl davrandığını anlamada önemlidir ve malzeme bilimi, mühendislik ve yapısal analiz gibi çeşitli alanlarda kullanılır.

$$K_n = \frac{E_t E_h}{h_h(E_t \square E_h)} \tag{1}$$

$$K_s \text{ ve } K_t = \frac{G_t G_h}{h_h(G_t \square G_h)} \tag{2}$$

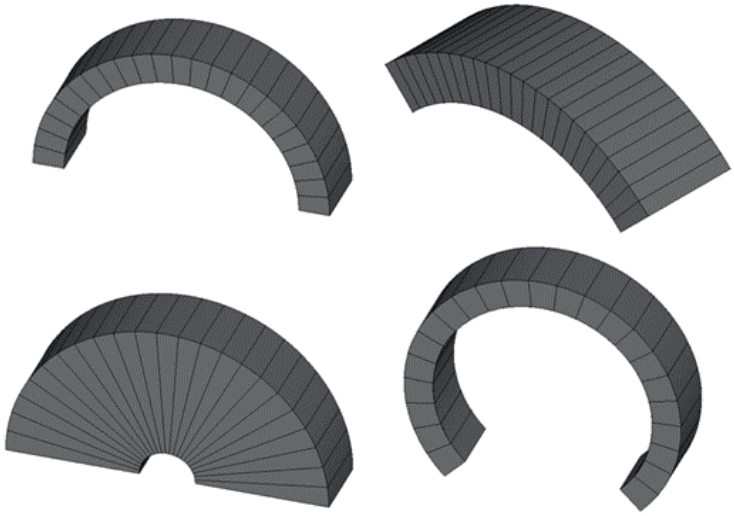
2.2.Ara yüzeylerin modellenmesi

Modelin oluşturulmasında önemli adımlardan birisi yığma birimler arasında bulunan ve harcı temsil etmek üzere de kullanılan ara yüzeylerin oluşturulmasıdır. Bu çalışmada, yığma birimler arasında bulunan kontakt elemanlar (hedef ve temas) Tablo 1 ile gösterilen kod yapısı ile oldukça pratik bir şekilde oluşturulabilir. Burada "ts" kullanılan tuğla sayını ifade etmektedir. Elemanların oluşturulmasında Şekil 1'de sunulan numaralandırma sisteminden faydalanılmaktadır. Bu sayede alan numaraları sistematik bir şekilde tekrarlanarak istenilen sayıda ara yüzey kontakt elemanlar ile teşkil edilmektedir.

Tablo 1- Temas ve hedef yüzeylerin tanımlanması işlemi

Temas yüzeyleri tanımlama	Hedef yüzeyleri tanımlama
*do,i,2,(((ts-1)/2)+1)	*do,i,1,(((ts-1)/2)-1)
i=i*6	i=i*6+(2+((ts-1)/2))*6
ASEL,A,,,i	ASEL,A,,,i
*enddo	*enddo
*do,i,1,(((ts-1)/2)+1)	*do,i,1,((ts-1)/2)
i=5+(i-1)*6	i=(((2+((ts-1)/2))*6)-1)+(i-1)*6
ASEL,A,,,i	ASEL,A,,,i
*enddo	*enddo

Oluşturulan modelleme sistematiği sayesinde çeşitli geometrik parametrelere sahip kemer yapılar pratik şekilde modellenebilmektedir. Sunulan modelleme sistematiği kullanılarak modellenen dairesel kemer formları Şekil 3'te görülmektedir.



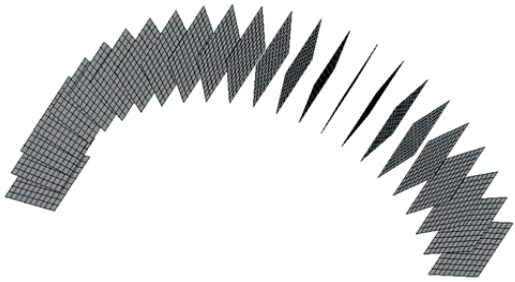
Şekil 3- Yığma kemer formları

3. Sayısal Örnekler

3.1.Model parametreleri

Yığma kemerlerin kırılma mekanizmalarını ANSYS [17] yazılımı ile analiz etmek amacıyla literatürde deneysel olarak incelenen kemer örneğinin geometrik ve malzeme parametreleri kullanılmaktadır [8, 15]. Açıklık L=920 mm, yüksekliği H=510 mm ve kalınlığı t=255 mm olan yığma kemer oluşturulmaktadır. Kemerin dış yarıçapı R_d=576 mm ve iç yarıçapı R_i=456 mm. Tuğlaların ölçüleri boy $k=R_d-R_i$=120 mm, en b=65 mm'dir. Tuğla eni ölçüsü 10 mm olan harç kalınlığını da içermektedir. Yığma birimler $\theta=8^o$ açı ile teşkil edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan tuğla ve harcın elastisite modülü tuğla için E_t=16000 MPa ve harç için E_h=1500 MPa olarak verilmektedir. Poisson oranı değerleri ise tuğla için ν_t=0.2, ve harç için ν_h=0.2'dir. Kayma modülleri tuğla için G_t=6666,67 MPa ve harç için G_h=625 MPa olarak verilmektedir. Yığma kemerin KBM parametreleri; maksimum normal temas gerilimi σ_0=0,005 MPa, maksimum eşdeğer teğetsel temas gerilimi τ_0=1 MPa, Mod I normal ayrılma için kritik kırılma enerjisi G_{kI}=0,0003 MPa ve Mod II teğetsel kayma için kritik kırılma enerjisi G_{kII}=0,004 MPa'dır. Numerik analizler için yapay sönümleme katsayısı η=0'dır, normal basınç temas gerilmesi altında teğet kayma ayarı β=1 olarak seçilmiştir. Temas yüzeylerindeki sürtünme katsayısı μ=0,5'tir. Yığma birleşim yerlerinin normal doğrultudaki K_n rijitliği ile birinci kesme yönündeki K_s rijitliği ve ikinci kesme yönündeki K_t rijitliği Denklem 1 ve Denklem 2 yardımıyla; K_n=165 MPa, $K_s=K_t$=69 MPa olarak hesaplanır.

İki cisim arasındaki temas problemi, rijitliğin aniden kaybolması veya yeniden ortaya çıkması açısından ele alınması en zor doğrusal olmayan durumlardan biridir. Analiz için 8 düğüm noktasına sahip SOLID65 elemanı kullanılmıştır. Her düğümün x, y ve z yönlerinde üç yer değiştirme serbestlik derecesi vardır. Eleman, hem çekmede hem de basınçta kırılma mekanizmalarını gösterebilir. Tuğla yığma birimler için bu eleman kullanılarak standart mesh ağı elde kullanılmaktadır. Yığma birimler arasında kullanılan CONTA174 ve TARGE170 elemanları yüzeysel elemanlardır. Temas ve hedef yüzeyler arasındaki etkileşimi göstermek için kullanılırlar [17]. Tuğlalar arasında teşkil edilen ara yüzeyler örnek olarak Şekil 4'te görülmektedir.

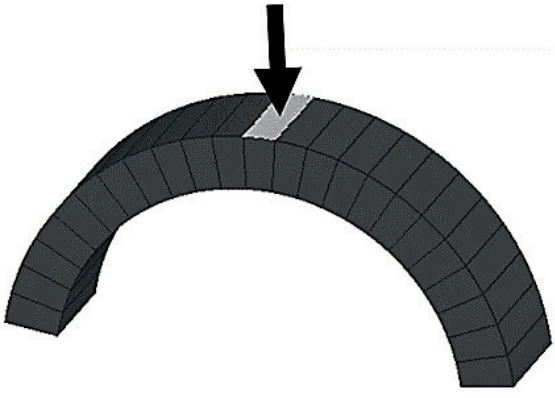


Şekil 4- Temas ve hedef elemanların kullanıldığı ara yüzeyler

Sınır koşulları olarak analizlerde kemerlerin sağ ve sol uç noktalarındaki yüzeyler mesnet olarak tamamen sabitlenir. Yüklemeler deplasman kontrollü şekilde kemer üst kısmından yapılır. Ayrıntılı bir veri seti elde etmek ve doğrusal olmayan analizin başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi için yükleme işlemi 50 alt adıma bölünmüştür.

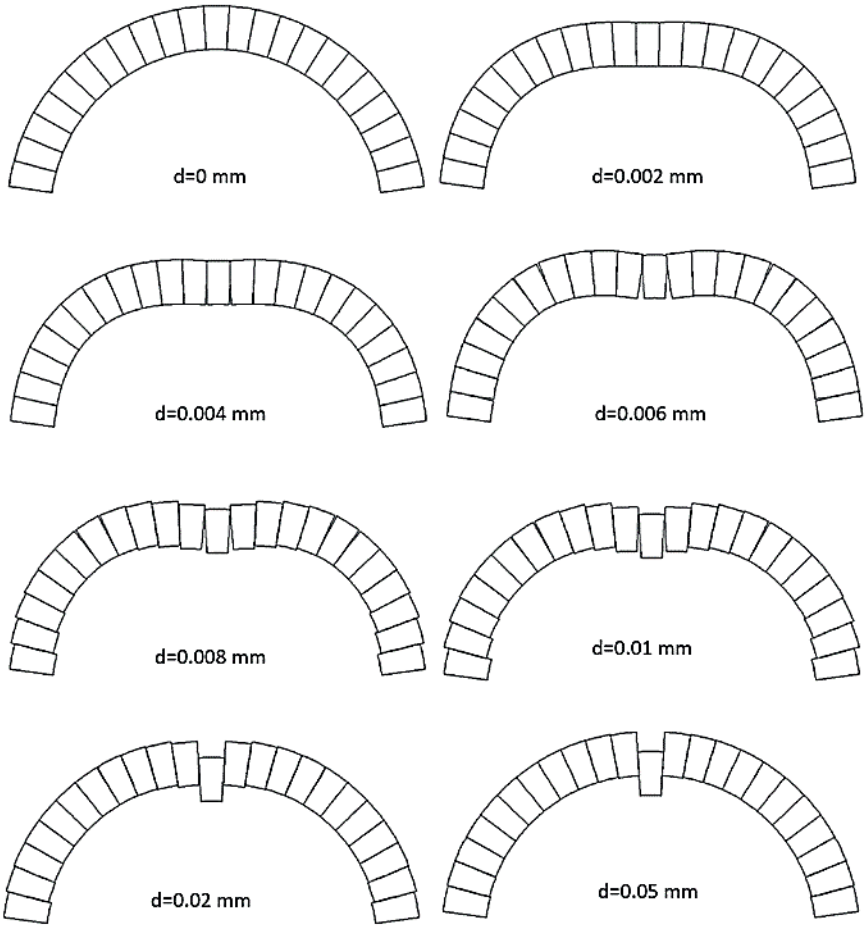
3.2. Yükleme 1: Kemer en üst noktasından simetrik yükleme

Bu bölümde en üst noktasından, genellikle kilit taşı olarak adlandırdığımız yığma birim üzerinden yüklenen kemer örneği Şekil 5'te görülmektedir. Kemer 23 adet yığma birim ve yığma birimler arasında teşkil edilen KBM modeli ile oluşturulmaktadır.



Şekil 5- Kemer en üst noktasından yükleme durumu

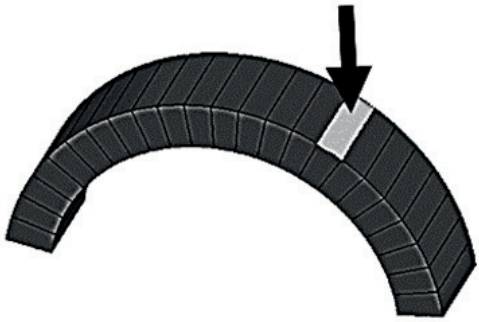
Analizler sonucunda yığma kemerlerin kırılma mekanizmaları Şekil 6'da detaylı olarak sunulmaktadır. Burada analiz sonuçlarında görülen yapıda meydana gelen maksimum yer değiştirme(d) değerine göre meydana gelen deformasyonlar adım adım görülmektedir. Yükleme sonucu kemerde meydana gelen kırılma mekanizması d=0.006 mm gibi düşük olarak nitelendirebileceğimi bir miktarda ortaya çıkmaktadır. Yükleme d=0.05 mm'ye kadar devam ettirildiğinde oluşan bazı mafsalların kapandığı, yığma birimler arasında kaymaların gerçekleştiği görülmektedir. Analiz sonucunda görülen, sadece kilit taşının kayması şeklinde görülen deformasyon durumu, yığma kemerin göçme sonrasındaki durumunu temsili olarak gösterdiğini söylenebilir.



Şekil 6- Yığma kemerin farklı yükleme değerlerindeki deforme olmuş şekilleri

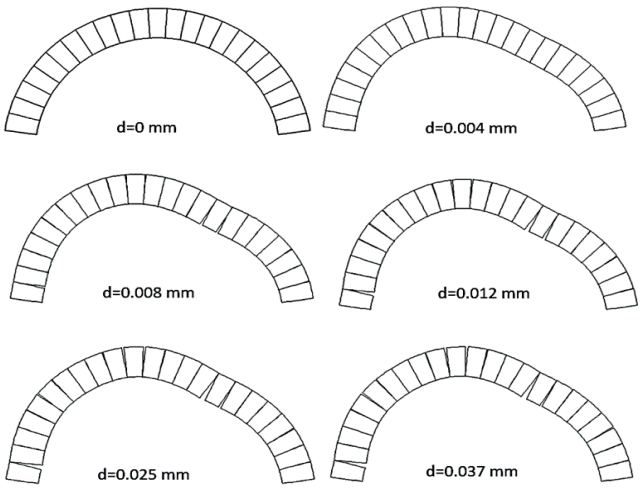
3.3. Yükleme 2: Yığma kemerde simetrik olmayan yükleme

Bu bölümde keyfi olarak seçilen bir yığma birim üzerinden yüklenen kemer örneği Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7- Kemerde simetrik olmayan yükleme durumu

Analizler sonucunda yığma kemerlerin kırılma mekanizmaları Şekil 8'de detaylı olarak sunulmaktadır. Analiz sonuçlarında görülen yapıda meydana gelen maksimum yer değiştirme(d) değerine göre meydana gelen deformasyonlar görülmektedir.

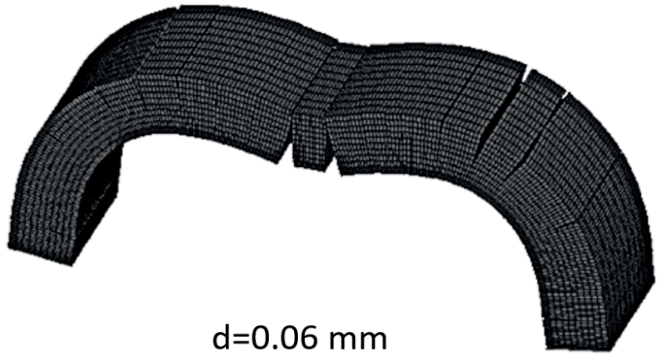


Şekil 8- Yığma kemerin farklı yükleme değerlerindeki deforme olmuş şekilleri

Yükleme sonucu ilk mafsalın, kemerin yükleme yapılan kısmında ortaya çıktığı görülmektedir. Sonrasında oluşan diğer üç mafsalla beraber kemer çökme durumuna ulaşmaktadır.

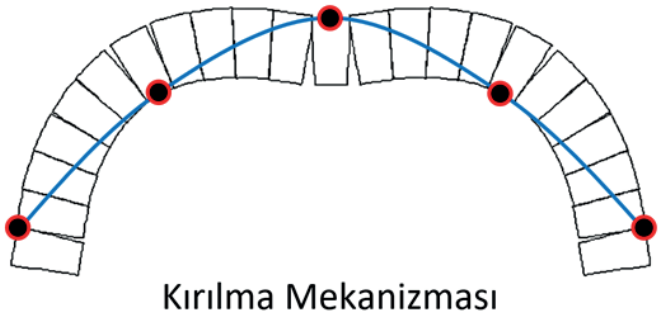
4. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yığma kemerin yapısal davranışını görmek için sonlu elemanlar analizlerinin sonuçları bu bölümde sunulmaktadır. Kilit taşı üzerinden yüklenen kemerin üç boyutlu deformasyonu Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 9- Kemerde görülen üç boyutlu deformasyon (d=0.06mm).

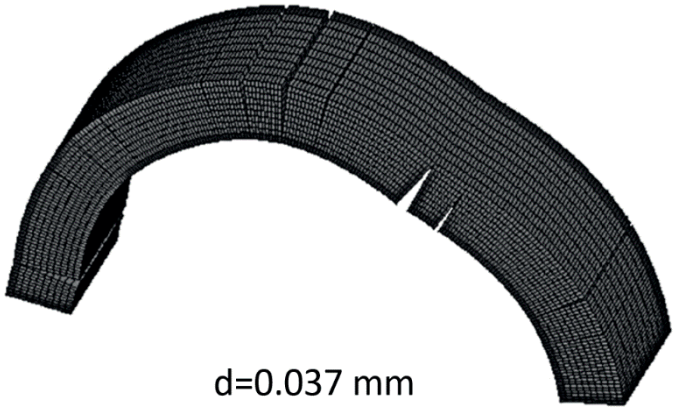
Kemer üst noktasından simetrik olarak yüklenmesi sonucu ortaya çıkan kırılma mekanizması Şekil 10'da görülmektedir. En üst noktasından simetrik olarak yüklenen kemerde beş mafsallı kırılma mekanizması meydana gelmektedir.



Şekil 10- Simetrik yüklü yığma kemerde kırılma mekanizması

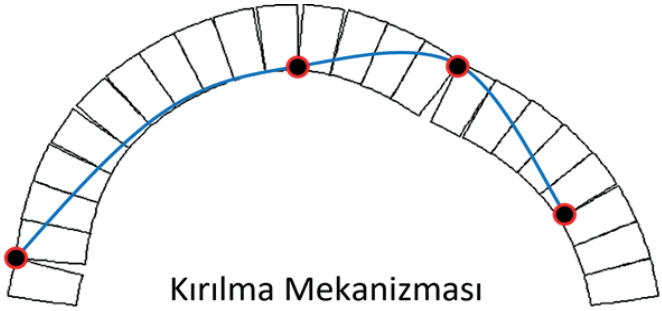
Belirli bir yükleme koşulu altında kemer yapıların stabilitesi ve güvenliği, yapıların geometrisine ve malzemenin mekanik özelliklerine büyük ölçüde bağlıdır. Yığma kemerde çekme dayanımının ihmal edilebilir bir düzeyde olduğu bilinen bir durumdur. Kemerler için güvenlik koşulu, itme çizgisinin kemerin her bir bölümünün içinde tutulduğunda elde edilir. İç kuvvetlerin sonucu merkezin dışına doğru hareket ettiğinde kesit parçalanır ve yüksek deformasyonların olduğu bir aşama başlar. Bunun sonucu olarak kemerin basınç altındaki kenarının ezildiğini gösteren bir mafsal oluşur.

Üst noktasından asimetrik olarak yüklenen kemerde, deforme olmuş şekil ve mafsal bölgeleri asimetrik olarak yüklenen kemer içinde başarıyla belirlenebilmektedir. Yığma birimler arasındaki ayrım şekilde açıkça görülmektedir. Yığma tuğlaların ayrılma noktası, taşıyıcı sistemin çökme noktaları olarak değerlendirilebilir. Kemerin üç boyutlu deformasyon Şekil 11'de görülmektedir.



Şekil 11- Kemerde oluşan üç boyutlu deformasyon (d=0.037 mm).

Kemerde simetrik olmayan yükleme durumunda ortaya çıkan kırılma mekanizması Şekil 12'de görülmektedir. Mafsal sayısı dörde eşit veya daha fazla olduğunda yapı kararsız hale gelir ve çökme meydana gelmektedir.



Şekil 12- Kemerde oluşan kırılma mekanizması

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, yığma kemerler basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğinin sistematik ve yeni bir şekilde kurgulanmasıyla oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modelleri kullanılarak analiz edilmektedir. Sunulan sistematik yapı kullanıldığında, yığma kemerlerin geometrilerinin oluşturulması ve ara yüzeylerin tanımlanması işlemleri oldukça pratik olarak yapılabilmektedir. Bu husus ise ortaya konulan sonlu eleman modelinin; farklı yığma birim sayısı, farklı yerleşim açıları ve farklı geometrik parametreler içeren yığma kemerlerin modellenmesinde kullanılmasını kolaylaştırmaktadır.

Yığma birimler, kontakt elemanlar bünyesindeki KBM modeliyle birleştirilerek yığma kemer davranışını etkili şekilde yansıtmaktadırlar. Bu durum, yığma kemerlerde meydana gelmesi beklenen çekme-ayrılma davranışının doğru bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır.

Sunulan model sayesinde, yığma kemerin deforme olmuş şekilleri ve kırılma mekanizmaları elde edilmektedir. Simetrik yüklü kemerde beş mafsallı çökme mekanizması, asimetrik olarak yüklenen kemerde ise dört mafsallı çökme mekanizması başarılı olarak tespit edilmiştir. Kemerlerin kırılma mekanizmalarının önceden belirlenmesi sayesinde yığma kemerlere uygulanacak güçlendirme yöntemi ve güçlendirilecek bölgeler daha etkili bir şekilde tespit edilebilir.

Yığma kemerlerin mekanik davranışlarının daha iyi anlaşılması, tarihi yığma yapıların güçlendirilmesi ve geleceğe güvenle devredilmeleri açısından sayısal modelleme çalışmalarının önemli bir çözüm aracı olarak kullanıldığı söylenebilir.

Semboller listesi

b	: Tuğla eni
d	: yer değiştirme miktarı
E_t	: Tuğla elastisite modülü
E_h	: Harç elastisite modülü
G_c	: Çekme-ayrılma eğrisinin altındaki alan, kırılma enerjisi
G_h	: Harç kayma modülü
G_t	: Tuğla kayma modülü
G_{kI}	: Mod I normal ayrılma için kritik kırılma enerjisi
G_{kII}	: Mod II teğetsel kayma için kritik kırılma enerjisi
H	: Yükseklik
k	: Tuğla boyu
K_n, K_s, K_t leri	**:** Normal, kayma ve enine yönlerdeki ayrılmaya karşı rijitlik parametre-
L	: Açıklık
R_i	: Kemerin iç yarıçapı
R_d	: Kemerin dış yarıçapı
t	: Kalınlık
β	: Normal basınç temas gerilmesi altında teğet kayabilme ayarı
δ_n^0, δ_s^0, δ_t^0	: Farklı yönlerdeki (normal, kayma ve enine) başlangıç ayrılma değerleri
δ_n^f, δ_s^f, δ_t^f	: Malzemenin tamamen koptuğu noktadaki son ayrılma değerleri
η	: Yapay sönümleme katsayısı
θ	: Yığma birimlerin yerleşim açısı
v_h	: Harç Poisson oranı
v_t	: Tuğla Poisson oranı
μ	: Sürtünme katsayısı
σ_0	: Maksimum normal temas gerilimi
τ_0	: Maksimum eşdeğer teğetsel temas gerilimi
τ_n^0, τ_s^0, τ_t^0	: Farklı yönlerdeki (normal, kayma ve enine) başlangıç çekme değerleri

Kaynaklar

[1] Heyman, J., The Masonry Arch, Ellis Horwood Ltd, 1982.

[2] Lourenço, P. B., Computational Strategies for Masonry Structures, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, 1996.

[3] Cavalagli, N., Gusella, V., Severini, L., Lateral loads carrying capacity and minimum thickness of circular and pointed masonry arches, Int. J. Mech. Sci. 115-116: 645-656, 2016.

[4] Edri, I.E., Yankelevsky, D.Z., Rabinovitch, O., Out-of-plane response of arching masonry walls to static loads, Eng. Struct., 201: 109801, 2019.

[5] Quinteros-mayne, R., Arteaga, I. De, Goñi-lasheras, R., Villarino, A., Villarino, J.I., The influence of the elastic modulus on the finite element structural analysis of masonry arches, Constr. Build. Mater. 221: 614-626, 2019.

[6] Ricci, E., Fraddosio, A., Daniele, M., Sacco, E., A new numerical approach for determining optimal thrust curves of masonry arches, Eur. J. Mech. / A Solids 75: 426-442, 2019.

[7] Cannizzaro, F., Pantò, B., Caddemi, S., Caliò, I., A Discrete Macro-Element Method (DMEM) for the nonlinear structural assessment of masonry arches. Eng. Struct. 168: 243-256, 2018.

[8] Di, P., Addessi, D., Sacco, E., A multiscale force-based curved beam element for masonry arches. Comput. Struct. 208: 17-31, 2018.

[9] Arteaga, I.De, Morer, P., The effect of geometry on the structural capacity of masonry arch bridges, Constr. Build. Mater. 34: 97-106, 2012.

[10] Sarhosis, V., Forgács T., Lemos J.V., A discrete approach for modelling backfill material in masonry arch bridges, Comput. Struct. 224: 106108, 2019.

[11] De Felice, G., & Giannini, R., Out-of-plane Seismic Resistance of Masonry Arches. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 05(2), 253-271, 2001.

[12] Pelà L., Aprile A., Benedetti A. Seismic assessment of masonry arch bridges Eng. Struct. 31, 1777-1788, 2009.

[13] Dimitri R., Tornabene, F., A parametric investigation of the seismic capacity for masonry arches and portals of different shapes Eng. Fail. Anal. 52: 1-34, 2015.

[14] Zampieri, P., Simoncello, N., Pellegrino, C., Seismic capacity of masonry arches with irregular abutments and arch thickness, Constr. Build. Mater. 201: 786-806, 2019.

[15] Cancelliere, I., Imbimbo, M., Sacco, E., Experimental tests and numerical modeling of reinforced masonry arches, Eng. Struct. 32, 776-792, 2010.

[16] Bertolesi, E., Milani, G., Carozzi, F.G., Poggi, C., Ancient masonry arches and vaults strengthened with TRM, SRG and FRP composites: Numerical analyses, Compos. Struct. 187: 385–402, 2018.

[17] ANSYS 23.0 (2023) Element reference.

28 EYLÜL 2024

7. ULUSLARARASI TARİHİ YAPILARIN GÜÇLENDİRİLMESİ VE GELECEĞE GÜVENLE DEVRİ SEMPOZYUMU

7. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRENGTHENING HISTORICAL BUILDINGS AND TRANSFERRING THEM SAFELY TO THE FUTURE

7. SEMPOZYÛMA NAVNETEWEYÎ LI DERBARÊ QEWÎKIRIN Û PARASTINA AVAHÎYÊN DÎROKÎ

DİYARBAKIR, SEZAİ KARAKOÇ KÜLTÜR MERKEZİ

B SALONU - 4B OTURUMU

Oturum Başkanları
Hakkı Polat Gülkan, İdris Bedirhanoğlu

MINI SEMPOSIUM METE SOZEN ANISINA

Diyarbakır'daki Dört Ayaklı Minare'nin Mw7.7 Kahramanmaraş Depremi Sonrası Performans Değerlendirmesi
H. Polat Gülkan, İlker Kazaz, Emriye Kazaz

Tarihi Yığma Kemer Köprünün Patlama Yükü Altında Güçlendirilmesi
Amin Bagherzadeh Azar, Ali Sarı

Tarihi Meslek Lisesi Yapı Kompleksinin Deprem Güçlendirmesi
Orhan Yapıcı, Şahin Güneş, İdris Bedirhanoğlu

Tarihi Yapılarda Deprem Sonrası Yangınla Mücadele
Bilgehan Bakırhan

DİYARBAKIR'DAKİ DÖRT AYAKLI MİNARENİN MW7.7 KAHRAMANMARAŞ DEPREMİ SONRASI PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

H. Polat GÜLKAN[1], İlker KAZAZ[2], Emriye KAZAZ[3]

[1]Başkent Üniversitesi, hpgulkan@baskent.edu.tr
[2]Erzurum Teknik Üniversitesi, ilkerkazaz@erzurum.edu.tr
[3]Atatürk Üniversitesi, emriyekazaz@atauni.edu.tr

Özet

Diyarbakır'da 3 bin 252 binanı ağır hasar gördüğü ve 22 binanın yıkıldığı 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinde Diyarbakır'ın önemli tarihi yapılarından biri olan Dört Ayaklı Minareyi hafif sayılabilecek derecede etkilemiştir. Bu çalışmada yapı üzerinde son yıllarda gözlemlenen hasarların nedenleri, bu hasarlara yapılan müdahaleler ve 6 Şubat depreminde yapının sergilemiş olduğu sismik davranış detaylı ve ileri analiz yöntemleri vasıtasıyla incelenmiştir. Yapıya çok yakın bir noktada kaydedilmiş olan deprem ivme kaydı kullanılarak gerçekleştirilen analizler yapının 500 yıllık ömründe maruz kalmış olabileceği sismik yüklemelere ışık tutması ve yapının güvenle geleceğe taşınabilmesi açısından önemlidir.

Anahtar Sözcükler: Dört ayaklı minare, Hasar, Yığma yapı, Explicit analiz, 6 Şubat Kahramanmaraş Depremi.

Abstract

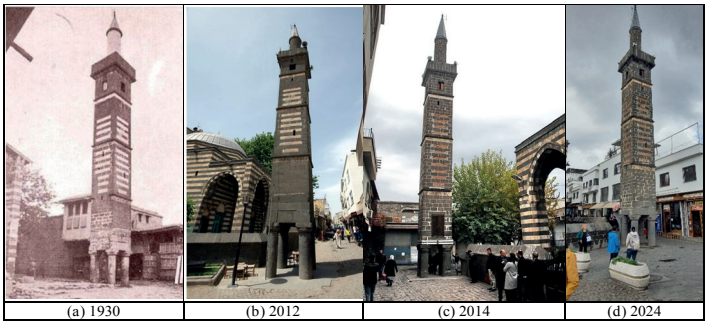
The Kahramanmaraş earthquakes of February 6, 2023, in which 3 252 buildings in Diyarbakır alone were severely damaged and 22 buildings were destroyed, had a relatively slight impact on the Four-Legged Minaret, serving a five-hundred-year-old adjacent mosque, one of many landmark important historical structures of Diyarbakır, Turkey. In this study, the reasons for the damages observed on the structure in recent years, the interventions made to these damages and the seismic behavior of the structure during the February 6 earthquake are examined through detailed and advanced analysis methods. Analyzes carried out using earthquake acceleration records recorded at a close distance to the structure are important in terms of shedding light on the seismic loads that the structure may have been exposed to in its 500-year life-span and allowing the structure to be carried safely into the future.

Keywords: Free-standing, Four-legged minaret, Damage, Masonry structure, Explicit analysis, 6 February Kahramanmaraş Earthquake.

1. Giriş

6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş merkezli olarak gerçekleşen 7.7 büyüklüğündeki deprem, Türkiye'nin güneydoğusunda ve Suriye'nin kuzeyinde büyük yıkıma yol açmıştır. Bu deprem, özellikle Hatay, Gaziantep, Şanlıurfa, Adıyaman, Diyarbakır ve Malatya gibi şehirlerde ciddi hasar yaratmış ve çok sayıda can kaybına neden olmuştur. Depremin etkileri sadece modern yapı stoku üzerinde değil, aynı zamanda tarihi ve kültürel miras niteliğindeki yapılar üzerinde de derin izler bırakmıştır. Tarihi yapılar, mimari özellikleri ve kültürel değerleri nedeniyle korunması gereken önemli varlıklardır. Ancak, bu yapılar genellikle modern yapı standartlarına göre inşa edilmemiş olup, depreme karşı daha savunmasızdırlar. Türkiye, tarihsel süreç boyunca birçok medeniyete ev sahipliği yapmış bir ülke olarak zengin bir kültürel mirasa sahiptir ve bu miras, sıklıkla deprem tehlikesiyle karşı karşıya kalmaktadır.

Diyarbakır, zengin tarihi ve kültürel mirası ile tanınan bir şehirdir ve bu miras 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depreminin yarattığı sarsıntılardan ciddi şekilde etkilenmiştir. Özellikle Diyarbakır'ın sembolik yapılarından biri olan Dört Ayaklı Minare, bu depremden etkilenen tarihi yapılardan biridir (Şekil 1). Dört Ayaklı Minare, Diyarbakır'ın tarihi Sur ilçesinde yer alan önemli bir İslami eserdir. 1500'lü yıllarda Akkoyunlu Sultanı Kasım Bey tarafından yaptırılan bu yapı, dört sütun üzerine inşa edilmiş benzersiz mimarisi ile dikkat çekmektedir. Minarenin bu dört ayaklı yapısı, İslam'ın dört mezhebini temsil ettiği düşünülmektedir.



Şekil 1- Şeyh Mutahhar Camii Dört Ayaklı Minaresinin (a) 1930 yılı güney ve doğu cephesinden (b) 2012 doğu cephesinden, (c) 2014 batı cephesinden ve (d) Mart 2023 güney ve doğu cephesinden çekilen fotoğrafları.

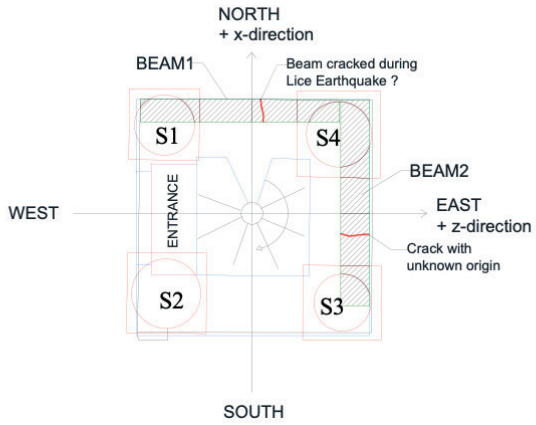
6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremi, Diyarbakır'ın önemli tarihi yapılarından biri olan Dört Ayaklı Minareyi hafif sayılabilecek derecede etkilemiştir. Bunda, yapının geçmişten günümüze taşıdığı hasarlara rağmen yakın tarihlerde uygulanan güçlendirme çalışmalarının etkisi büyüktür. Bu hasarların giderilmesi ve minarenin gelecekteki depremlere karşı korunması için bu tür yapıların davranışının kapsamlı bir şekilde anlaşılması zaruridir. Bu süreçte, yapının tarihi ve kültürel değerine uygun şekilde hareket edilmesi büyük önem taşımaktadır. Dört Ayaklı Minarenin korunması, sadece Diyarbakır için değil, tüm insanlık için önemli bir kültürel mirasın devamlılığını sağlamak anlamına gelmektedir.

Kahramanmaraş depremi, tarihi yapıların dayanıklılığını ve korunma stratejilerini bir kez daha gündeme getirmiştir. Bu çalışma, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depreminin tarihi bir yapı üzerindeki etkilerini ileri yapısal analiz yöntemleri incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada ilk olarak Dört Ayaklı Minarenin geçmişten günümüze tecrübe ettiği yapısal hasarlar açıklanmış, yine yakın tarihte uygulanan güçlendirme uygulamasının yapısal performansa etkisinin değerlendirilmesi için kullanılan modelleme ve analiz yöntemleri açıklanmıştır. Diyarbakır bölgesinin depremselliği açıklanarak ve 6 Şubat depremlerinde minareye çok yakın bir yerde kaydedilen yer ivmesi kaydı kullanılarak yapının deprem performansı değerlendirilmiştir.

2. Minarenin Deprem Öncesi Durumu ve Güçlendirme Uygulamaları

2.1. Yapının Plan Tipi ve Mimari Özellikleri

Minare zeminden külahın bitimine kadar yaklaşık olarak 24 m yüksekliğindedir. Şekil 2'de gösterildiği gibi kaide dört kalın sütunla Baldaken (Baldacchino) formunda düzenlenmiştir. Kenarları fazla düzgün olmayan kaide 1.88x1.89 m ölçülerindedir. Kuzeydoğu ve güneybatı sütunlar diğer ikisinden daha kalındır. Sütun çapları 0.45–0.55 m arasında değişmektedir. Ayrıca sütunların uzunlukları da farklıdır. Doğu cephedeki sütunlar batıdakilere göre biraz daha uzundur. Sütun uzunlukları 1.60 m ile 1.80 m arasındadır. Sütunlar basit profilli başlıklara sahiptir. Sütunlar arasındaki uzunluk ve çap farkını dengeleyebilmek amacıyla başlıklar da değişik ölçülerdedir. Başlıkların üstündeki dikdörtgen yastıklarla kaide tamamlanmaktadır. Kare planlı gövde, üç kornişle dört bölüme ayrılmıştır. Minare gövdesi kaideden şerefe koruluklarına kadar 13.3 m'dir.



Şekil 2- Temel plan görünümünde yönlerin ve koordinat ekseninin birleştirilmesi.

Kaide görevini gören sütunlar yekparedir. Gövde bazalt, beyaz kalker ve tuğla malzeme ile inşa edilmiştir. Gövdenin alt bölümü, kornişin altındaki yazı kuşağına kadar düzgün kesme bazalt taş malzeme ile yapılmıştır (Şekil 1). Yazı kuşaklarında ve üst silmenin altındaki taş sırasında beyaz renkli kalker taş, kornişlerde bazalt taş malzeme kullanılmıştır. Gövdenin ikinci bölümü ve üçüncü bölümünün yarısı bir sıra bazalt, üç sıra tuğlayla almaşık tarzda inşa edilmiştir. Tuğla sıraları köşelere kadar uzanmayıp içerde kesilerek oluşturdukları yatay dikdörtgen çerçevelerle cephelere hareketlilik katılmıştır. Tuğla bölümler sıvayla kapatılmışsa da günümüzde sıvaların büyük bir kısmı dökülmüştür. Gövdenin üst bölümünde ve petekte tamamen bazalt taş kullanılmıştır. Şerefe korkulukları bazalt taş levhalardan oluşmaktadır. Dışarıdan kurşun kaplı külah ahşaptır. Duvarların iç bölümü genellikle moloz taş malzeme ile yapılmıştır. Yer yer tuğla ve pencere kenarlarında ve köşelerde düzgün kesme bazalt taş malzeme kullanılmıştır.

2.2. Deprem öncesi hasar durumu

Dört ayaklı minare, oldukça hassas bir yapısal forma sahip olmasına ve şiddetli deprem üretebilecek iki tehlikeli fay bölgesi olan Doğu Anadolu Fay Zonu ve Bitlis-Zagros Kenet Zonu'nun yakınında bulunmasına rağmen, beş asırdır yıkılmadan ayakta kalmayı başarmıştır. Minarede görünen yapısal hasarlar, Şekil 3'de gösterildiği gibi, sütunlar arasındaki boşluğu dolduran ve minarenin ağırlığını taşıyan iki ana lentonun tüm yüksekliği boyunca

uzanan çatlaklardır. Ayrıca sütunlarından birinde de çatlak mevcuttur. Bu çatlakların ne zaman ve nasıl oluştuğu bilinmiyor. Çatlak tüm kesitin derinliği boyunca devam etmektedir. Doğrulanmamış görgü tanıklarının ifadelerine göre, bu çatlaklardan biri (BEAM 2'de görülen) 6 Eylül 1975'te merkez üssü Diyarbakır'ın 75 km kuzeydoğusunda olan M6.6 Lice depremi sonrasında gelişmiştir. Diğeri ise merkez üssü 110 km kuzey-kuzeydoğu olan 1 Mayıs 2003'teki M6.4 Bingöl Depremi'nden sonra ortaya çıkmıştır. Diyarbakır'da hissedilen herhangi bir depremde olduğu gibi her iki depreme ilişkin kayıtlı yer hareketi verileri mevcut değildir. Yüzyıllardır ayakta olan kare kesitli minare, büyük ölçekli bir sismograf görevi görmekte ve bu sayede bu çatlakların oluşması için kendisini etkilemiş olması gereken yer hareketinin makul sınırı incelenmiş ve ayakta kalması için yer hareketinin sınırları belirlenmiştir [1, 2]. Yazarlar, bu çatlakların yapısal problemler, yapıldığı bazalt taşının hava koşulları nedeniyle aşınması ve bozulması, toprak deformasyonları ve son yıllarda minarenin yakın çevresindeki araç trafiğinden kaynaklanmış olabileceği değerlendirmiştir [1-4].

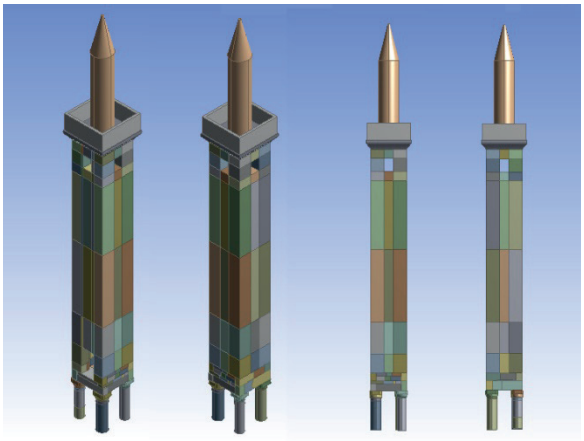


Şekil 3- Ana kirişlerde çatlaklar

2.3. Sonlu eleman modeli

Bu araştırmada kullandığımız hesaplama platformu, minarenin mimari çizimlerini girdi olarak kullanan ANSYS LS-DYNA'dır [5]. Yapısal hesaplamalarda gerçeğe en yakın modelin oluşturulması için gayret gösterilmiştir. Minarenin statik ve dinamik davranışını incelemek üzere oluşturulan sonlu eleman katı modeli Şekil 4'te gösterilmektedir. Modelde, malzemenin doğrusal olmayan davranışı ve taş duvar birimleri arasındaki ara yüz sürtün-

mesini ve temas davranışını dikkate alınmıştır. Model oluşturulurken minarenin alt kısmında sütunlar ve başlıkları, ana kirişler ve ikinci sıradaki taş bloklar ayrı ayrı modellenmiştir. Minareyi oluşturan taş birimler bu kısımda minare gövdesinin geri kalanına göre daha büyüktür. Şekil 2'de taş blokların birleştirilmesinde harç kullanılmadığı görülmektedir. Bunların arasındaki etkileşim gerçekte olduğu gibi kontak davranışıyla modellenmiştir. Farklı taş birimleri arasındaki etkileşim, sürtünmeli ve tek yüzeyli temas türleri ile modellenmiştir. Tek yüzey teması daha sonra duvardan düşen taşların etkileşimini modellemek için kullanılır. Minare gövdesi ve şerefe üstü kısım, inşaat derzlerinin etkisini simüle etmek amacıyla ayrı parçalar halinde oluşturulmuştur. Bu parçalar arasındaki temas durumu bağlı (bonded) veya sürtünmeli (frictional) temas olarak alınmıştır. Minarenin hasar durumunu yansıtacak şekilde S1 kolonu, B1 ve B2 kirişlerindeki çatlaklarda modele dâhil edilmiştir.



Şekil 4- Minarenin sonlu eleman katı modeli

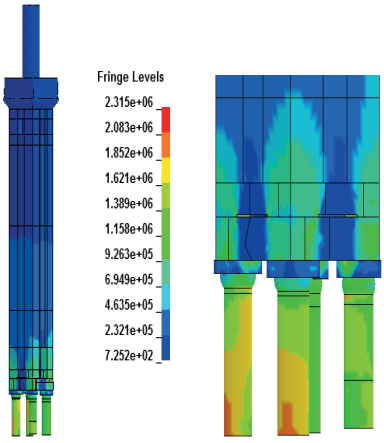
2.4. Malzeme özellikleri

Dört sütunun ve başlıklarının elastik modulü için ilk iki sıra taş ünitesi, ana lentolar, döşeme taşları, minare merdivenleri, balkon parapetleri E = 45 GPa olarak belirlenmiştir. Poisson oranı ve çekme mukavemeti sırasıyla 0.2 ve 12 MPa olarak alınmıştır. Bazaltın basınç ve çekme dayanımları sırasıyla 50 MPA ve 10~12 MPa olarak alınmıştır. Gövdede dışta kesme, içte moloz taştan oluşan minare duvarlarında bağlayıcı olarak horasan harcı kullanılmıştır.

Minarenin kaidesinin oluşturan ilk iki sıra taştan sonraki kısımlarda harç ve taşlar ayrı olarak modellenmemiş, bu iki malzemenin ortak özelliklerini taşıyan homojen bir malzeme olarak ele alınmıştır. Homojenleştirilmiş duvar elemanının basınç dayanımı f_k = 4.74 MPa olarak bulunmuştur. Duvar elemanının elastik modulü TBDY (2018)'de önerildiği gibi E_m=750.f_k = 3554 MPa olarak hesaplanmıştır. Taşlar arasında statik ve dinamik sürtünme katsayısı sırasıyla 0.6 ve 0.5 olarak alınmıştır. Gövdede, taş ve harcın birlikte çalışması dikkate alınarak efektif elastik modül 3500 MPa olarak alınmıştır.

3.5. Statik analiz sonuçları

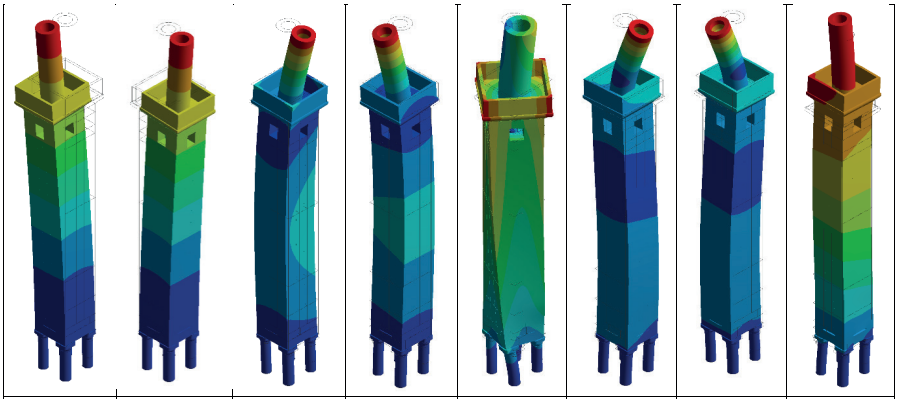
Minarenin taşlardaki çatlaklar da dikkate alınarak yapılan statik analiz sonuçları Şekil 5'te gösterilmektedir. Gerilme durumunu gösteren bu şekile bakıldığında minarenin mükemmel bir şekilde tasarlandığı sonucuna varılır. Minarede sabit yükleri doğrudan sütunlara aktaracak bir kemer sistemi geliştirilmiştir. Kirişlere (lento) orta noktada yük aktarımını engellemek için ikinci sıra taşların kirişe temas edecek alt yüzeyi boyunca 1-2 cm'lik bir çentik oluşturulmuştur. Bu ikinci sıra taşlar kemer gibi davranarak yükü sütunların bulunduğu köşe bölgelere aktarmaktadırlar. Yapının kirişler çatlamış olmasına rağmen sağlam bir şekilde ayakta durmasının bu mekanizmaya bağlı olduğu düşünülmektedir. Statik yükler altında minareyi taşıyan sütunların alt noktasında 2.3 MPa'lık basınç gerilmesi oluştuğu gözlemlenmektedir.



Şekil 5- Minarenin mevcut durumda kendi ağırlığı altındaki gerilme durumu (birim Pa).

3.6. Modal analiz

Modal analiz doğrusal bir analizdir. Plastisite ve temas elemanları gibi doğrusal olmayan durumlar, tanımlanmış olsalar bile hesaplamalarda göz ardı edilir, doğrusal malzeme özellikleri ve temas yüzeylerinde tam bağlı davranış dikkate alınır. Modal analiz için temaslar rijit bağlı olarak kabul edilerek taban bölgesinin esnekliği ortadan kaldırıldığı için taban bölgesi taş elemanlarının malzemesinde değişiklik yapılması gerekmektedir. Tabanı oluşturan bazalt lento, döşeme, başlık ve diğer taş ünitelerin elastik modülü 3.54 GPa olarak gövde malzemesiyle aynı alınmıştır. Şekil 6 minarenin ilk sekiz modunu göstermektedir. Minare gövdesinin simetrik şekli nedeniyle x ve z yönlerindeki ötelenme modlarının birbirine çok yakın frekanslara sahip olduğu görülmektedir. Ana mod şekilleri bir yönde konsol eğilme modu olup hafif dik bileşen içermektedir. Bu titreşimin frekansı 1.65 Hz (~0,6 sn) civarındadır. Etkin modal kütlenin toplam kütleye oranı, x ve z yönünde ilk iki öteleme modunda 0.60 civarındadır.



Şekil 6- İlk sekiz mod şekli.

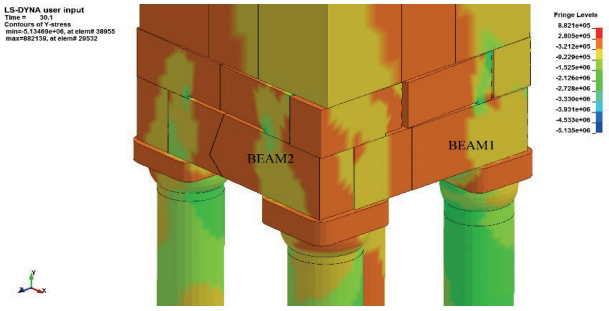
3.7. Güçlendirme yöntemi ve analizleri

Minare en son onarımını 2014 yılında geçirmiştir. Sütunlar arasında bulunan kuzey ve doğu cephelerindeki iki adet kiriş tek parça taştan imal edilmiş ve zaman içerisinde dış zorlamalar neticesinde iki taş da kırılmıştır. Değişik tarihlerde çekilen fotoğraflar incelendiğinde çatlakların az da olsa genişlediği kanaati oluşmuştur. Elimizde bu kanaati test edecek başka sayısal bir veri de

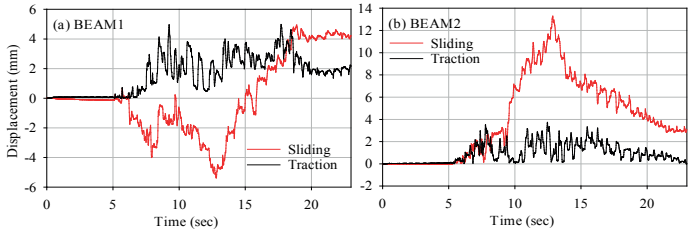
bulunmamaktadır. B1 kirişinde açılma daha az gözlemlenirken, B2 kirişinde çatlak boyutu alt yüzeyde 3-4 mm üstte 2-3 mm civarındadır. Çatlak genişliğinin çevresel titreşimler ve araç çarpmaları sonucu arttığı düşünülmektedir. İki ana lentoda iki önemli çatlak olmasına rağmen minare ayakta kalmaya devam etmiştir.

Gelecekteki bir depremde minarenin deprem performansını belirlemek amacıyla yapı, mevcut çatlaklı durumdaki Vasquez Park yer hareketi kullanılarak analiz edilmiştir [4]. Bazaltın çekme dayanımı 8 MPa olarak alınmıştır. Deprem sonrası çatlakların ve taban kaidesini oluşturan taş birimlerin deplase durumunu Şekil 7'de gösterilmektedir. Çatlakların daha da genişlediği ve çatlak yüzlerinin birbirine paralel kaydığı tespit edilmiştir. Şekil 8, çatlağın her iki tarafındaki taşların göreceli hareketlerinden elde edilen açılma, kapanma ve kayma yer değiştirmelerini göstermektedir. Açılma yer değiştirmeleri her iki çatlak ara yüzünde önemli bir ayrışma göstermemektedir. BEAM1›de maksimum 4 mm ve 2 mm›lik kalıcı çatlak açıklığı oluşmaktadır. Kayma hareketleri daha şiddetli olup BEAM2'de 14 mm'lik bir değere ulaşmaktadır. Tüm bu analizlerde S1 kolonundaki çatlak ara yüzünde herhangi bir ayrılma gözlenmemiştir. Bu analiz, minarenin hasar görmüş durumda bile gelecekteki depremlere dayanabilecek sağlam yapısını kanıtlamaktadır.

Yukarıdaki analiz bulguları ve yapının mevcut hasar durumu göz önüne alınarak minare kaidesinin alt sıra taşları etrafına yapılacak sargılama işleminin yapının sismik performansını iyileştireceği ve mevcut çatlakların açılmasını engelleyeceği/sınırlandıracağı değerlendirilmiştir. Bu amaçla Şekil 9'da gösterildiği gibi çatlakların aşırı açılmasını önlemek ve gelecekteki depremlere karşı yapısal güvenliği arttırmak amacıyla, çatlak kirişlerin etrafında iki kat çelik kuşaktan oluşan bir yapısal müdahale önerilmiştir. İki sıra halinde 10x100 mm kesit alanına sahip çelik levhalardan üretilen kayışın çekme kuvvetlerine karşı koymaya yeterli olduğu belirlenmiştir. Köşebent şeklinde 4 parça halinde üretilecek olan bu trapez kemerler, Şekil 9'daki gibi minarenin yanlarının ortasında dört noktada cıvatalarla birleştirilecektir. Birleşimde kullanılacak cıvata M20 olmaktadır. Köşelerin her iki yanında çeliğin sürtünme ve taşlama etkisinden taşa zarar vermesini önlemek için çelik bant ile taş yüzeyler arasına her iki tarafta 50 cm'lik kısımlar boyunca ~1 mm kalınlığında kurşun sac yerleştirilmelidir. Bu önlem uygulanmasına rağmen, 2015 yılında yaşanan terör olaylarında zarar görmüş ve kaldırılmıştır.



Şekil 7- Vasquez Park deprem kaydına göre lentolarda mevcut çatlakların durumu ve tabandaki taş birimlerin deformasyonları.



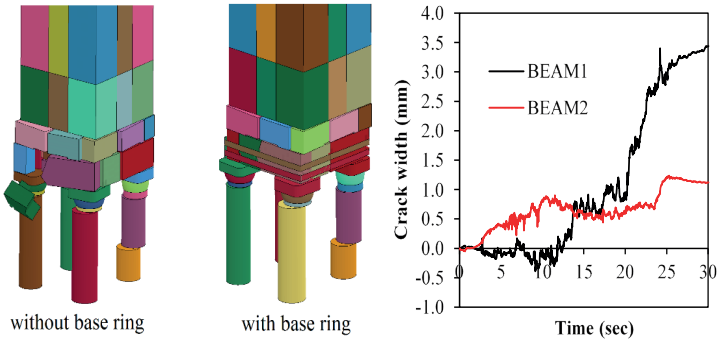
Şekil 8- Çatlak lentolar için çatlak ara yüzlerinde hesaplanan kayma ve çekmeler.

Ayrıca Şekil 9'da gösterildiği gibi sütun başlarına oturan dört adet kirişin, çatlak ve sağlam olanlar dâhil, alt yüzeyinde çekme bölgesinde sütun başlıkları arasında kalan kısma karbon elyaf kumaş yapıştırılarak kirişlere çekme kapasitesi kazandırılmıştır. İki adet kırılarak ayrılan kirişlerde kırık kısmın içine bazalt taşıyla uyumlu çalışacak epoksi enjekte edilerek taşın tek parça çalışmasını sağlanmıştır. Bu önlemin minarenin 6 Şubat depremlerinde yapının daha fazla hasar görmesini engellediği değerlendirilmiştir.



Şekil 9- Çelik gergi kemeri ve karbon elyaf kumaş uygulamaları

Çelik kemerli ve çelik kemersiz minare modellerinin tabanındaki çatlak lentolar ve kaide birimlerinin yarım ölçekli (x0,5) 1999 Mw7.4 İzmit deprem kaydı kullanılarak gerçekleştirilen dinamik analizleri neticesinde elde edilen şekil değiştirme durumu taban taşı Şekil 10'da gösterilmektedir. Kemerlerin kirişlerin etrafında gerekli olan sargılamayı sağlamada etkili olduğu görülmektedir. Çelik kuşaklar olmadığında çatlak lentolar, çatlağın her iki yanında aşırı yer değiştirme göstermekte ve hatta uygulanan yer hareketinin şiddetinden dolayı minare tabanında taşların dizimi bozulmaktadır. Kolon başlıkları kolonların üzerinde ve S1 kolonunu oluşturan parçalar mevcut çatlak ara yüzeyinde kaymaktadır. Çelik kemerli modelde çatlak kirişler yerinde kalmakta ve Şekil 10b'de gösterildiği gibi çatlaklar yalnızca 3-4 mm açılmaktadır.



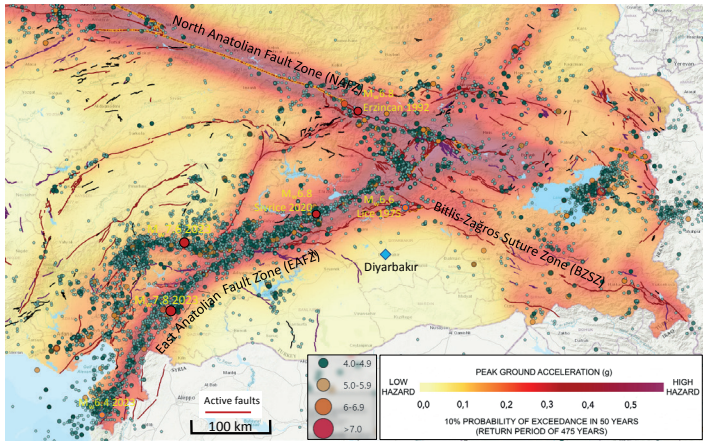
Şekil 10- Yarım ölçekli (x0,5) İzmit kaydı altında çelik kuşağın sargılama etkisi ve iki ana lento üzerindeki çatlak genişliğinin değişimi.

3. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Sonucu Oluşan Yapısal Hasar

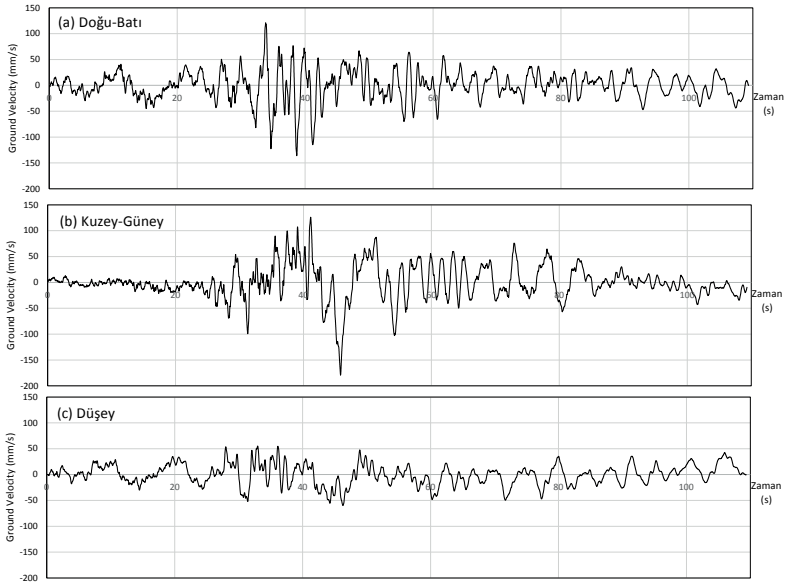
6 Şubat 2023 tarihinde, Türkiye'nin Kahramanmaraş ilinde iki büyük deprem meydana geldi. İlk olarak, saat 04:17'de meydana gelen 7.7 büyüklüğündeki deprem, bölgeyi derinden etkiledi. Aynı gün içinde, saat 13:24›te, 7.6 büyüklüğünde ikinci bir deprem daha yaşandı. Bu depremler, Kahramanmaraş ve çevresindeki illerde büyük yıkıma ve can kaybına neden oldu. Bu depremlerden etkilenen illerden biri de Diyarbakır oldu. Diyarbakır, depremin merkez üssüne nispeten uzak olmasına rağmen, sarsıntının şiddeti burada da ciddi hasara ve kayıplara yol açtı. Diyarbakır'da birçok bina yıkıldı veya ağır hasar gördü. Diyarbakır'da toplam 45 bin 149 binada 373 bin 947 bağımsız birimde hasar tespit çalışması yapıldı. 1.110 binada yer alan 8 bin 284 bağımsız birimin acil yıkılması gereken ağır hasarlı ve

yıkık olarak tespit edildi. 1.044 binadaki 12 bin 106 bağımsız birimin orta hasarlı, 10 bin 977 binada bulunan 109 bin 784 bağımsız birimin az hasarlı, 27 bin 334 binadaki 226 bin 953 bağımsız birimin ise hasarsız olduğu tespit edildi.

Şekil 11'de Diyarbakır bölgesini çevreleyen fay sistemleri, bazı tarihi depremlerin ve 6 Şubat depremlerinin merkez üsleri ve artçı sarsıntıları gösterilmektedir. Diyarbakır merkezde Bağlar ilçesinde bulunan TK2101 istasyonunda kaydedilen yer hareketi minarenin bulunduğu noktaya 3.4 km mesafededir. İstasyonun konumunun Mw7.7 büyüklüğündeki ilk depremin merkez üssüne uzaklığı 287 km'dir. İstasyonda okunan en büyük yer ivmesi değerleri doğu-batı, kuzey-güney ve düşey bileşenler için sırasıyla 0.073g, 0.078g ve 0.034g'dir. 2019 yılından itibaren geçerli olan Türkiye Sismik Tehlike Haritasına (TBDY 2018 [6]) göre 475 yıl geri dönüş periyoduna sahip tasarım düzeyindeki DD-2 depremi için minare konumundaki maksimum yer ivmesi (PGA) 0.136g'dir. En büyük yer hızı ise 10.23 cm/s'dir. TK2101 istasyonunda kaydedilen yer hızlarının üç bileşeni Şekil 12'de çizdirilmiştir. En büyük yer ivme değerleri DD-2 deprem seviyesinin altında kalırken, en büyük yer hızlarının standart deprem seviyesini aştığı görülmektedir. Yer hareketinin kuzey-güney bileşeninde 17.89 cm/s'lik bir değer gözlemlenmektedir.

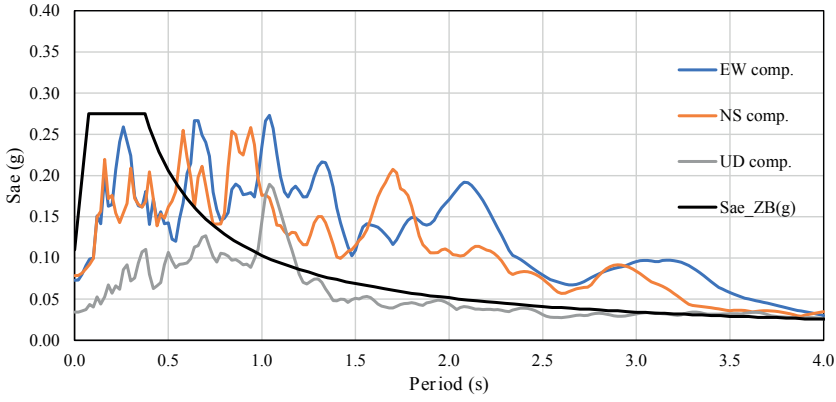


Şekil 11- Türkiye›nin doğu ve güneydoğusunu etkileyen Doğu Anadolu Fay Zonu (EAFZ) ve Bitlis-Zagros Kenet Zonu (BZSZ) üzerindeki tarihsel depremlerin konumu.



Şekil 12 – TK2101 istasyonunda kaydedilen yer hızları.

Şekil 13'te yer hareketi kaydının ivme spektrumları DD-2 yer hareketi seviyesi için tasarım spektrumları ile karşılaştırılması verilmektedir. İstasyon ve minarenin bulunduğu konumlar için belirlenen zemin sınıfı ZB'dir. Yapının başlangıç titreşim periyodu olan 0.60 s sonrası bölgede DD-2 ivme spektrumu aşılmaktadır.



Şekil 13- TK2101 istasyonunda kaydedilen yer hareketi ivme spektrumu bileşenleri.

3.1. Gözlemlenen deprem hasarı

Şekil 14'te gösterildiği gibi Dört Ayaklı Minarenin güney ve kuzey cephelerinde alt kasımlarda küçük ölçekte derz açılmaları gözlemlenmiştir. Karbon elyafla yapılan güçlendirmeye bağlı olarak tahribatın minimum düzeyde kaldığı değerlendirilmiştir.



Şekil 14- Güney (üst) ve kuzey (alt) cephelerinde küçük ölçekli derz açılmaları.

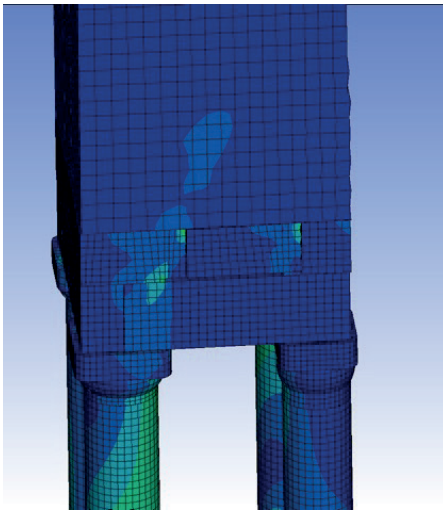
Karbon elyaf kumaş ve epoksi uygulaması ile güçlendirilen kirişlerde uygulamanın üzerinden 10 yıl geçmiş olmasına rağmen hem çatlak ilerlemesinin durduğu hem de deprem sırasında çatlakların etkilenmediği görülmüştür (Şekil 15).



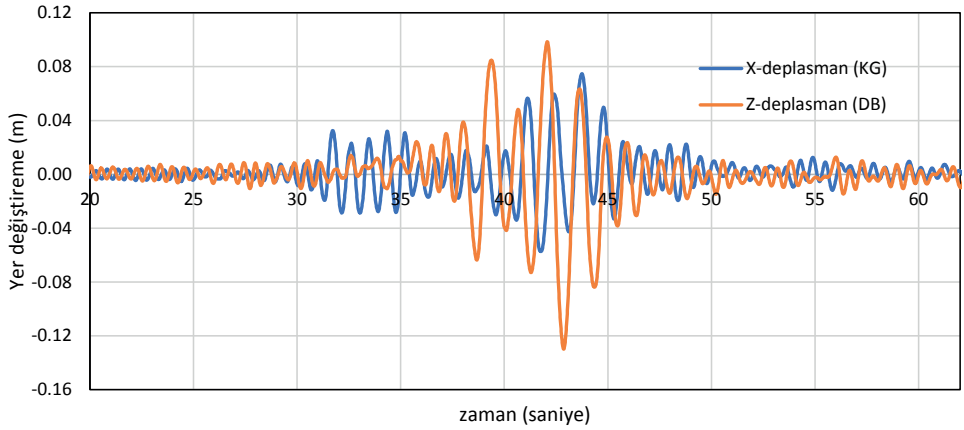
Şekil 15- Karbon elyaf kumaşla güçlendirilen kirişler.

4. Yapısal Hasarın Analizi

TK2101 istasyonunda kaydedilen deprem ivme kayıtları kullanılarak minarenin dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 16'da kuzey cephe duvarında oluşan birim şekil değiştirme dağılımı gösterilmiştir. Deprem etkisiyle ikinci sıradaki kemer taşında ve iki taşın birleştiği noktadan gövdeye doğru ilerleyen gerinim artışı Şekil 14'te gösterilen hasarla uyumlu olduğu değerlendirilmiştir. Şekli 17'de yapının şerefe seviyesinde her iki yatay yönde hesaplanan yer değiştirme grafikleri verilmiştir. Doğu-batı yönünde tepedeki en büyük yer değiştirme 13 cm seviyesinde gerçekleşmektedir. Bu seviyenin kaide tabanından yüksekliği 13.3 m olduğu dikkate alındığında deprem sırasında bu yönde yaklaşık olarak %1'lik bir ötelenmenin gerçekleştiği anlaşılmaktadır.



Şekil 16- Kuzey cephe duvarında oluşan birim şekil değiştirme dağılımı



Şekil 17- Şerefe (balkon) seviyesinde yer değiştirmeler.

5. Sonuçlar

Kahramanmaraş depremleri tarihi yapıların dayanıklılığını ve korunma stratejilerini bir kez daha gündeme getirmiştir. Bu çalışma, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depreminin sıra dışı bir minare üzerindeki etkilerini ileri yapısal analiz yöntemleriyle incelenmesini gerçekleştirmiştir. Çalışmada ilk olarak Dört Ayaklı Minarenin geçmişten günümüze tecrübe ettiği yapısal hasarlar açıklanmış, yine yakın tarihte uygulanan güçlendirme uygulamasının yapısal performansa etkisinin değerlendirilmesi için kullanılan modelleme ve analiz yöntemleri açıklanmıştır. Diyarbakır bölgesinin depremselliği ve 6 Şubat depremlerinde minareye çok yakın bir yerde kaydedilen yer ivmesi kaydı kullanılarak yapının deprem performansı değerlendirilmiştir. Hesaplamalardan çıkartılan sonuçlar 2014 sonrasındaki güçlendirme tedbirlerinin (epoksi sargısı, çelik kuşakla sargılama) minareyi menfi yönde etkilemediğini teyit etmektedir. Diyarbakır için kuvvetli yer sarsıntısına denk gelen 2023 depremindeki hareketlerde minarenin barındırdığı hasarın ciddi bir şekilde yaygın hale gelmediğini göstermektedir.

Bu çalışma modern analiz ve güçlendirme tekniklerinin korunması gereken yapıların güvenle geleceğe taşınması için elzem olduğunu göstermektedir.

Kaynaklar

[1] Kazaz, İ., Akansel, V., Gülkan, P., Deprem Dayanırlığı İçin Eşsiz Bir Örnek: Diyarbakır Şeyh Mutahhar Camisinin Dört Ayaklı Minaresi, Uluslararası Katılımlı Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, Diyarbakır, 2009.

[2] Kazaz, İ., Akansel, V.H, Gülkan, P. and Kazaz, E., 2012, Seismic behavior of a four-legged masonry minaret, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portekiz.

[3] Kazaz, İ., Diyarbakır Şeyh Mutahhar Camii dört ayaklı minaresinin yapısal davranışı ve hasarlarının incelenmesi, Döner Sermaye Raporu, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2014.

[4] Kazaz, İ., Gülkan, P. and Kazaz, E., Numerical assessment of cracks on a free-standing masonry minaret, International Journal of Architectural Heritage, 15 (4), 526-547, 2021.

[5] ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 16.0, 2014.

[6] TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Resmi Gazete, Tarih: 18 Mart 2018, Sayı: 30364, 2018.

STRENGTHENING AND RETROFITTING OF HISTORICAL MASONRY ARCH BRIDGE UNDER BLAST LOAD

Amin Bagherzadeh AZAR[1*], Ali SARI[2]

[1]Institute of Earthquake Engineering and Disaster Management, Istanbul Technical University, azar19@itu.edu.tr
[2] Faculty of Civil Engineering, Istanbul Technical University, asari@itu.edu.tr

Abstract

The researchers developed a detailed micro-model using the ABAQUS finite element (FE) software to accurately represent the structural behavior. They utilized the Johnson-Holmquist II damage model and the Mohr-Coulomb material model to characterize the properties of the stone units and the back-fill, respectively. To align with the theoretical framework of the JH-2 model, a computational code was formulated in VUMAT. The Jones-Wilkins-Lee equation of state (EOS) was applied to model the characteristics of trinitro-toluene (TNT). 500kg charge weight was posioned below the deck. Based on the findings, the authors suggest strengthening methods to enhance the blast resistance of masonry bridges.

Keywords: Blast Loads, Damage, Historical Bridges, Strenghening methods, Finite Element.

1. Introduction

The assessment of the structural condition of masonry arch bridges has gained significance in recent years due to two primary factors. Firstly, these bridges, constructed using clay brick or stone, are considered valuable cultural assets at both regional and national levels, necessitating their conservation for posterity. Secondly, goverments is showing a growing interest in establishing safety standards strategies. This includes defining threshold conditions for traffic loads and proposing suitable interventions to mitigate the adverse impacts of road and railway traffic, thereby minimizing damage. The longevity of thousands masonry arch bridges in current operation is itself evidence allowing attesting the good performance of these constructions, which is mainly due to the type of the materials used and also to the high robustness of the built solutions. Stone bridges, in particular, are examples of sustainability compared to modern reinforced concrete and steel bridges, generally requiring higher maintenance costs. In such context, several experimental and numerical studies have been presented worldwide [1–8]. The European study [9] referenced 220,000 bridges across Europe, revealing that approximately 41% of these structures are arched bridges, 35% are over a century old, and 62% are narrow span bridges. The research highlights the significance of investigating stone arch bridges within the railway network. Another study in Europe [10], compiled with contributions from various European countries, indicates that around 63% of railway bridges are arched, with 79% of them having spans shorter than 5.5 meters and 71% falling within the age range of 90 to 160 years. In countries such as Italy, Portugal, and France, there exist approximately 56,889, 11,747, and 78,000 railway bridges, respectively, representing 96%, 91%, and 78% of the total number of extant railway bridges in each respective nation. It is imperative to formulate conservation strategies aimed at preserving the structural integrity and safety of these bridges, while also ensuring their performance and heritage significance. Preservation efforts may employ traditional methods utilizing original materials and techniques, or modern innovative approaches that leverage advanced materials and equipment for potentially more effective outcomes. The analysis of how structures react to typical loads such as self-weight, support settlements, traffic loads, and induced vibrations allows for establishing connections between structural damages, defects, and failure patterns with the behavior of bridges in both longitudinal and transverse orientations. Strengthening and rehabilitation strategies utilized to address structural issues involve transverse ties and longitudinal anchors, reinforced

concrete elements, as well as the injection of mortar or cement grout into the infill. Many stone bridges hold historical value and preserving their cultural and historical significance requires interventions aimed at improving or restoring structural safety based on specific criteria outlined in international charters [11-12]. Various general techniques for enhancing structural strength are also examined, particularly in cases where there is a need to increase the load-bearing capacity due to changes in traffic conditions. This study aims to explore the effects of blast propagation on a particular section of the Halilviran Bridge, specifically focusing on evaluating the structural damage resulting from the blast incident. The research seeks to conduct an in-depth structural assessment of the bridge under realistic conditions to identify the factors leading to collapse and evaluate the extent of potential damage.

2. Case Study: Halilviran bridge

The study focused on the Halilviran bridge in Turkey as a representative model for its research investigation. This stone arch bridge comprises seven arches (Figure 1). The bridge spans 132 meters in length and 5.07 meters in width. However, the research specifically targeted a specific span of the bridge to assess the extent of damage to various structural components.

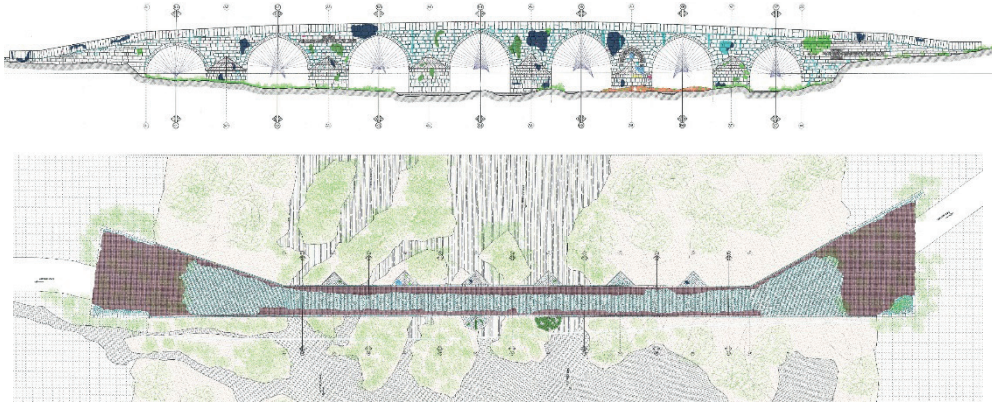


Figure 1. The case study, Halilviran bridge.

3. FE Models of the Case Study

The bridge model, shown in Figure 2, however the study fouce of specific span of the bridge Figure 3 utilized Lagrangian elements with reduced

integration of eight nodes 3D (C3D8R) using finite element models in the ABQUS software. The span of the bridge was 6.26 meters, with a total length of 10.76 meters. The mortar thickness was assumed to be zero, as indicated in Figure 3, and the boundary constraints were defined as pinned supports. In numerical modeling of a bridge in Abaqus, the pin boundary condition is considered to simulate the realistic constraints and support conditions of the bridge structure:

- **Simulating Realistic Supports:**

In actual bridge construction, certain supports are designed to allow rotation but prevent translation in one or more directions. A pin boundary condition in Abaqus can effectively model these types of supports, where the structure is restrained in certain degrees of freedom but is free to rotate.

- **Simplifying the Model:**

Using a pin boundary condition simplifies the computational model by reducing the complexity of the constraints. This can help in obtaining more accurate results while ensuring that the model remains computationally efficient.

- **Capturing Structural Behavior:**

The pin boundary condition allows the bridge model to realistically simulate how forces and moments are transferred through the structure, particularly at joints or supports. This helps in analyzing the distribution of stresses and strains within the bridge.

- **Avoiding Over-Constraining:**

In numerical modeling, over-constraining a structure can led to unrealistic stress concentrations and may not accurately reflect the actual behavior of the bridge. A pin boundary condition provides the necessary constraints without overly restricting the bridge's natural movement.

- **Ensuring Stability:**

Applying appropriate boundary conditions, such as pins, ensures the stability of the model during analysis. It helps in preventing rigid body motions that can occur if the structure is not properly constrained.

TNT explosives were positioned at below the deck, as previously mentioned. The analysis encompassed TNT charges weighing 500 kg, and focused on examining the deformation, and damage sustained by the masonry arch

bridge. The analysis duration was set at 50 milliseconds to allow the blast wave sufficient time to reach the bridge and capture all of its reflections. The explosive's considered as sphere shape. Table 1 and Table 2 provide the input parameters for the Johnson-Holmquist II model, for masonry and infill material properties. Table 3 presents the material properties for the TNT explosive charge.

Table 1. The masonry material properties

ρ (Kg/m^3)	Density	2600
A	Intact normalized strength parameter	1.01
B	Fractured normalized strength parameter	0.68
C	Strength parameter (for strain rate dependence)	0.005
(GPa)	Shear modulus	17.8
D_1	Parameter for plastic strain to fracture	0.005
D_2	Parameter for plastic strain to fracture (exponent)	0.7
β	Fraction of elastic energy loss converted to hydrostatic energy	0.68
σ (MPa)	Compressive strength	51
K_1	First pressure coefficient (equivalent to the bulk modulus)	19.5
K_2	Second pressure coefficient	-23
K_3	Third pressure coefficient	2980
HEL (GPa)	Hugoniot elastic limit	4.5
P_{HEL} (GPa)	Pressure component at the Hugoniot elastic limit	2.6
$\dot{\varepsilon}_0$	Reference strain rate	1
σ^*_{fmax}	Maximum normalized fractured strength	0.2
υ	Poisson's ratio	0.2
M	Fractured strength parameter (pressure exponent)	0.83
N	Intact strength parameter (pressure exponent)	0.83

Table 2. Input Parameters for Backfill Material.

ρ (Kg/m3)	E (N/MM^2)	υ	c (N/MM^2)	$\emptyset$ (°)
1900	500	0.2	0.05	20

Table 3. JWL-EOS Parameters of Trinitrotoluene.

Density (ρ) $\frac{Kg}{m3}$	Detonation Wave Speed $(\frac{m}{s})$	A (Pa)	B (Pa)	ω	R1	R2	Detonation Energy Density $(\frac{J}{Kg})$
1630	6930	3738 e^8	3747 e^6	0.35	4.15	0.9	6,060,000

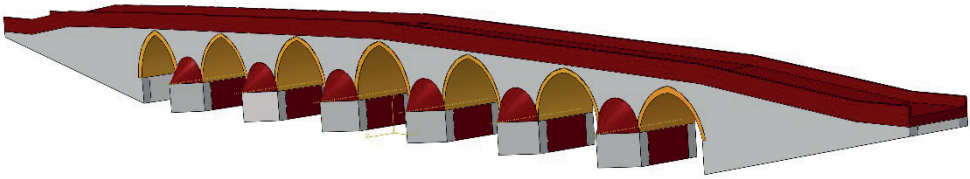
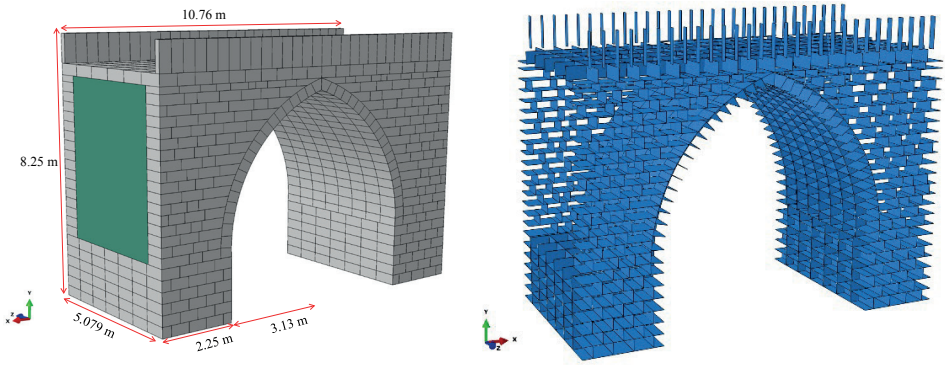


Figure 2. 3D FE Model of the bridge.



(a) *(b)*

Figure 3. Geometric (a) and mortar details of the bridge (b).

4. Methodology

The investigation employed the Abaqus/CAE finite element (FE) analysis software, incorporating coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) modeling approach. The Lagrangian elements were used to model the stone units, known for their effectiveness in representing solid materials, while Eulerian components were employed to replicate trinitrotoluene (TNT), air and infill characteristics. The Johnson-Holmquist II and Mohr-Coulomb material models was developed for the analysis of masonry unit and infill performance.

The Jones-Wilkins-Lee (JWL) equation of state (EOS) was used to simulate TNT explosive materials. In order to contain the TNT explosion wave, a 30 m × 30 m × 30 m Eulerian domain was considered and filled with air, as depicted in Figure 4. The study utilized eight-node reduced integration Eulerian elements (C3D8R) to model both TNT and air. Non-reflecting boundary constraints were imposed on the Eulerian domain to prevent the reflection of the blast wave. Material flow tracking was achieved through volume fraction, which represents the proportion of material filling the Eulerian element.

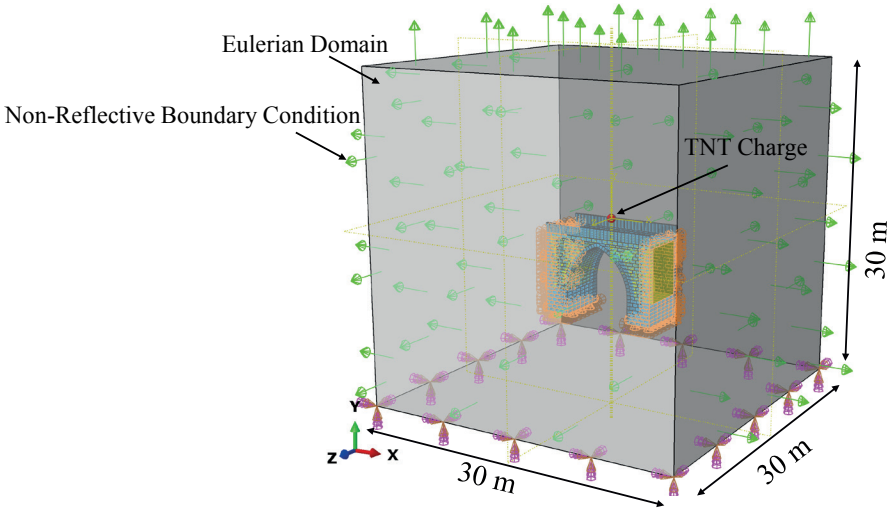


Figure 4.Eulerian Domain used for masonry bridge and TNT.

A mesh sensitivity analysis was performed to determine the optimal minimum element size. Varied seed sizes were allocated to different regions of the model to achieve a sufficiently refined mesh, with finer mesh development towards the impact point. The results indicated convergence with a 3-mm element size mesh, which also required the least computation time.

5. FE Analysis and Results

The research utilized the CEL-FE methodology in conjunction with the Abaqus/Explicit solver, which provides superior computational efficiency in terms of both time and resource allocation when compared to conventional solvers. This solver employs a second-order accurate explicit integrati-

on technique to progress the kinematic state without necessitating iterative calculations or the resolution of simultaneous equations. In this study, the effects of damping were omitted from the analysis, and the influence of soil was not taken into account because of the following reasons:

- **Simplification of the Model:**

Excluding soil effects simplifies the model and reduces computational complexity. Soil-structure interaction (SSI) involves complex behavior such as soil damping and non-linear interaction between the soil and structure, which can significantly increase the difficulty of the analysis.

- **Focus on Structural Behavior:**

The primary focus of the analysis is the response of the bridge's structural components to the blast loads. By ignoring soil effects, the analysis isolates the structural behavior, which can be particularly useful for understanding how the bridge itself will react to the blast.

- **Conservative Approach:**

Ignoring soil effects provide a more conservative estimate of the structural response. Since soil can absorb and dissipate some of the energy from blast loads, not accounting for this effect may lead to a more severe prediction of stresses and deformations, ensuring that the bridge's design is robust under extreme conditions.

- **Scope of Study:**

The specific scope of the study is not requiring a detailed consideration of soil effects

A parametric investigation was performed on the bridge, utilizing strategically positioned TNT charges to assess deformation, stress distribution, and structural damage. The simulation was conducted over a duration of 50 milliseconds to capture the reflections of the blast wave on the structure. Figure 5 illustrates the temporal progression of the blast wave resulting from a 500 kg TNT charge.

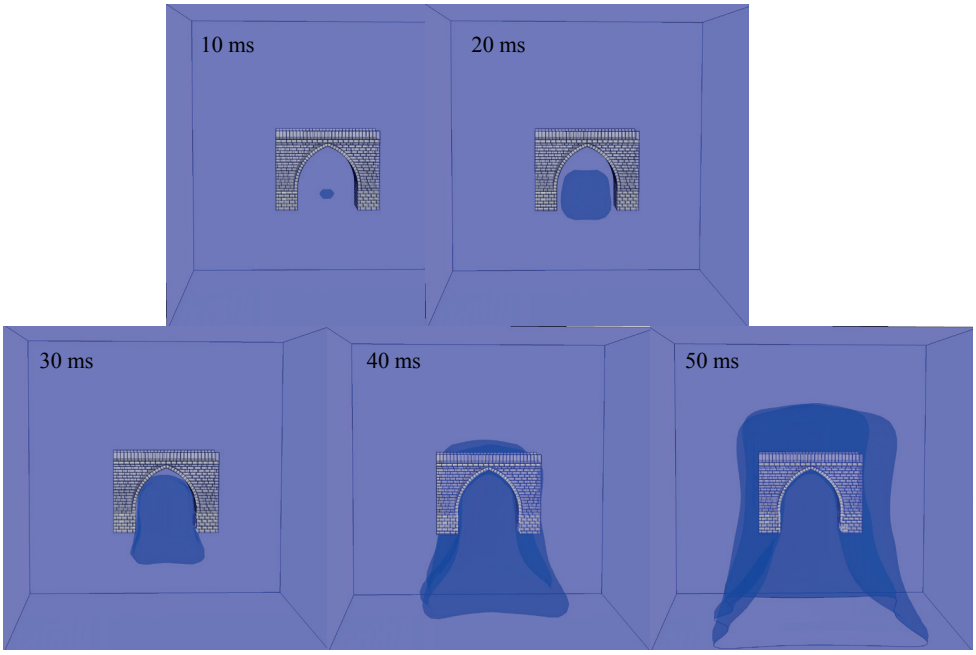
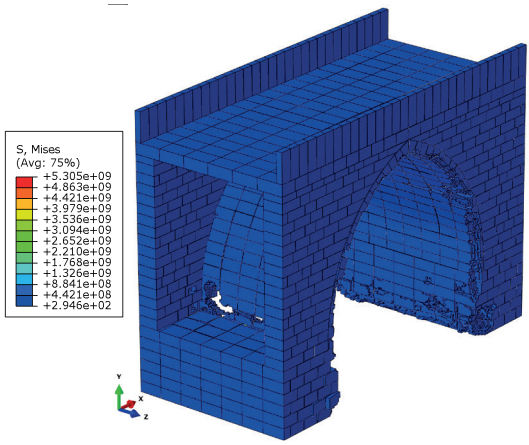
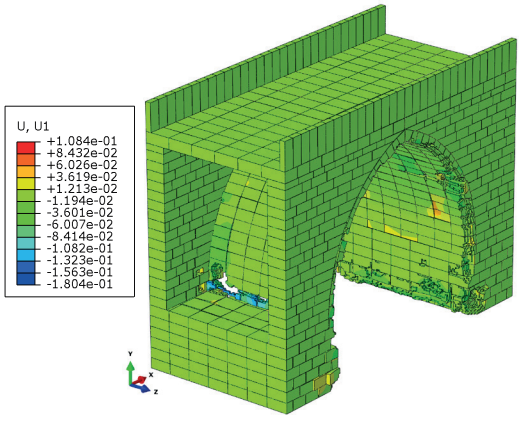


Figure 5. Blast wave propagation with time for 500 kg below the deck.

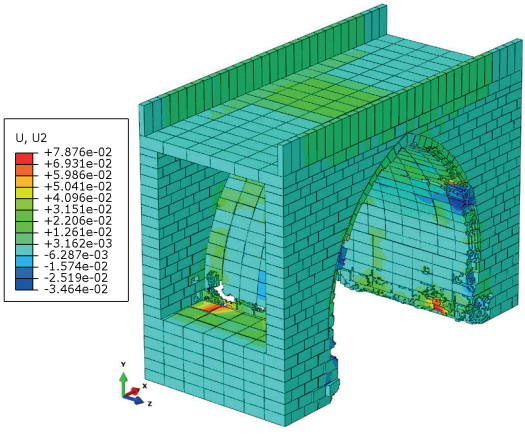
The stress analysis following the detonation of the scenario (500 kg beneath the deck) depicted in Figure 6.a, showcasing the Von-Mises stress distribution. Figure 6.b illustrated the displacement in the x-direction for the 500kg scenario. The response in the y-direction after the detonation of the 500kg TNT was presented in Figure 6.c. The z-direction response resulting from the detonation was shown in Figure 6.d. 500 kg scenario led to significant structural damage affecting the overall integrity of the bridge, as illustrated in Figure 6.e. The destruction of bridge piers and most sections of arches caused breaches in the thereby compromising its structural integrity.


S, Mises
(Avg: 75%)
+5.305e+09
+4.863e+09
+4.421e+09
+3.979e+09
+3.536e+09
+3.094e+09
+2.652e+09
+2.210e+09
+1.768e+09
+1.326e+09
+8.841e+08
+4.421e+08
+2.946e+02

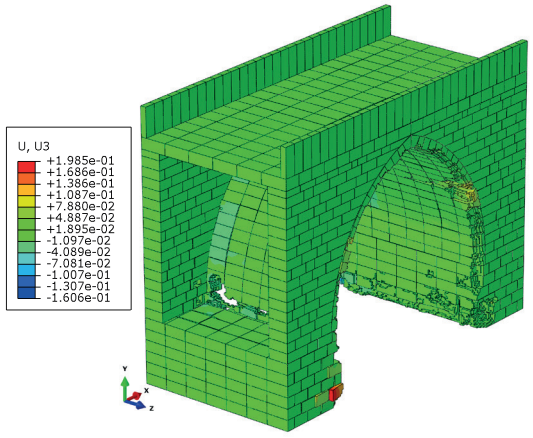
(a)


U, U1
+1.084e-01
+8.432e-02
+6.026e-02
+3.619e-02
+1.213e-02
-1.194e-02
-3.601e-02
-6.007e-02
-8.414e-02
-1.082e-01
-1.323e-01
-1.563e-01
-1.804e-01

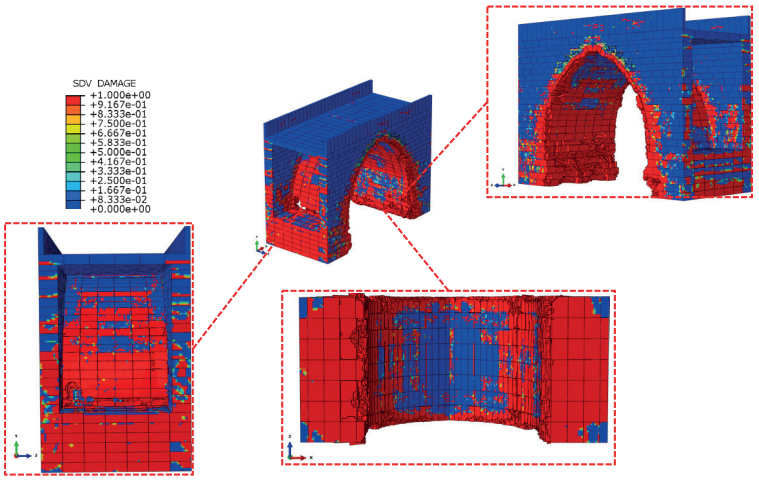
(b)


U, U2
+7.876e-02
+6.931e-02
+5.986e-02
+5.041e-02
+4.096e-02
+3.151e-02
+2.206e-02
+1.261e-02
+3.162e-03
-6.287e-03
-1.574e-02
-2.519e-02
-3.464e-02

(c)



(d)



(e)

Figure 6. (a) Von-Mises stress counter, (b) U_1 displacement counter (c) U_2 displacement counter, (d) U_3 displacement counter, (e) Damage counter.

Bridges are essential elements of infrastructure that facilitate transportation networks, and an assault on a bridge can lead to significant economic, social, and security consequences. Despite their typical strength and resilience, bridges can be susceptible to different modes of failure under blasts. Blast waves have the potential to impose considerable forces on structures, leading to potential structural collapse. The failure modes that bridges may encounter because of blast waves include the following:

• **Direct Blast Effects**: The direct force of the blast wave can cause immediate damage to the structure, including cracking, displacement, or even collapse of the arch or supporting elements.

• **Vibration and Resonance**: Blast waves can induce vibrations in the bridge structure, leading to resonance effects. If the frequency of the blast wave matches the natural frequency of the bridge, it can amplify the vibrations, potentially causing structural damage or collapse.

• **Flying Debris**: Blast waves can dislodge and propel debris, such as stones or bricks, from the bridge structure. These flying projectiles can cause secondary damage to the bridge or nearby structures.

• **Undermining**: Blast waves can also cause soil erosion or undermine the foundation of the bridge, weakening its support and stability.

The impact of an explosion above or beneath the deck of a bridge varies significantly due to differences in the way blast waves interact with the structural elements. When an explosion occurs above the deck the effects primarily target the deck and the elements directly below it, such as the spandrel walls, arches, and supports. This can result in spalling, cracking, and even the ejection of deck material. Moreover, the intense pressure from the explosion can cause sections of the deck to collapse, potentially leading to them falling onto the arches and spandrels below, which could result in additional damage. Furthermore, the spandrel walls, which provide support to the deck and transfer loads to the arches, can sustain significant damage. The force of the blast can cause these walls to crack or collapse, destabilizing the bridge structure. Furthermore, the arches and piers can be indirectly affected by the load redistribution caused by deck collapse. If large sections of the deck fall onto the arches, it can lead to localized overloading and potential failure of the arches and supporting piers. Debris from the explosion, such as shattered deck materials and other structural components, can fall onto the lower sections of the bridge, leading to further damage.

Identifying the most vulnerable component of a masonry bridge under blast loads can be complex and depends on various factors, including the bridge's design, materials, and the characteristics of the blast. Some components are more vulnerable due to their structural characteristics and exposure to the blast:

• **The deck**; can be directly affected or impacted secondarily by debris or by the dynamic forces transmitted through the structure. Damage to the deck can compromise the overall integrity and usability of the bridge due to role of load transfer mechanisms from the deck to the lower parts of a bridge, especially under high-stress conditions. Deck plays an essential role in stability of the bridge due to following reasons;

• **Structural Stability**; Load transfer mechanisms, such as beams, trusses, arches, or cables, distribute the weight of the bridge deck and any applied loads to the lower parts of the bridge, including piers, abutments, and foundations. Proper load distribution is essential to ensure that the bridge remains stable and can withstand the forces acting upon it, including dynamic loads, traffic loads, wind loads, seismic forces, and temperature variations.

• **Reduction of Stress Concentrations**; High-stress conditions, such as heavy traffic or extreme dynamic events, can induce significant forces on the bridge structure. Effective load transfer mechanisms help to distribute these forces evenly across the bridge components, reducing the risk of stress concentrations that could lead to structural failure, such as cracking, deformation, or collapse.

• **Prevention of Fatigue and Damage**; Under repetitive loading cycles, such as those experienced by bridges due to daily traffic patterns, load transfer mechanisms play a critical role in preventing fatigue failure. By evenly distributing the load and minimizing localized stresses, these mechanisms help to prolong the fatigue life of bridge components and reduce the likelihood of fatigue-related damage or deterioration.

• **Enhanced Resilience**; Bridges are designed to accommodate a wide range of loading conditions, including variations in traffic volume, vehicle types, and environmental factors. Effective load transfer mechanisms enhance the resilience of the bridge by allowing it to adapt to changing conditions without compromising its structural integrity or safety. This flexibility is particularly important under high-stress conditions.

• **Maintenance and Inspection Considerations**: Properly designed load transfer mechanisms facilitate access for inspection, maintenance, and repair activities, allowing engineers to assess the condition of bridge components and address any issues before they escalate into serious problems. Additionally, knowledge of load transfer mechanisms helps engineers identify potential areas of vulnerability or weakness and implement appropriate remedial measures to ensure the long-term reliability and safety of the bridge.

In this study, scenarios 1 and 2 had a direct impact on the bridge deck. The first scenario resulted in localized damage, causing minor damage to the deck and arch of a masonry bridge, first scenario damages listed as below;

• **Cracking**; Blast waves cause minor cracks to form in the masonry stone of the bridge deck and arch. These cracks in some section like the interlock of arch and piers are superficial and extend deeper into the deck surface and around key stone structure.

• **Spalling**; The force of the blast wave causes small pieces of masonry to break off from the surface of the bridge deck and arch. This spalling result in localized areas of damage where the protective surface layer has been compromised.

• **Displacement**; The blast wave caused displacement and shifting of the masonry blocks and stones that make up the bridge deck and arch. While this may not lead to immediate structural failure, it can indicate weakening of the bridge's integrity and may require repair or reinforcement.

• **Joint Damage**; Blast waves affect the mortar joints between masonry units, leading to crack and separation. Damage to these joints can reduce the overall stability and load-bearing capacity of the bridge structure like the interlock section of arch and piers.

• **Cosmetic Damage**; Blast waves also cause cosmetic damage to the appearance of the bridge, such as chipping or discoloration of the masonry materials. While this type of damage may not impact the structural integrity of the bridge, it can detract from its aesthetic appeal and may require cosmetic repairs for maintenance purposes.

• **The arch and spandrel walls**; are essential load-bearing components in masonry arch bridges. Due to their curved shape and extensive surface area, they are susceptible various forms of stress, such as direct impact from blast waves, dynamic loading, vibration, and resonance. The concentrated stress at the springing points, where the arch connects with the abutments, can further heighten the risk of failure. They are renowned for their inherent strength in supporting loads aligned with their central axis. Typically, arch bridges feature abutments at both ends to assist in partially transferring vertical dead weight and external loads into horizontal shear forces. These shear forces are then absorbed by the abutments or piers on either side. Apart from managing compressive forces in the axial bridge arches are also designed to withstand bending moments and shear forces. Following dynamic-static

loading, the weight of an arch bridge disperses outward along arch's curve and the supports at each end, rather than exerting a direct downward force.

When weight is applied to the top of the keystone in a bridge, it initiates a chain reaction where each stone in the arch pushes against the neighboring stone. This force is then transmitted through the structure until it reaches the securely anchored end supports or abutments. The soil around the bridge undergoes compression, which results in a reactive force pushing back against the abutments. This process follows the principle of action and reaction, where the resistance from the ground on the abutments is passed along from stone to stone until it finally reaches the keystone that supports the load.

A spandrel wall in masonry bridges is a vertical structure that occupies the space between the arch ring and the roadway or fill material positioned above the arch. These walls extend longitudinally along the bridge and bear the weight of the fill material, roadway, and any additional loads such as vehicles or pedestrians. They play a crucial role in transferring the load from the roadway to the underlying arch, spillage of the fill material, and often enhancing the visual aesthetics and architectural design of the bridge. Failure mechanisms of spandrel walls, including cracking, bulging, material degradation, overloading, hydraulic pressure, settlement, foundation issues, and impact damage like vehicular collisions, can lead to physical deterioration of the spandrel walls, resulting in immediate structural problems or long-term weakening. These external forces can induce out-of-plane behavior in the walls, leading to detachment of the wall and disruption of the interlocking with piers, thereby compromising the stability of the bridge.

As scenario occur below deck, the masonry bridge is exposed to a blast load, resulting in significant damage to the piers, arch, and spandrel walls;

- **Pier Damage;**

The blast wave, with its confined effect, exert significant pressure on the piers supporting the bridge. This pressure causes the piers to suffer severe structural damage, such as cracking, fracturing, or displacement.

- **Arch Damage;**

The arch, being a critical load-bearing element, experience extensive cracking and displacement of masonry blocks and stones. The confinement effect of the blast amplifies these effects, causing significant deformation and weakening of the arch structure. The arch partially collapses under the in-

tense pressure of the blast load and confinement effect. This result in the separation of the bridge deck from the arch structure and lead to catastrophic failure.

- **Spandrel Wall Damage;**

Similar to the piers and arch, the spandrel walls connecting the deck to the arch suffer partial collapse due to the blast load and confinement effect. This can further destabilize the bridge and exacerbate structural damage. The masonry materials of the spandrel walls disintegrate and fragment under the combined forces of the blast and confinement effect, resulting in loss of structural integrity and support.

- **Confinement Effect Amplification;**

The confinement effect of the blast amplifies the damages to the bridge structure by concentrating the blast pressure and energy within the confined space of the bridge components. This result in more severe and localized damage compared to an unconfined blast scenario.

- **Overall Structural Failure;**

The cumulative damages to the piers, arch, and spandrel walls can lead to the overall structural failure of the bridge. This can render the bridge impassable and pose significant risks to public safety.

5.1. Structural Damages and Recomandations

The deterioration of bridge structures and their components often results in observable signs such as cracks, displacement, compression, and significant distortion of particular structural elements. The theoretical determination of hinge locations that define arch failure modes enables the correlation of transverse crack formation with the longitudinal structural behavior of the bridge. This relationship can signify either an insufficiency in material strength to withstand heavy loads or the presence of foundation subsidence. The interaction between various components of a bridge, considering both longitudinal and transverse responses, can lead to structural damage that influences the overall behavior of the bridge. Fractures in transverse joints may be linked to the formation of hinge mechanisms in the arch, while longitudinal fractures along the spandrel-arch connection are likely associated with structural reactions in the transverse direction. This interaction is often influenced by the interplay of arches, spandrel walls, and infill material. Vertical loads

induce horizontal pressures in the infill due to various factors such as out-of-plane effects in spandrel walls, tensile cracking in arch stones, and sliding in longitudinal interfaces between arches and spandrels.

5.1.1. Replacement of Infill Material

Substitution of infill material could serve as a feasible option in cases where the material exhibits compromised mechanical characteristics, such as the depletion of fine particles due to water infiltration within the bridge. This phenomenon leads to a reduction in the shear strength of the infill material, consequently causing an elevation in the lateral pressure exerted on spandrel walls. This strategy may prove highly efficacious in stabilizing spandrel wall movements in historic bridges without compromising the aesthetic appeal of the structure. This approach, which aligns with the original structural principle, is commonly employed in conjunction with methods such as reinforcing straps or concrete slabs to strengthen the arch [13].

5.1.2. Grout Injection

The process of grout injection using fluid grout entails the filling of empty spaces, voids, and cracks within the infill and masonry of arches and spandrels. This procedure aims to enhance material continuity and load transfer mechanisms among structural elements, thereby improving the overall structural behavior of bridges in both longitudinal and transverse orientations. Prior to implementing this method, it is essential to clean and re-point masonry joints. The grout is then injected into voids, cavities, and fractures in a bottom-up manner, commencing at the lowest levels where feasible. This is achieved by applying low regulated pressure or utilizing gravity to introduce the grout into pre-drilled holes within bridge components. These openings serve the dual purpose of facilitating the injection of grout and accommodating drain pipes, thereby enabling oversight of the construction process and guaranteeing comprehensive gap filling [14]. To prevent harm to the masonry, it is imperative that the openings are meticulously drilled using suitable tools and sealed upon completion of the task. When selecting the type of grout for application, it is essential to take into account its compatibility with the materials already in place. The grout material should ideally be a lime-based mortar that possesses sufficient fluidity to permeate the structure effectively. Cementitious mortars are not recommended due

to their incompatibility with stone-like materials and their inability, unlike lime-based mortars, to facilitate the evaporation of water from the structure.

5.1.3. Pavement Repair

These methods include: (i) refurbishing the existing bridge pavement by salvaging the masonry stones in good condition and supplementing with new similar slabs as required; (ii) overlaying the original pavement with an additional layer, typically composed of bituminous material, while ensuring the preservation of the drainage system, which may be compromised by the increased height of the pavement; and (iii) substituting the original pavement with a new surface, constructed from either bituminous material or stone units Figure 7.



Figure 7. Pavement repair: Replacement of masonry stones

Regardless of the methodology employed, it is essential to conduct a thorough examination and verification of deck drainage and waterproofing systems, preferably situated beneath the deck, to prevent water infiltration into the building [15].

5.1.4. Strengthening of the Load Degradation System on the Deck

In situations necessitating improvement of the deteriorating load-bearing capacity of a bridge deck, one effective method involves the installation of a reinforced concrete slab above the infill. This strategy offers the advantage of necessitating minimal excavation, thereby preserving the aesthetic integrity of the bridge, Figure 8.



Figure 8. Surface regularization for the application of a concrete slab on the pavement [15].

It is crucial to emphasize the importance of implementing an effective drainage system and ensuring proper impermeable isolation of the masonry elements. This is essential to prevent water infiltration from concrete areas into the masonry substructures and the ingress of corrosive salts into these components.

5.1.5. Reinforcement with Rebars, Bars and Laminates on Arch Surface

The incorporation of steel rebars or composite materials within longitudinal grooves on the arch's intrados or extrados, along with the placement of steel bars, laminates, or composite material sheets on the arch surface, offers the possibility of removing concrete. This approach enhances the structural load-bearing capacity without altering the geometry or mass of the structure. This method serves as a globally applicable solution for strengthening arches, improving operational performance in both longitudinal and transverse orientations Figure 9.

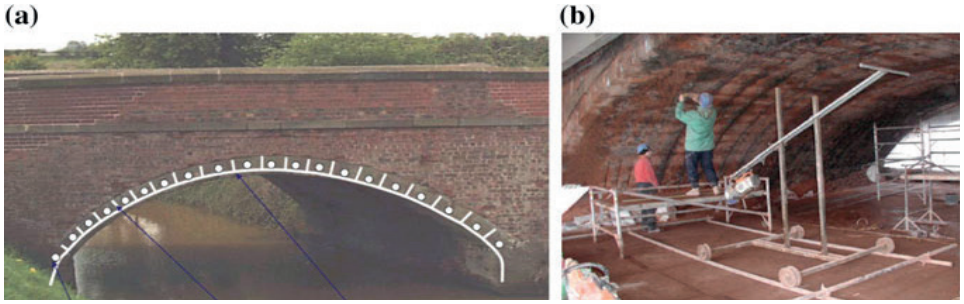


Figure 9.Strengthening solution for bridges: a Elevation scheme and b View of the longitudinal strengthening at the arch intrados [16].

5.1.6. Radial and Secant Anchors

Anchors are a commonly utilized method for enhancing the structural integrity of historical masonry constructions. They typically involve a steel bar placed within a pre-drilled hole in the brickwork and secured with grout. To reinforce an arch longitudinally, radial anchors are often employed, connecting it to the spandrel walls from the intrados. Figure 10 illustrates the process of radial drilling across the arch intrados for the installation of bonded anchors composed of stainless steel bars encased in cement grout.

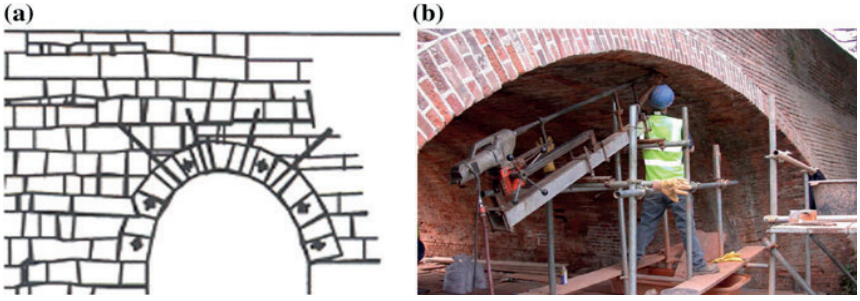


Figure 10. Radial and transverse anchors: a Donim bridge strengthening scheme [17], b Drilling phase for anchor installation [18].

5.1.7. Transverse Ties

Transverse ties embedded within stone masonry serve the dual purpose of either reinstating the arch's initial form through active reinforcement or

averting and/or controlling potential transverse deformations that could arise from heightened out-of-plane deflections in the future. This is achieved by counteracting increased horizontal forces exerted by the spandrel walls and the ensuing internal forces. Steel ties, fashioned from standard reinforcing bars, can be threaded at their extremities or along their entire length. These ties are then inserted into pre-drilled holes within the masonry structure and may be filled with low shrinkage mortar, resulting in either bonded or unbonded connections. This solution has the advantage of having little effect on traffic and does not involve excavation of infill material, resulting in a low cost solution. Concerning solution drawbacks, difficult drilling operation can be an issue and corrosion of ties and/or anchor plates may rise and become visible, thus requiring appropriate measures, Figure 11.

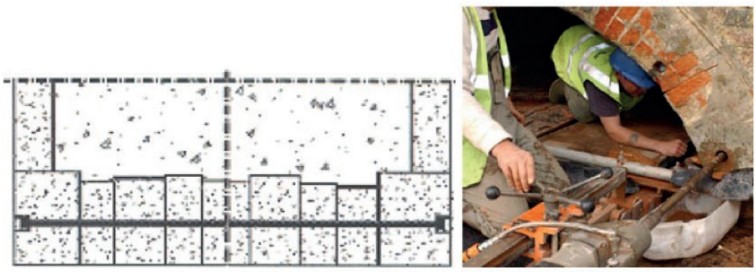


Figure 11. Transverse ties in the arch [18].

6. Conclusion

In conclusion, the assessment of blast resistance in masonry bridges is critical for ensuring the structural integrity and safety of these vital infrastructures under extreme conditions. The study highlights the complex interplay between various factors affecting the performance of masonry bridges during blast events, including material properties, structural design, and boundary conditions. Through numerical simulations and empirical evaluations, it has been demonstrated that masonry bridges exhibit unique vulnerabilities to blast loads due to their inherent characteristics, such as low tensile strength and potential for cracking. The findings underscore the importance of incorporating advanced analytical techniques and comprehensive models to evaluate blast resistance accurately. While simplified models can provide initial insights, detailed analyses that account for the dynamic interactions between the bridge structure and applied blast loads are essential for understanding the full extent of potential damage. Furthermore, integrating soil-structure interaction in simulations can enhance the accuracy of predictions and of-

fer a more realistic assessment of the bridge's response. The results of this study have significant implications for the design and retrofitting of masonry bridges. Enhanced design protocols and construction practices should be developed to improve blast resistance, including the use of reinforced materials, improved joint design, and advanced protective measures. Additionally, ongoing research and innovation in materials science and structural engineering are necessary to address emerging challenges and enhance the resilience of masonry bridges against future threats. Ultimately, ensuring the blast resistance of masonry bridges is not only a matter of structural safety but also of public security and infrastructure resilience. By adopting a multi-faceted approach that includes rigorous analysis, innovative design, and proactive maintenance, it is possible to safeguard these critical assets against the risks posed by explosive events and ensure their continued functionality and safety in the face of evolving threats.

7. References

1. Arch Bridges. In: Melbourne C, editor. Proceedings of the 1st international conference on arch bridges. 3–6 September 1995, Bolton, Thomas Telford, ISBN: 0727720481.

2. Arch Bridges: History, analysis, assessment, maintenance and repair. In: Sinopoli A, editor. Proceedings of the 2nd international arch bridge conference. 6–9 October 1998, Venice: A.A. Balkema, ISBN: 9058090126.

3. Arch'01. In: Abdunur C, editor, Proceedings of the 3th international conference on arch bridges. 19–21 September 2001, Paris, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées,

ISBN: 2859783471.

4. Arch Bridges IV: advances in assessment, structural design and construction. In: Roca P, Molins C, editors. Proceedings of the 5th international conference on arch bridges. 12–14 September 2004, Barcelona: Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), ISBN:

8495999633.

5. Arch'07. In: Lourenço PB, Oliveira D, Portela V, editors. Proceedings of the 5th international conference on arch bridges. 12–14 September 2007, Funchal, ISBN: 9728692315.

6. Arch'10. In: Chen, editors. Proceedings of the 6th international conference on arch bridges, 11–13 October 2010, Fuzhou, ISBN: 8371252655.

7. Arch'13. In: Radic J, Kuster M, Savor Z, editors. Proceedings of the 7th international conference on arch bridges, 2–4 October 2013, Trogir–Split, SECON-CSSE, ISBN: 9537621162.

8. Arch 2016: Arch bridges in culture. In: Biliszczuk J, Bien J, Hawryszkow P, Kaminski T, editors. Proceedings of the 8th international conference on arch bridges, 5–7 October 2016, Wroclow, EDITUS, ISBN: 8371252655.

9. Sustainable Bridges: sustainable bridges–assessment for future traffic demands and longer

lives. Integrated project in the sixth framework programme on research, technological development and demonstration of the European Union, FP6-PLT-001653. 2007. http://www.sustainablebridges.net.

10. UIC: International union of railways: improving assessment, optimization of maintenance and development of database for masonry arch bridges. 2005. http://orisoft.pmmf.hu/masonry.

11. McKibbins L, Melbourne C, Sawar N, Gaillard C. Masonry arch bridges: condition appraisal and remedial treatment. London: CIRIA; 2006.

12. ICOMOS/ISCARSAH: Recommendations for the analysis, conservation and structural

restoration of architectural heritage. 2005. http://www.icomos.org.

13. UIC: Assessment, reliability and maintenance of masonry arch bridges. In: Orban Z, editors. UIC masonry arch bridges study group, state-of-the-art research report. Paris: International Union of Railways, 2004.

14. Ashurst D. An asssessment of repair and strengthening tecniques for brick and stone masonry arch bridges. Report 284. TRL-Transport Research Laboratory, 1992.

15. Page J. A guide to repair and strengthening of masonry arch highway bridges. Report 204. TRL–Transport Research Laboratory, 1996.

16. Gilbert M. The behaviour of masonry arch bridges containing defects, PhD-Thesis, University of Manchester, 1993.

17. DGEMN: Ponte da Lagoncinha. Boletim n.º 87. Boletim da Direcção Geral dos Edifíciose Monumentos Nacionais, MOP, 1957.

18. DGEMN: Ponte sobre o rio Lima. Sistema de Informação para o Património Arquitectónico– IPA.00000424. 1995. http://www.monumentos.pt.

SEISMIC RETROFITTING DEFICIENT HISTORICAL VOCATIONAL EDUCATIONAL COMPLEX

Orhan YAPICI[1,4], Sahin GUNES[2*], Idris BEDIRHANOGLU[3]

[1]Institute for Infrastructure & Environment, Heriot-Watt University, Edinburgh, EH14 4AS, United Kingdom
[2]Department of Civil Engineering, University of Birmingham, Birmingham, B15 2TT, United Kingdom
[3]University of Oxford, Engineering Science Department, idris.bedirhanoglu@eng.ox.ac.uk
[4]Marmara University, Department of Civil Engineering, Istanbul, Turkiye
*Corresponded author, Dr Sahin Gunes, Department of Civil Engineering, University of Birmingham, Birmingham, B15 2TT, United Kingdom
email: s.gunes@bham.ac.uk

Abstract

On 06 February 2024, a devastating Mw7.8 and Mw7.6 earthquakes struck the east of Turkey. Those earthquakes tragically arose the urgent action for retrofitting of all different types of structures including historical structures. This work presents a strategy of seismic retrofitting of an ongoing educational complex project located in a highly seismically active area. The structural system is hybrid of masonry wall and reinforced concrete frames. Both masonry and reinforced concrete elements were retrofitted with different material and techniques. The concrete of the columns and beams is quite old and can be considered very first usage of concrete technology in Turkey. Mainly to retrofit the main building a detachable steel structural system was designed. To increase the effectiveness of the method all reinforced concrete members repaired and wrapped by carbon fiber reinforced polymer (CFRP).

1. Introduction

Human activity and environmental factors have reduced the structural strength and longevity of the existing buildings, which are primarily made of steel, wood, masonry, and reinforced concrete. In order to address these performance losses, options like strengthening or demolition/reconstruction must be considered. However, due to their historical significance and designation as architectural landmarks, historical buildings need a different evaluation procedure. Additionally, historically significant buildings serve as living examples of the built environment of their era and reflect the craftsmanship, construction technologies, and materials of their period.

Restoring a historic masonry building involves returning it to its original condition and addressing any deterioration in materials [1, 2]. This restoration process may utilize modern materials and techniques to enhance the longevity of the structure. Tailored methods are employed for each building, considering factors such as desired seismic resilience and functionality. Strengthening techniques can be applied to ensure adequate seismic performance during earthquakes. These methods encompass increasing wall thickness with matching masonry bricks, adding concrete layers to internal and external surfaces, applying textile-reinforced mortar on both sides, and retrofitting walls and structures with steel plates both internally and externally. These techniques may be applied individually or in combination [3].

Research on the use of various techniques to strengthen load-bearing walls in order to improve the seismic resilience of masonry structures has been done both numerically and experimentally in the literature [4-11]. Researchers have created a novel composite material called textile-reinforced mortar (TRM), which combines advanced fibres in the form of textiles (with an open-mesh configuration) with inorganic matrices like cement-based or hydraulic lime mortars, in an effort to address the issues associated with the use of epoxies. For the seismic strengthening of masonry members, TRM has been shown in the literature over the past ten years to be a very promising substitute for the FRP strengthening solution [11].

In Anatolia, Turkey, there are numerous masonry buildings, a considerable portion of which originated in the early years of the Turkish Republic and continue to be in use. Given the seismic hazard in this region due to its proximity to active fault lines, it is essential to retrofit historic buildings for

earthquake resistance. This study introduces an innovative seismic retrofitting approach, using a vocational education complex in Usak, Turkey as a case study. The structural system comprises a combination of masonry and reinforced concrete elements. Both masonry and concrete components underwent retrofitting using various materials and methods. The concrete columns and beams, being among the earliest uses of concrete in Turkey, were refurbished. A steel structural system was primarily designed to retrofit the main building. To enhance the effectiveness of this approach, all concrete elements were repaired and enveloped with carbon fiber reinforced polymer (CFRP). The framework of the strengthening method is reported comprehensively to underpin the future applications of the proposed method and to contribute to existing literature.

2. Architectural overview of the building

2.1. General information for the building

The structures are built in the form of a vocational high school and designed a rectangular flat shape with different blocks. The blocks are separated by expansion joints as depicted in Fig. 1. Red lines indicate the location of the expansion joints. There is a total of 9 blocks named A, B, C, D, E, F, G1, G2 and G3. The building is constructed as a clay brick masonry structural system. Clay bricks with lime mortar are used as material in the walls. The north-south oriented structure consists of a rectangular main body and six connected blocks, totalling three floors including the basement. The roof has eaves with a width of 80-90 cm and is covered with tiles. The building occupies a 3600 m2 area. There is one main entrance and one secondary entrance on the east facade. The secondary entrance is accessible from ground level via a metal-framed door, while the main entrance is accessed via a six-step, mosaic-covered staircase, leading to a metal-framed door. The entrance door, an extension from the main body, and the full-length window above it, are accentuated by moldings. Upon entry, there is a large foyer and a three-armed staircase leading to the upper floor. The secondary entrance opens to a large foyer with a balanced, mosaic-covered staircase. The ground floor houses a Type I corridor and classrooms east of the corridor, with five blocks to the west and one to the east. Access to these blocks is through the corridor of the main building. Fig. 2 shows the typical floor plan and depicts the details of the building. Moreover, stair treads and floors are mosaic-covered while toilets are ceramic-clad. The walls feature plaster-paint, wood, and

ceramic cladding, but also exhibit dampness, stains, flaking, and collapses. The ceiling is coated with plaster-paint and shows signs of staining and flaking. The doors are wooden-framed and retain their originality, although some have been painted over time or replaced. In many instances, the door wings have disappeared and the cases are damaged. The wooden-framed windows also maintain their originality, but some have been painted over time or replaced with PVC framed windows. Just like the doors, window wings have disappeared in many places and the cases are damaged.

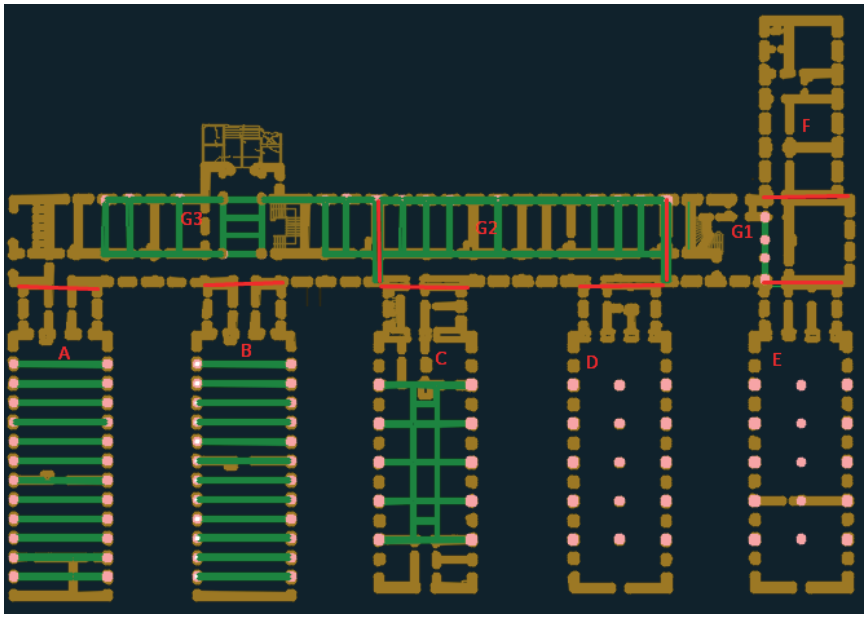
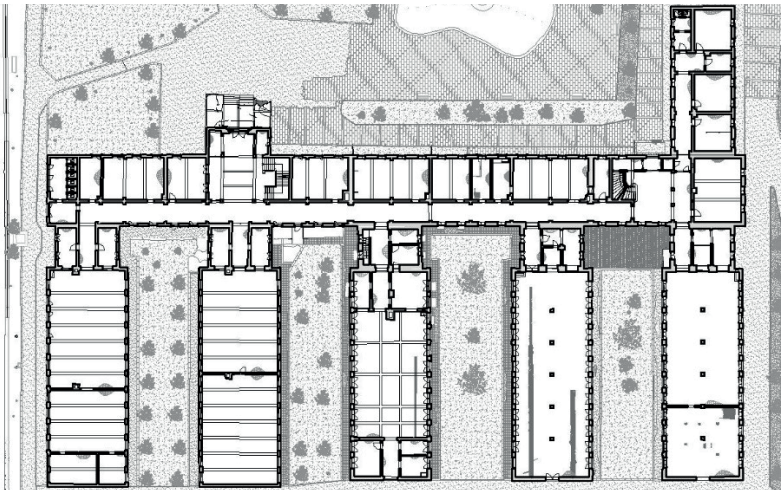


Fig. 1: General arrangement plan of the building.



(a) The east side of the Vocational High School building



(b) Vocational High School ground floor plan



(c) The main entrance facade



(d) The main entrance door



(e) The foyer at the main entrance



(f) 3-arm mosaic-covered RC staircase



(g) Balanced mosaic covered RC staircase



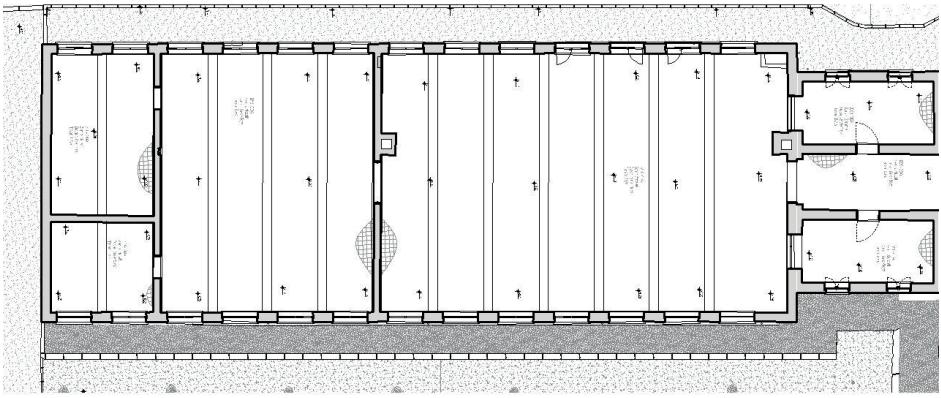
(h) The ground floor corridor

Fig. 2: The architectural details of the Vocational High School.

2.2. Site investigations for blocks A and B

The observations during the site visit of the building are reported herein with details and photos. The obtained information for each block is presented starting from block A and block B respectively. The block A situated to the north of the main building spans 455 square meters. Both the walls and ceiling have been painted, though occasional peeling and dirt can be observed in these regions. Ceramic flooring is present in two areas, while mosaic tiling is found elsewhere. Eight wooden doors are installed, though they show signs of damage with six missing their panels. Additionally, there are a total of 30 windows, four of which are wooden-framed, while the remaining 26 are metal-framed. The metal-framed windows have missing panels and show damage to their frames. The floor stands at a height of 4.05 meters, with beams spaced at 2-meter intervals on the ceiling. Reinforced concrete eaves and a pitched roof serve as the top covering, with tiles as the roofing material. Wooden elements comprise the roof construction, exhibiting damage in various areas.

The block B, with similar attributes to block A, spans 454 square meters. Paint has been applied to the walls and ceiling, occasionally showing signs of peeling and dirt accumulation. Ceramic tiling adorns one area of the floor, while mosaic patterns embellish other sections. Four wooden doors are installed, albeit in a state of disrepair, with three missing door panels. The block boasts 32 windows, six of which feature wooden frames and 26 are fitted with metal frames.



(a) The floor plan of block A



(b) Typical room view in the ground floor plan of block A
(Room Z-12)



(c) The metal window detail



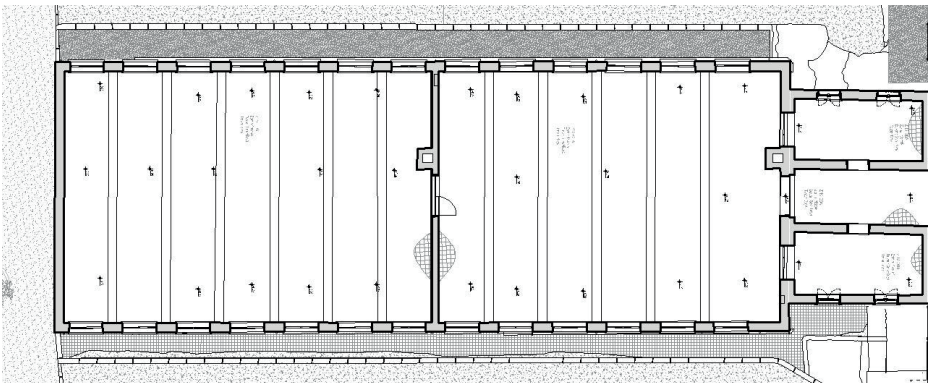
(d) Typical room view in the ground floor plan of block A
(Room Z-11)



(e) North side view of block A

Fig. 3: The architectural details of block A.

Among the wooden-framed windows, two are situated indoors while four face outward. The metal-framed windows suffer from missing panels and frame damage. The floor stands at a height of 4.05 meters, supported by ceiling beams spaced every 2 meters. The top covering comprises reinforced concrete eaves and a pitched roof, covered with tiles. Wooden elements form the roof's structural framework, exhibiting damage in certain areas. The Fig. 4 presents the typical floor plan and photos taken during the site investigation of block B.



(a) The floor plan of block B





(b) Typical room views in the ground floor plan of block B (Room Z-18)



(c) Typical room view in the ground floor plan of block B (Room Z-17)



(d) West side view of blocks A and B

Fig. 4: The architectural details of block B.

To guarantee a more thorough distribution of information, it has been deemed appropriate to include observations regarding the building's facade and roof in addition to the previously supplied detailed information for each block of the structure. On the attic floor, there is a newly installed roof structure situated to the north of the main block, with inverted beams on the southern side, and weathered roof elements. Fresh roof components are evident in Blocks A and B, whereas Block C exhibits deteriorated elements alongside a skylight; Blocks D, E, and F feature aged roof structures. There are sporadic damages observed on the roof covering. Within the roof constructions, evidence of bending and discoloration over time due to neglect and moisture has been noted. The roof-related observations are delineated in Fig. 5. Furthermore, the building is oriented in a north-south direction. This architectural ensemble, comprising a rectangular main body and six annexed blocks, including the basement, encompasses three floors. The eaves width atop the roof ranges from 80 to 90 cm, with roof tiles serving as the primary covering material. The building features a main entrance and a secondary entrance on its east facade. The main structure stands at a height of 11.5 m, with dimensions of 105 m in length and 10.5 m in width. The blocks are single-story and exhibit varying facade heights: Blocks A and B measure 6.20 m; Blocks C and D stand at 7.50 m; Block E is 7.30 m tall; Block F is 5.15 m in height. Rectangular windows, adorned with stone sills, embellish the main block facade, while arched traces are discernible on the windows of the east and south facades. The walls are rendered and painted, displaying occasional fractures and peeling. In Blocks B and C, the window frames are original

wood, whereas in other blocks, they have been replaced with PVC and metal. The original window frames have been painted and have succumbed to corrosion over time. Numerous panels are absent from the PVC and metal windows, with damages incurred to their frames. Elaborate details of the facade analysis are illustrated in Fig. 6.



(a) Original roof structure



(b) Original roof structure



(c) Original roof structure



(d) Original roof structure



(e) Renewed roof structure

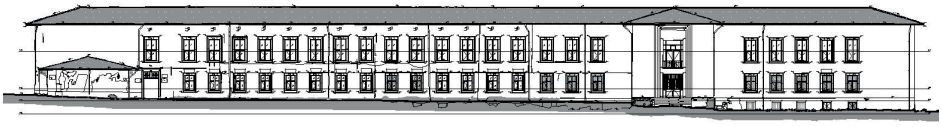


(f) Renewed roof structure

Fig. 5: The architectural details of the roof structure.



(a) Vocational high school south view



(b) Vocational high school east view



(c) South view



(d) East view



(e) Blocks D and E, west view



(f) Block D south view

Fig. 6: The architectural details of the facade.

3. Determining the material and strength condition of the structure

3.1. Site investigations for material characteristics and reinforcement arrangement

The specifics of each block's structural system have been ascertained through site surveys. To determine details of the reinforcement, core samples from the columns have been collected, and some columns and beams have been revealed. Additionally, reinforcement detection devices have been used in certain cases to determine the number of reinforcements in particular columns. The amount of reinforcement and the thickness of the floor slab have been measured by breaking the flooring. Site investigation for block A was presented in this work.

The on-site work conducted regarding block A has been summarized, and the floor plan of Block A is provided in Fig. 7. Columns where core samples were taken are indicated in red, while columns where readings were obtained are marked in blue. In this block, a total of 3 concrete core samples were taken. It was observed that the average concrete strength was 7.57 MPa. There was no rusting in the reinforcements, but the presence of a gravelly structure on the surface indicated poor concrete strength. Laboratory results are given in Table 1. The samples taken are named S13, S14, S15 and the laboratory results of each sample are given as S13 (8.76), S14 (5.01), and S15 (8.94), respectively. Photos of the core drilling studies are presented in Fig. 7. Another important step is to reveal the reinforcement in the reinforced columns. Given that all of the columns in this block had the same dimensions, a representative column was exposed on the assumption that all of the columns would be similar. The column has been opened on one side and it was observed that he column with a dimension of 35x35 cm has 8 reinforcements which were spaced at intervals of 22 cm, and no corrosion was encountered (Fig. 8). Moreover, the reinforcement arrangement in the columns has been detected with non-destructive device and the examples of the application are provided in Fig. 8. Due to the presence of the window, readings were taken from only one side. The information obtained regarding the reinforcement is given in Table 1. It is found that there are eight longitudinal reinforcements total, spaced 22 cm apart by stirrups.

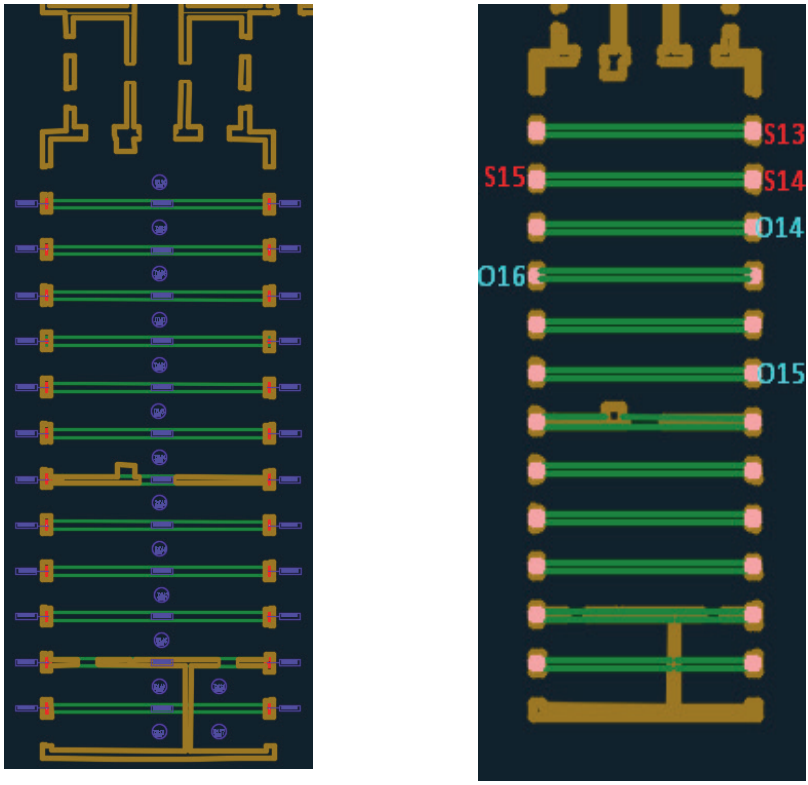


Fig. 7: General arrangement plan of block A.

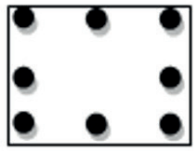
Fig. 8: Reinforcement detection and core drill of the column (S14) by breaking the cover in block A.

Table 1: Reinforcement arrangement detected by non-destructive device.

Kolon ismi	Boyuna donatı sayısı (adet)	Etriye aralığı (cm)
O14	8	22
O15	8	22
O16	8	22

The reinforcement scan was applied to three columns in block A. It was observed that the reinforcement details were the same in each column. The reinforcement details of the column obtained by breaking the cover of concrete matched the results obtained by the non-destructive reinforcement detection device. Likewise, the reinforcements in beams have been detected by destructive tests and application photos are given in Fig. 8.





	A Blok	
1	8,767	MPa
2	5,01	MPa
3	8,94	MPa
Average	7,57	MPa
Std Dev	2,22	MPa
Av-Std	5,35	MPa
Min	5,01	MPa
Ec	10,59	GPa

In summary, block A comprises a total of 12 beams and 24 columns. The walls in Block A are 50 cm thick, made of a mixture of bricks. Typically, a plaster layer of 2-3 cm thickness has been noted on the walls. Alongside the identified structural conditions, there are also some aspects that remain undetermined. It is assumed that not all beams in Block A have been identified. The floor was not disrupted to gather information on reinforcement and thickness. Observations from other blocks indicate the usage of inverted beams in these structures as well. However, no observations were made regarding the presence of inverted beams in the attic of Block A, and even if they exist, they went unnoticed. The beams discovered below the floor are situated only along the short axis of the structure, whereas conventionally beams are present in both axes of the structure. Furthermore, no observations were made concerning the foundations of the building. It has been emphasized for construction site operations that reinforced concrete columns should be connected to foundation beams to enhance seismic resistance.

4. Strengthening method and framework

In the strengthening of the structure, before using the modern techniques, all the concrete coverings of the columns, beams, and slabs which have lost their function have been broken. Repair mortar has been used to repair the broken concrete aiming to restore the concrete to its original load-bearing capacity. After hardening and gaining strength to the repaired concrete, the columns, beams, and slabs were able to gain their original carrying capacities. Details for the retrofitting of the concrete coverings with repairment mortar are presented in Fig. 9.



Fig. 9: Application of repairment mortar to structural RC members.

After the repair of the covering concrete with repair mortar, the structural members of the building were strengthened using FRP (Fiber Reinforced Polymer). FRP strengthening is a modern and effective method which is used to enhance the durability and performance of structures. This method provides an effective solution for the repair of structures which are damaged or requiring extra reinforcement, especially in cases such as earthquakes or excessive loading. The process of strengthening columns, beams, and slabs with FRP is depicted in Fig. 10. It ensured that the surface to be strengthened is dry and sound by thoroughly cleaning the loose particles, dust, and dirt to make it suitable for application. Subsequently, a special primer was applied to the surface to prevent moisture absorption and enhance adhesion for better material bonding. The reinforcement material consists of carbon fibers with reinforcement matrix and a resin system which acts as a binding material. These materials were mixed in correct proportions before application to obtain the reinforcement material. During application, the prepared mixture was applied to the surface using a brush or spatula. Fiber materials were placed on the surface by saturating them with resin, and this process was repeated until the required number of layers was achieved. A specific waiting period was allowed for the applied material to dry, ensuring protection from weather conditions during this process. These processes, which

require expertise and meticulousness, combined with the correct material selection and application techniques, have contributed significantly to the strengthening of the load-bearing elements of the structure. Therefore, once the drying process was completed, a couple of final checks were conducted to ensure the correct application.



Fig. 10: Application of FRP strengthening to structural RC members.

Considering the seismicity of the region, although it is possible for the FRP-reinforced structural elements to increase the carrying capacity, a frame system which was specially designed has been used to prevent lateral displacements due to earthquakes. It has been revealed through field observations that the existing reinforced concrete structure is not at a sufficient level to withstand the lateral shear forces that may affect the structure during an earthquake. The absence of beams in some floors restricts the behavior of the reinforced concrete frame consisting of columns and beams which are expected to work against horizontal shear forces that may occur during an earthquake. Although columns, beams, and floors are reinforced with FRP, due to the risk of structural behavior not being able to withstand lateral shear forces belonging to the structure in the event of an earthquake, specially designed steel frames have been mounted on reinforced concrete columns

and beams with specially designed connection details. With this proposed and implemented strengthening method, steel frame systems have been ensured to work together with reinforced concrete columns under earthquake loads. Thus, the lateral shear force carrying capacity of the structure has been increased by steel frame systems, and the safety of the structure under earthquake loads has been strengthened.

Firstly, considering the seismicity of the region where the structure is located, the analysis and design of steel frame systems have been carried out. The system was modelled in three dimensions, and spectral earthquake load calculations and modal analysis were conducted to solve it. In the analysis of steel structure, members were individually examined for each load combination, and analyses were performed based on the most unfavourable load combinations. The schematic views of the numerical calculation model are presented in Fig. 11. S235 and S275 steels were used in the profiles and plates. Turkish Structural Steel Specification [11] was taken into account in the design of the structure system. The internal forces obtained from the analysis of the structure system under vertical loads, horizontal earthquake, and wind forces were combined according to Turkish Structural Steel Specification [11].

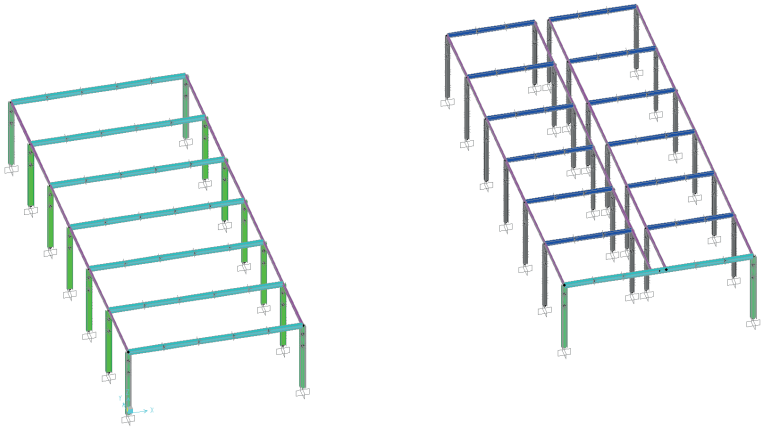
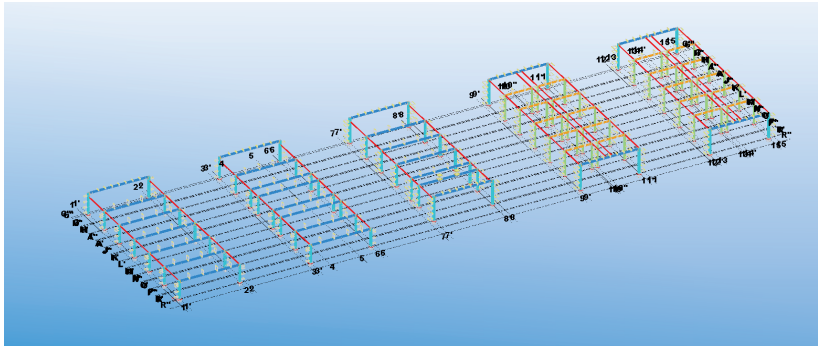
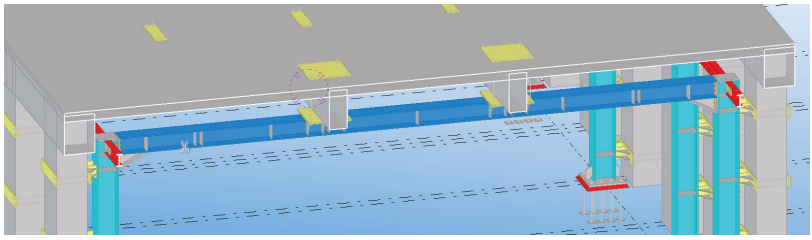
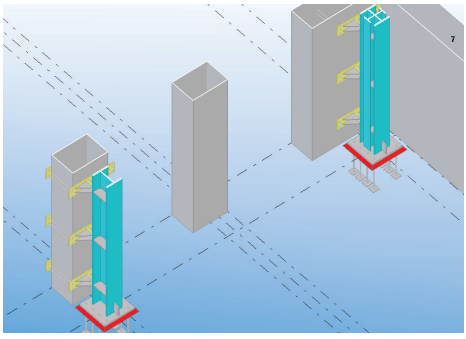
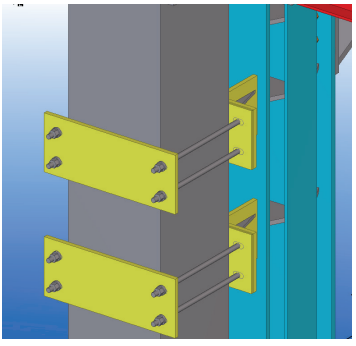


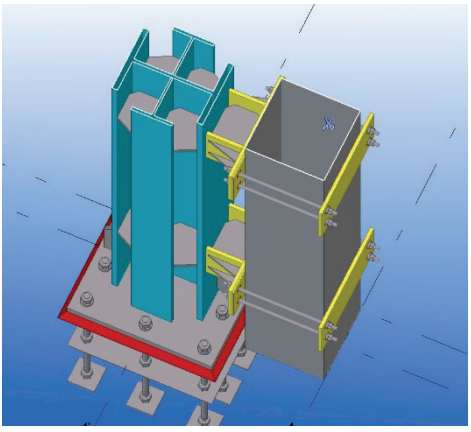
Fig. 11: Numerical model for the structural steel system.











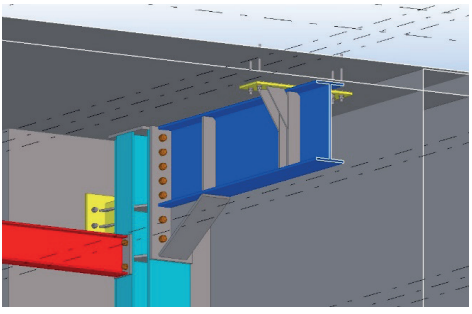


Fig. 12: Application of Steel strengthening to structural RC frames.



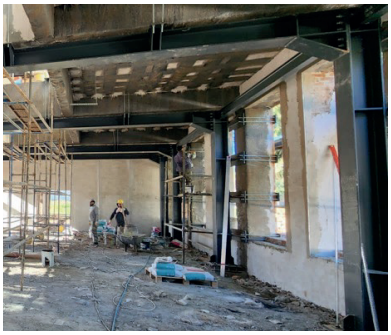












Fig. 13: Application of Steel strengthening to structural RC frames.

5. Conclusion

In this study a case study retrofitting approach of an historical vocational school presented. The school premises contains many blocks with different structural systems of different construction material and structural systems which are provided in this study. Repair and retrofitting approaches developed for those buildings are explained. Basic approach is to recover the concrete produced with old technology. On the other hand, since those are old buildings, they do not compile with modern seismic regulation. High span distance causes a very flexure system where this urges a new additional structural system. In this work, a new structural system designed made of steel beams, columns and bolt connector systems. It has been concluded that the proposed method is easy to apply and it can provide effective solution for repairing and retrofitting of old buildings.

6. References

[1] B. Yildizlar, B. Sayin, C. Akcay, A case study on the restoration of a historical masonry building based on field studies and laboratory analyses, Int. J. Archit. Herit. 14 (9) (2020) 1341–1359.

[2] Y. Li, X. Li, Q. Jiang, Q. Zhou, Historical study and conservation strategies of "Tianzihao" colony (Nanjing, China)–architectural heritage of the french catholic missions in the late 19th century, Buildings 11 (2021) 176.

[3] B. Gunes, T. Cosgun, B. Sayin, O. Ceylan, Structural rehabilitation of a middle byzantine ruin and the masonry building constructed above the ruin. Part II: the building, Eng. Fail. Anal. 105 (2019) 527–544.

[4] S. Hamoush, M. McGinley, P. Mlakar, D. Scott, K. Murray, Out-of-plane strengthening of masonry walls with reinforced composites, J. Compos. Constr. 5 (3) (2001) 139–145.

[5] G. Milani, 3D FE limit analysis model for multi-layer masonry structures reinforced with FRP strips, Int. J. Mech. Sci. 52 (2010) 784–803.

[6] M.H. Saghafi, S. Safakhah, A. Kheyroddin, M. Mohammadi, In-plane shear behavior of FRP strengthened masonry walls, APCBEE Proc. 9 (2014) 264–268.

[7] M.A. El Gawady, P. Lestuzzi, M. Badoux, Rehabilitation of unreinforced brick masonry walls using composites, Presented at: Architectural and Structural Design of Masonry with Focus on Retrofitting of Masonry Structures and Earthquake Resistant Design, International Short Course, Dresden University of Technology, 2003.

[8] C. Mazzotti, B. Ferracuti, A. Bellini, Experimental bond tests on masonry panels strengthened by FRP, Compos. Part B 80 (2015) 223–237.

[9] Y. Su, C. Wu, M.C. Griffth, Modelling of the bond–slip behavior in FRP reinforced masonry, Constr. Build. Mater. 25 (1) (2011) 328–334.

[10] Z.C. Tetta, L.N. Koutas, D.A. Bournas, Textile-reinforced mortar (TRM) versus fiber-reinforced polymers (FRP) in shear strengthening of concrete beams, Compos. Part B 77 (2015) 338–348.

[11] Ministry of Environment and Urban Planning (2018). Çelik Yapıların Tasarım,

Hesap ve Yapımına Dair Esaslar, Ankara, Turkey (in Turkish).

TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI ANKARA ŞUBESİ
TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI DİYARBAKIR ŞUBESİ
ODEYA ENDAZYARÊN AVAHÎYÊ

TARİHİ YAPILARIN DEPREM KAYNAKLI YANGINDAN KORUNMASI

Bilgehan BAKIRHAN[1]

[1]Araştırma Görevlisi, Karabük Üniversitesi,
bilgehanbakirhan@karabuk.edu.tr

Özet

Tarihi yapılar, deprem sonrası yangın riski açısından hassas ve korunması gereken yapılar arasındadır. Deprem sonrası meydana gelen yapısal hasarlar, elektrik arızaları, gaz sızıntıları ile su ve kanalizasyon hatlarındaki sorunların neden olduğu çeşitli etkenler yangınlara yol açabilmektedir. Bundan dolayı bu tür yapıların özel önlemler alınarak korunması gerekir. Bu çalışmada tarihi yapılarda deprem sonrası yangınla mücadele süreci dünyadaki yangın olayları üzerinden ele alınmıştır. Sonuç olarak yangın riskini azaltacak önlemler sıralanmış; depremle birlikte ikincil afetlere karşı da hazırlıklı olmanın gerekliliği vurgulanmış ve tarihi çevrenin deprem kaynaklı yangınlardan korunmasına yönelik rehber oluşturulması önerilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Deprem, Tarihi yapılar, Tarihi yapılarda yangın riski, Yangından korunma

Abstract

Historic buildings are among the vulnerable structures that need to be protected in terms of post-earthquake fire risk. Structural damages, electrical failures, gas leaks and problems in water and sewage lines after earthquakes can lead to fires. Therefore, such buildings should be protected by taking special precautions. In this study, the post-earthquake firefighting process in historical buildings is discussed through fire incidents in the world. As a result, measures to reduce the risk of fire were listed, the necessity of being prepared for secondary disasters as well as earthquakes was emphasized, and it was suggested that guidelines be developed for the protection of the historic environment from earthquake-induced fires.

Keywords: Earthquake, Historical buildings, Fire risk in historical buildings, Fire protection

1. Giriş

Toplum içinde fiziksel, ekonomik, sosyal ve çevresel kayıplara yol açarak canlı ve cansız varlıklara zarar veren, çeşitli insani faaliyetleri sekteye uğratarak ya da tamamen durdurarak yaşam kalitesini önemli ölçüde etkileyen, doğal ya da insan kökenli travmatik olaylar afet olarak tanımlanmaktadır [1]. Toplumun genelinin yaşam kalitesini etkileyen bu tür olaylar insan kontrolünün dışında gerçekleşerek büyük yıkımların oluşmasına sebebiyet vermektedir (Resim 1).



Resim 1- 6 Şubat 2023 Pazarcık merkezli depremin etkisi Onikişubat/Kahramanmaraş (Url-5)

Depremler, yer kabuğunun hareketi sonucunda yıkıcı tahribatlara yol açabilen ve önceden kesin olarak tahmin edilemeyen doğal olaylarından biridir [2]. Ancak tedbirsizlik ve çaresizlik vb. nedenlerden ötürü tarih boyunca diğer doğal afetler gibi insanoğlunun yaşam standartlarını olumsuz etkilemiştir. Yeryüzünde sıklıkla yaşanan bu olay, doğrudan veya dolaylı olarak yapısal hasarlara neden olmaktadır. Depremin sismik etkileri yapılarda doğrudan hasarların oluşumuna neden olurken; depremin etkileri sonucunda ortaya çıkan yangın, su baskını vb. olaylar ise dolaylı hasarların oluşumuna sebep olmaktadır [3]. Deprem sarsıntısı, eşyaların kontrolsüz biçimde hareket etmesine ve yanıcı sıvı/gaz vb. maddelerin elektrik arkları veya açık alevlerle temas etmesine ve dolayısıyla yangınların oluşumuna sebebiyet verebilmektedir. Deprem sonrasında yangınlar, enkaz sonucu ortaya çıkan yanıcı malzemelerin tutuşması, söndürme ekiplerinin bölgeye erişiminin zorlaşması, bitişik nizamdaki ahşap yapıların tutuşması ve rüzgârın alevle-

ri kuvvetlendirmesi gibi sebeplerle kısa sürede büyüyebilmektedir. Ayrıca deprem; yapılarda yer alan otomatik yağmurlama sistemleri, yangın alarmları, yangın duvarları ve yangın bölmeleri gibi unsurların işlevlerini de engelleyebilir [4].

Günümüzde depremin ne zaman olacağı henüz kesin olarak bilinmese de belirli bölgelerde depremin büyüklüğü ve oluşturabileceği hasarlar hakkında tahminlerde bulunulabilmektedir. Buna bağlı olarak deprem sonrası yangınların etkileri hakkında geçmiş vakaları göz önünde bulundurarak ve yangın risk faktörünü azaltarak yangınların oluşturacağı zararları kontrol altına almayı amaçlayan çeşitli öneriler sunulmaktadır. Ancak sözkonusu tarihi yapılar olduğunda özgün yapısal özelliklerinin ve içeriklerinin yangına karşı korunması oldukça güç ve alınması gereken tedbirler kısıtlıdır [5]. Bu durum tarihi yapıların gelecek kuşaklara güvenle aktarımı konusunda özel önlemlere ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

2. Tarihi Yapılarda Deprem Sonrası Yangınların Etkileri ve Alınan Tedbirler

Yapıların yangın güvenliği ele alındığında yangın risk seviyelerine göre zarar görme ihtimalleri ve ortaya çıkabilecek hasarın boyutları dikkate alınmaktadır. İnsanlık tarihi boyunca yangın riski hep varolagelmiş; yeni teknoloji, malzeme ve elemanlarla birlikte yapı içerisinde çeşitli amaçlarla kullanılan mekânlarda yeni risklerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Nüfus artışı, ihmâl ve dikkatsizlik gibi sebepler neticesinde her geçen sene yangınlar meydana gelmekte ve maddi/manevi kayıplara sebep olmaktadır. Ulusal Yangından Korunma Derneği'nin (NFPA) raporuna göre sadece 2022 yılında ABD genelinde 522 bin 500 binada yangın meydana gelmiş, binlerce kişi hayatını kaybetmiştir [Url-1]. Ne yazık ki ülkemiz genelinde yangın vakalarına dair kapsamlı bir girişim olmadığından dolayı yıllara göre yangın sayıları, can kayıpları ve yangınların nedenlerine dair genel manâda istatistiki bilgiye ulaşılamamaktadır. Buna rağmen İstanbul [Url-2], Ankara [Url-3] ve İzmir [Url-4] Büyükşehir Belediyeleri'nin İtfaiye Daire Başkanlıkları'nın hazırladığı raporlara göre son 5 yılda 65 binden fazla bina yanmış, çok sayıda insan yaşamını yitirmiştir (Tablo 1).

Tablo 1- İstanbul, Ankara ve İzmir'deki Binalarda Meydana Gelen Yangın Sayıları (Url-2, Url-3, Url-4)

Yıllar	Binalarda Meydana Gelen Yangın Sayısı		
	İstanbul	Ankara	İzmir
2020	13080	---	2789
2021	11463	---	3101
2022	11893	2014	2033
2023	11873	1514	3113
2024	---	1142	1200

Ülkemizdeki yapıların büyük çoğunluğunun betonarme, taş veya toprak malzemelerden inşa edilmiş olması, deprem sebebiyle çökme esnasında ortamdaki oksijeni azalttığından dolayı yangın oluşumunu engellese de kimi zaman tehlikeli durumlar gözlemlenebilmektedir. Örneğin, doğalgaz ve elektrik hatlarının deprem neticesinde zarar görmesiyle oluşabilecek yangınlar ve bu yangınları söndürme amaçlı kullanılabilecek su rezervlerine ulaşılamaması, bina içerisindeki aktif söndürme sistemlerinin elektriğe bağlı nedenlerden dolayı işlevini yitirmesi, acil kaçış yollarına ulaşımın kapanması ve yangın merdivenlerinin/asansörlerinin hasar alması sonucu kullanılamaz hâle gelmesi ile yangının açıklıklardan hızlı bir biçimde ilerleyip büyümesi meydana gelebilecek başlıca tehlikelerdendir [6]. Tarihi yapıların deprem sonrası yangın riskini artıran etmenler, çeşitli yapısal ve çevresel faktörlerden kaynaklanabilir. Depremler, tarihi yapıların fiziksel bütünlüğünü zayıflatarak yangın çıkma ihtimalini artırabilir (Tablo 2).

Tablo 2-Tarihi Yapılarda Deprem Sonrası Yangın Riskini Oluşturan Etmenler

Tarihi Yapılarda Deprem Sonrası Yangın Riskini Oluşturan Etmenler	
Ana Etmenler	**Alt Etmenler**
Yapısal ve Donatı Hasarları	Duvar çatlakları ve yıkılmaların gerçekleşmesi
	Tesisat hasarlarının oluşması
Elektriksel Hasarlar	Eski ve kalitesiz kablolarda kısa devrelerin olması
	İhmal ve dikkatsizlik
Gaz Sızıntıları	Gaz iletim borularında hasarların oluşması
	Gaz kaçağı algılama sistemlerinde hasarların olması
Yanıcı Malzemelerin Varlığı	Ahşap ve diğer yanıcı malzemeler varlığı
	Mobilya, dekorasyon, ağaç/dal parçalarının varlığı

Yangın Algılama ve Söndürme Sistemlerinin Eksikliği	Yangın alarm sistemlerinin eksikliği
	Eksik veya kusurlu söndürme sistemlerinin varlığı
Enkaz Nedeniyle Erişim Engeli	Kaçış yollarının kapanması
	Söndürme ve kurtarma ekiplerinin erişememesi
Yangın Güvenlik Önlemlerinin Yetersizliği	Eğitim ve afetten korunma bilinci yetersizliği
	Yangın güvenlik stratejisinin mevcut olmayışı
Artçı Depremlerin Devamı	Yapısal zayıflıkların artması

Türkiye'nin aktif deprem kuşağında yer alması nedeniyle yukarıda da ifade edildiği üzere deprem kaynaklı yangınların oluşma riskini beraberinde getirmektedir. Deprem sonrasında özelikle yanıcı malzemelerin bulunduğu mekânlarda tutuşmaların gerçekleşmesi, elektrik kaçaklarının oluşması, açık alevli kaynakların devrilmesi ve doğal gaz boru hatlarındaki kırılmalar sonucunda yanıcı gazların parlaması neticesinde yapılı çevre ve kullanıcıları üzerinde yıkıcı etki oluşturan yangınlar görülebilmektedir. Bu etkiler; binaların ve altyapı unsurlarının kısmen ya da tamamen yok olmasına neden olarak fiziksel hasarları, yangın sonrası yeniden inşa maliyetleri ile iş kayıpları sonucunda ekonomik sorunları, yangının oluşturduğu zehirli gazlar sebebiyle hava kirliliğini ve toplumun yaşadığı sosyolojik-psikolojik travmaları kapsar.

Dünya genelindeki örnekler incelendiğinde deprem sonrası tarihi çevrede oluşan yangınların yıkıcı sonuçları gözler önüne serilmektedir. Örneğin, 18 Nisan 1906 yılında San Francisco'daki 7,9 Mw büyüklüğündeki depremde 28 binden fazla bina yıkılmış ve oluşan hasarın %80'inden fazlası yangın dolayısıyla oluşmuştur. Çok sayıda tarihi yapının tamamen yok olduğu depremde 3 binden fazla kişi yaşamını yitirmiştir. Deprem ve yangınların ardından şehirdeki yangın önleme ve söndürme sistemleri modernize edilmiş, daha etkili yangın söndürme yöntemleri ve ekipmanları kullanılmaya başlanmıştır [7]. 1923 yılında Japonya'da meydana gelen Büyük Kanto Depremi'nde 450 bin ev deprem sonrasındaki yangın sebebiyle yanmış ve yaklaşık 110 bin kişi hayatını kaybetmiştir [8]. Japonya'nın Kobe şehri 17 Ocak 1995 günü, 5 binden fazla insanın yaşamını yitirmesine sebep olan Büyük Hanshin depremiyle büyük ölçüde hasar almıştır. Depremin tarihi çevrede meydana gelmesi sebebiyle çok sayıda geleneksel ev ve tapınak kullanılamaz hâle gelmiştir. Ayrıca depremden sonra şehrin iletişim, su, elektrik ve gaz sistemleri büyük ölçüde zarar görmüş; meydana gelen yangının ahşap yapılara sıçraması kısa sürede söndürülmesini engellemiştir. Sonuçta 7 bin-

den fazla tarihi yapı yanarak kullanılamaz hâle gelmiştir. Tarihi yapıların bitişik nizamda yer alması, büyük çoğunluğunun ahşap malzeme içermesi, sokakların söndürme ekiplerinin erişimini güçleştirecek şekilde dar olması, tahliye alanlarının yetersizliği, yangın güvenliği mevzuatına uygun olmayan yapıların mevcudiyeti gibi nedenler yangının büyümesine, kolaylıkla yayılmasına ve bilançonun artmasına sebebiyet vermiştir (Resim 2) [9].



Resim 2- 17 Ocak 1995 Büyük Hanshin Depremi sonrasında meydana gelen yangın Kobe/Japonya (Url-6)

Japon hükümeti 2003 yılında deprem sonrası kültürel mirasın yangından korunmasına yönelik komite oluşturmuş ve Kyoto havzasında yer alan tarihi yapıları koruma amacıyla söndürme sistemleri önermiştir [10]. 1989 Loma Prieta depremi, San Francisco Körfez Bölgesi'nde ciddi hasara neden olmuş, deprem sonrası çıkan yangınlar özellikle San Francisco'nun Marina District bölgesinde bazı tarihi yapıların hasar görmesine ve yok olmasına sebep olmuştur. Deprem sonrası, California'da yapı kodları ve inşaat yönetmelikleri gözden geçirilerek güncellenmiş, yeni yapıların inşasında daha katı sismik standartlar uygulanmıştır [11]. Ülkemizde 17 Ağustos 1999 tarihinde Gölcük merkezli 7.4 Mw büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiş, depremin ardından TÜPRAŞ İzmit Rafinerisi'nin 3 ayrı bölgesinde yangın çıkmıştır. 4 gün süren söndürme çalışmalarının neticesinde can kaybı yaşanmazken tesis büyük çapta hasar görmüştür. Bu yangın, her ne kadar tarihi çevreye yakın yerde meydana gelmese de depremin ardından yangın çıkma riskine örnek teşkil etmektedir. TÜPRAŞ yönetimi, depremin ardından yoğun şekilde onarım çalışmaları başlatmış ve rafinerilerin yönetmeliklerini değiştirmiştir. Ayrıca acil durum planları yeniden revize edilmiştir [12]. Ülkemizin en bü-

yük depremlerinden biri ise 6 Şubat 2023 tarihinde merkez üssü Kahramanmaraş'ın Pazarcık ilçesi olan, 7.7 Mw büyüklüğünde yaşanan ve 10 ili etkileyen depremdir. Bu depremde binlerce insan hayatını kaybetmiş ve deprem çok büyük maddi hasarla sonuçlanmıştır. Deprem esnasında İskenderun limanının konteyner alanında ve bazı binalarda yangınlar meydana gelmiştir. Herhangi bir can kaybının yaşanmadığı yangınlarda, deprem sonrası arama kurtarma ve enkaz kaldırma çalışmaları yürütülmüştür. Ancak bilinçsiz şekilde yürütülen işlemlerin yangın riskini artırdığı sonucuna ulaşılmıştır [13].

Deprem sonrası yangın konusunda uluslararası mevzuat ve standartlar incelendiğinde, 2000'li yılların başlarında Amerika Birleşik Devletleri'nde yayınlanan Uluslararası Bina Kodu (IBC) karşımıza çıkmaktadır. Bu kod; yapı tasarımı, inşası ve bakımı ile ilgili minimum şartları belirleyerek deprem, yangın ve sel gibi afetlere karşı koruma ilkelerini referans almaktadır. IBC, yapıların genel güvenliğini konu alırken, deprem sonrası yangın risklerine de değinmiştir. Kod, özellikle yangın güvenliği sistemlerinin (sprinkler sistemleri, yangın bariyerleri, vs.) depreme dayanıklı olacak şekilde tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır [Url-7]. ABD'de yer alan bir başka kod ise Ulusal Yangından Korunma Ajansı (NFPA) tarafından geliştirilen ve yapıların güvenli bir şekilde inşa edilmesini ve yangına karşı korunmasını hedefleyen NFPA 5000 (Bina İnşaat ve Güvenlik Kanunu)'dir. Bu kodda ise deprem sonrası yangın riskini azaltmak amacıyla yangın güvenlik sistemlerinin depreme dayanıklı olması gerekliliği vurgulanmıştır [Url-8]. Ayrıca NFPA 909 (Kültürel Kaynak Varlıklarının Korunması), kültürel değeri olan yapıların, müzelerin, kütüphanelerin, arşivlerin ve diğer kültürel kaynakların yangından korunması için kapsamlı bilgiler sunar. NFPA 909 tarihi yapılarda deprem sonrası yangın riskine karşı alınması gereken önlemleri de içermektedir [Url-9].

Tarihi yapılarda yangın öncesinde, esnasında ve sonrasında alınması gereken önlemler hakkında çeşitli çalışmalar yürüten daha pek çok ülke, yapıların özgün kimliğini korumayı hedefleyerek ortaya çıkabilecek tüm tehlikeleri önlemek amacıyla bir dizi kararlar almış ve yürürlüğe koymuştur. Ancak ülkemizde yürürlükte olan Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik [Url-10], deprem kaynaklı meydana gelen yangınlara karşı tarihi yapıların korunması konusunda detaylı hükümler içermemesi veya yetersiz olması nedeniyle tarihi yapıların bu tür afetlere karşı savunmasız kalmasına yol açmaktadır. Tüm bu nedenlerden ötürü tarihi yapılarda deprem sonra-

sı meydana gelebilecek yangınları önlemek, oluşabilecek hasarı azaltmak ve bu konuda tüm paydaşların bilgilendirilmesi amacıyla; yangın güvenliği ve alınması gereken önlemler, yapısal güçlendirme, eğitim-bilgilendirme ve acil durum tatbikatları başlıkları altında bir rehber önerilmektedir (Tablo 3).

Tablo 3-Tarihi Yapılarda Deprem Kaynaklı Yangın Güvenlik Rehberi

Deprem Kaynaklı Yangın Güvenliği & Alınması Gereken Önlemler	1	Tüm mekânlar yangın yüklerine ve risk düzeylerine göre sınıflandırılmalı, bu doğrultuda mekâna uygun algılama, erken uyarı ve söndürme sistemleri entegre edilmelidir. Bu ekipmanların sismik performansları ayrıca değerlendirilmelidir.
	2	Deprem esnasında ve sonrasında kullanılmak üzere taşınabilir yangın söndürücü ekipmanlar temin edilmeli ve bu ekipmanları kullanacak operatörlere afet öncesinde eğitim verilmelidir.
	3	Temel yaşam hizmetleri için yapının işlevine ve kullanıcı yüküne uygun olarak detaylı acil durum ve müdahale planları hazırlanmalıdır
	4	Kaçış yolları açıkça işaretlenmeli ve her daim kolay erişime ve kullanıma hazır durumda bulundurulmalıdır.
	5	Yangına ve depreme dayanıklı geniş ve açık toplanma alanlarının oluşturulması teşvik edilmelidir.

Tablo 3-Tarihi Yapılarda Deprem Kaynaklı Yangın Güvenlik Rehberi (devamı)

Deprem Kaynaklı Yangın Güvenliği & Alınması Gereken Önlemler	6	Restorasyon ve koruma çalışmaları sırasında yangın riski oluşturan işlemler, uzman kontrolünde dikkatli bir şekilde gerçekleştirilmeli ve yangın söndürme ekipmanları tüm işlemler sırasında hazır bulundurulmalıdır.
	7	Yapı içerisinde mümkünse depreme dayanıklı yangın kompartımanları oluşturulmalı ve yangın kapıları ile bariyerler aracılığıyla ısı ve duman yayılımı sınırlandırılmalıdır.
	8	Ahşap malzemeler, tarihi yapıların özgün estetik değerleri dikkate alınarak yangın geciktirici kaplama ve boyalarla korunmalıdır.
	9	Yangın güvenlik merkezi sistemlerine entegre olunarak, yangın anında ekiplerin hızlı bir şekilde kesintisiz bilgilendirilmesi sağlanmalıdır.
	10	Deprem anında elektrik ve yakıt kaynaklarının alevlerle temasını önlemek amacıyla otomatik gaz ve elektrik kesme sistemleri kurulmalıdır.

Yapısal Güçlendirme & Bakım	11	Yapısal bütünlüğü korumak amacıyla depreme dayanıklı teknikler referans alınmalı ve taşıyıcı sistemin güçlendirilmesi ve bakımları yapılmalıdır.
	12	Eski ve kusurlu elektrik/gaz tesisatları yenilenmeli, kısa devre ile kaçak akımlar ve sızıntılar engellenmelidir.
	13	Düzenli aralıklarla yapılacak denetimlerle tespit edilen sorunlar, ihmâl edilmeden hızlı bir şekilde giderilmelidir.
	14	Deprem bölgesindeki yer altı ve yer üstü su kaynakları ile iletim hatlarının sismik performansları güçlendirilmeli, etkin biçimde çalıştığı teyit edilmelidir.
Eğitim & Bilgilendirme	15	Tarihi yapıların etrafında bulunan park, bahçe ve yeşil alanlar, yangının yayılmasını önlemek amacıyla düzenli olarak bakıma alınmalı, yanıcı ve parlayıcı materyallerden arındırılmalıdır.
	16	Yapılardaki yangın algılama ve erken uyarı sistemlerinin periyodik olarak bakımları yapılmalı, sistemlerin işlevselliği düzenli aralıklarla test edilmelidir.
	17	Tarihi yapılarla ilgili deprem ve yangın güvenliği alanında çalışan personelin sürekli eğitimi sağlanmalı, yeni teknolojiler ve yöntemler konusunda bilgi sahibi olmaları teşvik edilmelidir.
	18	Tüm personel ve kullanıcılar için düzenli aralıklarla acil durum tatbikatları yapılmalıdır. Bu tatbikatlar, depreme ve yangına yönelik acil eylem planlarının etkinliğini test etmeli ve tatbikat sonuçlarına göre gerekli iyileştirmeler yapılmalıdır.

Deprem kaynaklı yangın risklerini azaltmak için, binaların yangın güvenlik sistemleri depreme dayanıklı hale getirilmeli, düzenli bakım ve yapısal güçlendirme çalışmalarıyla desteklenmelidir. Aynı zamanda, yangın ve deprem sonrası güvenli tahliye ve müdahale için eğitim programları düzenlenerek, toplumun bilinçlendirilmesi ve bu konularda bilgilendirilmesi kritik önem taşır. Bu önlemler, afetlere karşı hazırlıklı olmayı ve afet sonrası riskleri minimize etmeyi sağlar.

3. Sonuç ve Öneriler

Deprem sonrası yangın riski, tarihi yapıların korunması bakımından bir tehdit oluşturmaktadır. Tarihi yapılar genellikle ahşap malzemelerden yapılmış olup, modern yangın güvenlik önlemlerinden yoksundur. Bu nedenle, deprem sonrası yangınla mücadelede özel bir dikkat ve özen gerektirmektedir. Özelikle Binaların Yangından Korunması Hakkındaki Yönetmelik'te tarihi yapılarda deprem sonrası yangın konusunda alınması gereken tedbirler ve yangın güvenliğinin tesis edilmesi hakkında yeterli hükümlerin yer alamaması, bu alandaki eksikliğe işaret etmektedir.

Yerel yönetimler, yangın güvenlik birimleri ve kültürel mirası koruma kurumları arasındaki etkin işbirliği ve koordinasyon ile bu değerlerin güvence altına alınması olasıdır. Bu konudaki tüm paydaşlar yangın güvenliği ve acil durum prosedürleri konusunda bilinçlendirilmelidir. Dolayısıyla tarihi yapılarda can güvenliğini tesis edecek, kültürel açıdan değere sahip içeriklerin korunmasını sağlayacak ve özgün kimliğine zarar vermeyecek etkili yangın güvenliği politikası ortaya konulmalıdır. Bu politika kapsamında tarihi yapıların korunmasından sorumlu kişiler tarafından pasif ve aktif önlemler alınmalı, sürdürülebilir stratejiler geliştirilmelidir [14].

Sonuç olarak, tarihi yapıların kültürel değerlerini geleceğe taşımak, modern yangın güvenlik önlemleri ve etkin acil durum planlamaları ile mümkündür. İlgili tüm tarafların işbirliği ve koordinasyonu, tarihi yapıların korunması için hayati önem taşımaktadır. Bu bağlamda ülkemizde, tarihi çevrenin deprem kaynaklı yangınlardan korunmasına yönelik kapsamlı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Kaynaklar

[1] Şahin. C. ve Sipahioğlu. Ş., Doğal Afetler ve Türkiye, Ankara. Gündüz Eğitim ve Yayıncılık, 2002.

[2] Feilden, B. M., Between Two Earthquakes: Cultural Property in Seismic Zones. ICCROM and Getty Conservation Institute. 9-103, 1987.

[3] Marrion. E. C., More Effectively Addressing Fire/Disaster Challenges to Protect Our Cultural Heritage, Journal of Cultural Heritage, 20, 746-749, 2016.

[4] Kılıç. A., Deprem Sonrası Yangınlar, Yangın ve Güvenlik Dergisi, Mayıs-Haziran, 38, 34-35, 1998.

[5] Bakırhan. B. ve Beyhan. F., Tarihi Binalarda Otomatik Yağmurlama Sistemlerinin Söndürme Süresi, Ortam Sıcaklığı ve Bina Özgün Değerlerinin Korunması Bağlamında Etkinliğinin İncelenmesi, TÜYAK 2023 Uluslararası Yangın Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi, 360-369, İstanbul, Türkiye, 2023.

[6] Çavuş. G. ve Okutan. A. Deprem Sonrası Ortaya Çıkabilecek Orman Yangınları; Peyzaj Mimarlığı Alanında Alınabilecek Pasif Önlemler. Ormancılık Dergisi, 20-33, 2012.

[7] Scawthorn. C., Fire Following Earthquake, Fire Safety Science, 971–979, 1986.

[8] Schencking. J. C., The Great Kanto Earthquake and the Culture of Catastrophe and Reconstruction in 1920s Japan, Journal of Japan. Studies, 34 (2), 295–331, 2008.

[9] Sakai. R., The Japanese Experience During the Kobe Earthquake: Management of Continuous Ambulatory Peritoneal Dialysis Patients in a Disaster, Renal Failure, 19:5, 693-699, 1997.

[10] Toki. K., Protection of Cultural Heritage From Post-Earthquake Fire, 6, 4-10, 2011.

[11] George. P. and Galloway. J. P., Lessons learned from the Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989. USGPO, Books and Open-File Reports Section, US Geological Survey, 1045, 1989.

[12] Danış. H. ve Görgün. M., Marmara Depremi ve Tüpraş Yangını, Deprem Sempozyumu Kocaeli 23-25 Mart 2005. 1362-1369, Kocaeli, Türkiye, 2005.

[13] Coşkun. G., Deprem Afeti Esnasında ve Sonrasında Meydana Gelebilecek

Yangın Risklerinin ve Olaylarının Tespiti ve İrdelenmesi. TÜBİTAK Deprem Araştırmaları Sanal Konferansı. 2023

[14] Vásconez. V. D., Sarria. A. C., Oswaldo. E., & Medina. A. Farias. O., Fires in World Heritage Buildings, Artificial Intelligence. 1. 1-15, 2021.

İnternet Kaynakları

Url-1: https://www.nfpa.org/education-and-research/research/nfpa-research/fire-statistical-reports/fire-loss-in-the-united-states

Url-2: https://data.ibb.gov.tr/tr/organization/itfaiye-daire-baskanligi

Url-3: https://www.ankara.bel.tr/ankara-itfaiyesi/istatistikler

Url-4: https://itfaiye.izmir.bel.tr/tr/IstatislikDetay/8456/9/2023

Url-5: https://www.ntv.com.tr/galeri/turkiye/deprem-ussunde-kahramanmarasta-son-durum,qOgxokrzCE6hhMgFRwt38A

Url-6: https://www.researchgate.net/publication/250275067_RiskandBehaviorofFireSpreadin

ADensely-builtUrbanArea

Url-7: https://codes.iccsafe.org/content/IBC2024P1/chapter-16-structural-design

Url-8: https://link.nfpa.org/free-access/publications/5000/2021

Url-9: https://link.nfpa.org/free-access/publications/909/2021

Url-10: https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2009/09/20090909-10.htm

28 EYLÜL 2024

7. ULUSLARARASI TARİHİ YAPILARIN GÜÇLENDİRİLMESİ VE GELECEĞE GÜVENLE DEVRİ SEMPOZYUMU

7. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRENGTHENING HISTORICAL BUILDINGS AND TRANSFERRING THEM SAFELY TO THE FUTURE

7. SEMPOZYÛMA NAVNETEWEYÎ LI DERBARÊ QEWÎKIRIN Û PARASTINA AVAHÎYÊN DÎROKÎ

DİYARBAKIR, SEZAİ KARAKOÇ KÜLTÜR MERKEZİ

A SALONU - 5A OTURUMU

Oturum Başkanları
Mustafa Laman, Mahsum Çiya Korkmaz

Tarihi Taş Yapıların Depreme Karşı Güçlendirilmesi için Yeni Teknolojiler
Felice, G.

Çimento Esaslı Harçların Tarihi Yapılar Üzerine Etkisi
Mustafa Başboğa, Mirza Taşçı, Murat Doğruyol, Osman Hulusi Ören

Kereste Bazlı Güçlendirme ile Güçlendirilmemiş Yığma Duvarların Düzlem İçi Hasar Mekanizmasının Simülasyonu
Emma Babula, Daniele Malomo, Daniel Chung, Philip Tidwell, Bora Pulatsu

Doğal Zeolit ve Polipropilen Lif Katkılı Kireç Harçlarının Fiziko-Mekanik Özellikleri
Muhammet Ahmet Mecit Işık, Gamze Üçdemir, Oğuzhan Uğurlu
Gökhan Kaplan, Abdulkadir Cüneyt Aydın

Kan ununun Kireç Esaslı Harçlarda Katkı Malzemesi Olarak Kullanılması
Emine Özdoğru, Kemal Erdil, Nabi Yüzer, Oruç Kaan Türk

Tahribatsız Yerinde Ölçüm Teknikleriyle Elde Edilen Taş Basınç Dayanımlarının Tahrip Edici Laboratuvar Testleriyle Karşılaştırılması
Yunus Arca, Kerem Kurnaz, Medine İspir, Sinan Acıkgöz, Anıl Özdemir

ÇİMENTO ESASLI HARÇLARIN TARİHİ YAPILAR ÜZERİNE ETKİSİ

Mustafa BAŞBOĞA[1], Mirza TAŞÇI[2], Murat DOĞRUYOL[3], Osman Hulusi ÖREN[4]

[1]Yüksek Lisans Öğrencisi, Şırnak Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, m_basboga@hotmail.com
[2]Yüksek Lisans Öğrencisi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, mirzatasci@hotmail.com
[3]Dr.Öğr.Üyesi, Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü mdogruyol@siirt.edu.tr
[4]Dr.Öğr.Üyesi, Şırnak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü ohoren@sirnak.edu.tr

Özet

Tarihi yapıların restorasyonunda ve güçlendirilmesinde bağlayıcı malzeme seçiminde çimento esaslı harçların kullanılması tarihi yapıda bazı bozulmalara neden olmaktadır. Çimento esaslı harçların kolay hazırlanması ve hızlı dayanım alması tercih sebebi olsa da yüksek dayanımları ve yapılarındaki karmaşık tuzlar tarihi yapıda bozulmalara neden olmaktadır. Bu çalışmada Siirt bölgesine ait yaklaşık 200 yıllık yıkık geleneksel Cas evinden tarihi Cas harcı temin edilerek çimento esaslı harç ile kimyasal, mekanik, termal ve mikroyapısal özellikleri karşılaştırılmıştır. Çimento esaslı harcın tarihi yapıda kullanılan alçı esaslı harçtan birçok özellik bakımından farklılık gösterdiği ve yüksek mekanik özelliklerinin kesme kuvveti etkisi altında tarihi yapıya büyük zarar verebileceği anlaşılmaktadır.

Anahtar kelimeler: Tarihi yapılar, Cas evleri, dayanım, termal analiz, mikroyapısal analizler

The Effect Of Cement Based Mortars On Hıstorıcal Buildings

Abstract

The use of cement-based mortars in the selection of binders in the restoration and strengthening of historical buildings causes some deterioration of the historical structure. Although easy preparation and fast setting of cement-based mortars are preferred, their high strength and complex salts in their structure cause deterioration of the historical structure. In this study, historical Cas mortar was obtained from a 200-year-old demolished traditional Cas house in Siirt region and its chemical, mechanical, thermal and microstructural properties were compared with cement-based mortar. It was found that the cement-based mortar differs from the gypsum-based mortar used in the historic structure in many properties and its high mechanical properties can cause great damage to the historic structure under shear stress.

Keywords: Historic buildings, Cas houses, strength, thermal analysis, microstructural analysis

1.GİRİŞ

Tarihi yapılar kültürel kimliği koruyan ve simgeleyen önemli mimari parçalardır. Bu binalar, inşa edildikleri dönemin toplumsal, siyasi ve dini çerçevesini ortaya koymanın yanı sıra, bulundukları çevrenin özelliklerini de yansıtırlar (Ekşi Akbulut vd. 2018). Tarihi yapıların harçlarında bağlayıcı olarak Anadolu'dan dünyaya yayılan en eski harç olarak bilinen kireç, Osmanlı dönemine ait yapılarda görünen kireç kil karışımı horasan harcı ve alçı yaygın olarak kullanılmıştır [1–5]. Ancak 19. yüzyılın ikinci yarısında, Portland çimentosunun ortaya çıkışı; kireç, alçı gibi geleneksel harçların kullanımında önemli bir düşüşe neden olmuştur [1–3].

Çimento harcı, kolay hazırlanması ve gösterdiği yüksek erken dayanımı ile istenilen niteliklere uygun görünmesine rağmen içeriğinde kalsiyum silikat ve alüminat olması, alçı taşı ve bazik tuzları içermesi nedeni ile tarihi yapıların onarım ve güçlendirmesinde sorunlara neden olmaktadır. Söz konusu tuzlar tarihi duvarlarda; taşlarda yüzey erozyonlarına, harçlarda ise ayrışmaya yol açan tehlikeli tuzlardır [6–9]. Bu tuzlar, aynı zamanda tarihi duvarlardaki başka tuzlarla da tepkimeye girerek yeni ve daha kompleks tuzları da oluşturabilmektedir [10,11]. Bu yüzden tarihi yapıların modern harçlar ile onarılması yapıya zarar verebilir [12–14]. Tarihi yapılarda çimento esaslı harçların restorasyon harcı ile değiştirilen alanların derzlere yakın bölgelerde kumtaşı üzerinde çevresinde çiçeklenme tarihi ve reaktif taş hasarı gözlemlenebilir (Şekil 1 ve Şekil 2)[15].



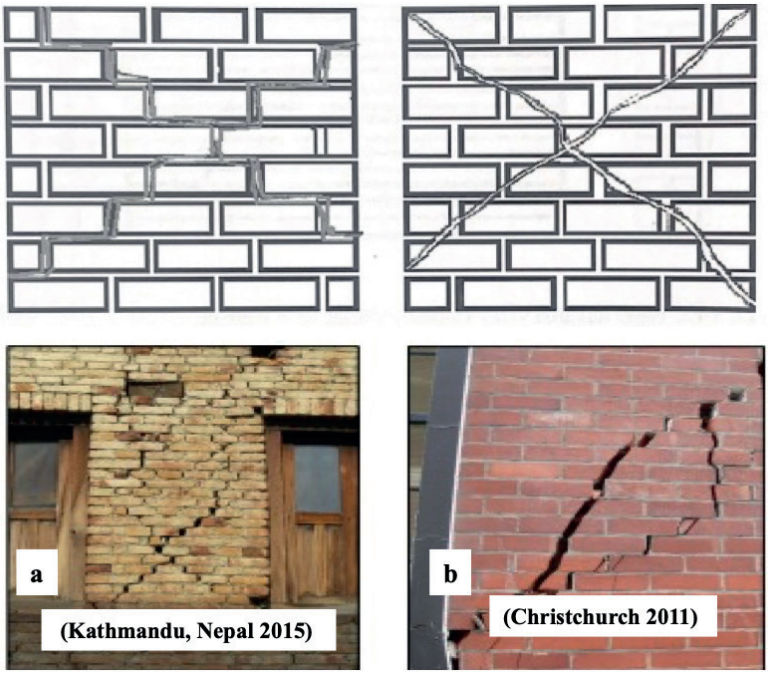
Şekil 1. Dresden Teknik Üniversitesi Kampüsteki yirminci yüzyıl başlarına ait bir binanın tuğla yüzeyinde magnezyum sülfat (hekzahidrit) çiçeklenmesi [15]



Şekil 2. Kumtaşının, restorasyon harcı ile derzlenmesi sonucu çevresinin çiçeklenmesi.

Çimento esaslı harçların ısıl genleşme katsayılarının alçı ve kireç gibi geleneksel harçlara göre yüksek olması nedeniyle bu tip harçlar, ısınma-soğuma etkisinde oluşan genleşme-büzülme hareketlerinde yapıda bulunan geleneksel harç ile uyumlu çalışamama sorununa yol açmaktadır [16].

Onarımda kullanılan çimento esaslı harçlarda, çimentonun basınç dayanımı genellikle alçı ve kireç bazlı harçlara göre yüksek olması; onarım harcının düzgün yayılı yük altında direnmesine karşın, yanındaki zayıf geleneksel harcın ezilmesine neden olmaktadır [17]. Farklı mukavemet oranlarına sahip yığma taş bloğu ve harç dayanımına sahip yığma duvarlarda depremlerin ardından gözlenen diyagonal kesme çatlağı hasarı Şekil 3' te gösterilmiştir [18–21]. Türkiye'deki depremlerin etkisinde taş yığma yapıların harçlarında oluşturduğu kesme çatlak hasarı Şekil 4' te gösterilmiştir.



Şekil 3. Farklı taş dolgu-harç mukavemet oranlarına sahip farklı duvar iskeleleri için depremlerin ardından gözlenen diyagonal kesme çatlaması.

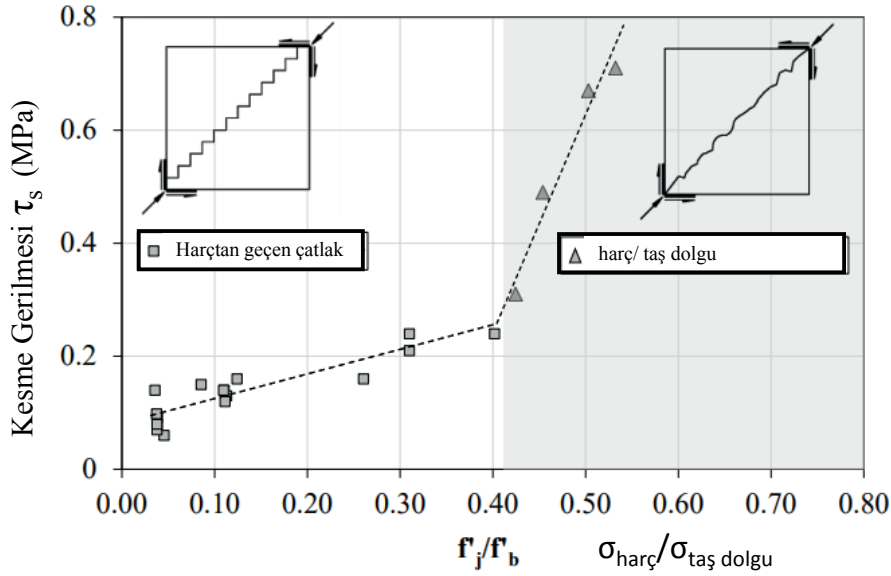


Kilis, 2023 Kastamonu,2023

Şekil 4. Yığma yapı duvarlarında harçlarda diyagonal kesme çatlaması.

Qiu ve ark. (2016)[20] çalışmasında iki ayırt edici diyagonal kesme hatası mekanizması arasındaki geçiş noktası (tek başına harç derzlerinden çatlama ve hem taş dolgu hem de harçtan çatlama) şu şekilde belirlenmiştir:

Harç- yığma taş dolgu malzemelerinin dayanım ilişkisine göre tek tek dolgu malzemesi olan yığma duvar taşları basınç dayanımı (f'b) ASTM (2003) 'ya göre sıkıştırma testi kullanılarak test edilirken, her bir harç bileşiminin basınç dayanımı(f'j), ASTM (2008)'e göre sıkıştırmaya 50 mm küp yüklenerek belirlenmiştir. Harç- taş dolgu basınç dayanımı f'j / f'b oranı 0,4'ün altında (<0,4) harç derzlerinde çatlamasına neden olurken, oranı 0,4' ten büyük (>0,4) olduğunda hem taş duvar dolgusunda hem de harç derzlerinde çatlamaya neden olmaktadır Şekil 5 [19,20].



Şekil 5. Harç-dolgu duvar arasında dayanım ilişkisi [19,20].

Bu çalışmada, Türkiye'nin güneydoğusundaki Siirt ili ve Tillo ilçesinde Cas (*Farsça*- öğütülmüş alçı) olarak adlandırılan alçı esaslı harçla inşa edilen geleneksel Cas evlerinde (19. yüzyıl) kullanılan harç ile modern yapılarda kullanılan çimento esaslı harçların fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ile mikroyapısal analizleri karakteristik olarak karşılaştırılmıştır. Geleneksel Cas evleri gibi tarihi yapıların onarım veya güçlendirilmesinde modern çimento harçların kullanılmasının tarihi yapı üzerinde etkisini araştırılmıştır.

2. Materyal Ve Metot

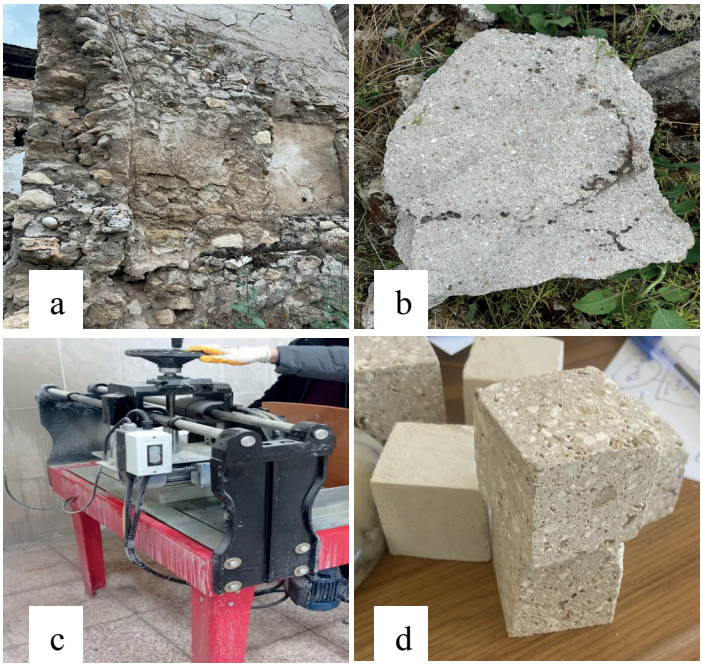
"Cas" evleri şüphesiz Siirt ilinin ve Güneydoğu Türkiye'deki komşu bölgelerin en belirgin ve baskın geleneksel konut tarzıdır [22]. "Cas" aslında bölgedeki karakteristik jeolojik toprak oluşumunu oluşturan alçı taşının öğütülmesi, yakılması ve işlenmesinden oluşan bir işlemle üretilen bir malzeme olan harca verilen addan gelmektedir [22].

Ekoloji ve iklim koşullarına bağlı olarak oluşturulan evler iki katlı, yukarıya doğru daralan, küçük pencereli düz damlı, "Cas" adı verilen bir harçla sıvanmıştır. Alçı taşının yakılıp öğütülmesiyle elde edilen Cas, çabuk sertleşmesi sonucu kubbe ve kemer yapımına olanak vermektedir. Cas evlerin kapı ve pencere çevrelerinde çok güzel taş oymalar yer almaktadır [23](Şekil 6). Cas ev temelden yukarıya doğru daralan kalın (sepke) yüksek duvarlı kaleye benzeyen, sarımsı beyaz renkli görünümdedir. Taş yığma bir yapı olan Cas evlerinin duvarları, blok kireçtaşlarından 50-120 cm kalınlığında Cas harcı kullanılıp bağlanarak yine Cas harcı ile sıvanarak inşa edilmişlerdir [24]. İç yapı elemanları Anadolu Türk-konut mimarisini yansıtmakta olup merdiven, ocak, raf, yüklük, nişler, dolaplar, döşemeler, merdivenler, oda kapıları, tavan kaplamaları ve gusülhaneden oluşmaktadır [25]. 19- yy. sonu inşa edilen Cas evler bugüne kadar gelmiş olup ne yazık ki bakımsızlık nedeni ile günümüzde yıkılmaya terk edilmişlerdir [26,27].



Şekil 6. Cas evlerinden örnekler (Siirt, Tillo)[22,28]

Cas numuneleri ise yıkık durumda Cas evinden temin edilen Cas harcı ve kireçtaşı örnekleri (Şekil 7a, 7b) beton kesme testeresinde kesilerek uygun forma getirilerek elde edilmiştir (Şekil 7c). Daha sonra kireçtaşı ve Cas harcı örnekleri deneysel çalışmalara tabi tutulmuştur (Şekil 7d).



Şekil 7. Cas harcının ve kireçtaşı örneklerin elde edilmesi.

Çimento harç için CEM I 42,5 N sınıfı çimento kullanılmıştır. Agrega olarak silis esaslı kum malzeme kullanılmıştır. Harç karışım oranları standart sıva harcı karışım oranları kullanılarak hazırlanmıştır. Çimento esaslı harç su/çimento = 1/2, çimento/ince agrega =1/3 olacak şekilde harç mikserinde iyice karıştırılarak elde edilmiştir. Alçı-esaslı harç ve kullanılan çimentonun kimyasal analizleri XRF metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Portland çimentosunun kimyasal analiz sonuçları Tablo 1'de, alçı-esaslı harcın sonuçları Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Portland çimentosu kimyasal analizi ağırlıkça, %.

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	Na_2O_{eq}*	K.K**
18,12	5,21	3,03	62,06	2,70	3,21	0,09	0,96	0,09	3,98

*Na_2O_{eq} (toplam alkali) =Na_2O+0.658 K_2O **K.K. = Kızdırma kaybı

Tablo 2.Alçı esaslı harcın kimyasal analizi ağırlıkça, %.

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O_{eq} *
0,99	0,43	0,15	35,94	0,54	52,87	0,10

*Na_2O_{eq} (toplam alkali) =Na_2O+0,658 K_2O

2.1. Mekanik Deneyler

Mekanik değerleri ölçmek için ASTM C109 standartlarına uygun YKM-CM106 ekipmanı kullanılmıştır [29]. Yükleme hızı 50 N/s olarak belirlenmiştir.

2.1.1. Basınç Dayanımı

Alçı esaslı harcın tarihi yapıdan alındıktan sonra beton testeresinde 40 mm'lik küp numune haline getirildikten sonra basınç dayanımı değeri belirlenmiştir.

Çimento esaslı harçlarda ise 40 × 40 × 160 mm boyutlarına sahip prizma şeklindeki kalıplardan 1 gün sonra çıkarılıp beton testeresinde kesilerek elde edilen 40 mm'lik küp numunelerin 28 gün kür uygulandıktan sonra ölçülmüştür.

Basınç dayanım değerleri TS EN 196-1[30] standardına göre belirlenmiştir. Her bir numune örneğinden 3 adet dayanım değeri ölçülerek ortalama değerleri alınmıştır.

2.1.2. Eğilme Dayanımı

Alçı esaslı harçların tarihi yapıdan alındıktan sonra beton testeresinde 40 × 40 × 160 mm boyutlarına getirildikten sonra eğilme dayanımı değeri belirlenmiştir.

Çimento esaslı harçlarda ise 40 × 40 × 160 mm boyutlarına sahip prizma şeklindeki kalıplardan 1 gün sonra çıkarılıp 28 gün kür uygulandıktan sonra ölçülmüştür.

Dikdörtgenler prizma şekline sahip numune, cihaza yan yüzeylerinden biri mesnet silindirleri üzerine gelecek şekilde, boyuna ekseni mesnet silindirlerine dik olarak yerleştirilmiştir. Yük, yükleme silindiri vasıtasıyla numunenin mesnetlere oturan yüzünün karşıt yüzüne düşey olarak uygulanmıştır.

Her bir numune örneğinden 3 adet dayanım değeri ölçülerek ortalama değerleri alınmıştır.

2.2. Ultrasonik Darbe Hızı Deneyi

Test programının ilk aşamasında numunelere ultrasonik darbe hızı (UPV) ve ısıl iletkenlik katsayısının tahribatsız testleri yapıldı. Ultrason deneyi, numunelere ultrason dalgaları göndererek ve numunedeki dalgaların hızını ölçerek numunelerin dayanımını tahmin etmek için kullanılır. Bu yöntem, numune içindeki çatlakları, boşlukları ve diğer yapısal özellikleri tespit ederek numunenin mukavemetinin belirlenmesine yardımcı olur. Proceq marka Pundit Lab cihazı kullanıldı. Her numuneden üç farklı yerden ölçülen değerlerin ortalaması alınarak dalganın geçiş hızları belirlendi.

2.3. Termal analizler

Termal deneyler için numunelerin sıcaklığı T tipi termokupllar ile ölçülerek 30 kanallı Hioki LR8400-20 markalı dataloggerda 0,01°C hassasiyetle 10 ms ile 1 saat aralığında kayıt yapılmıştır. Testler 40 mm' lik küp numunelere uygulandı. Her örneklem grubu için 3 okuma yapılarak ortalama değerler hesaplandı.

2.4. Mikroyapısal analizler

Daha önceki bilgileri doğruladıktan sonra, kuvvet farklılıklarının arkasındaki mekanizmaları anlamaya yardımcı olmak için SEM analizi yapmak amacıyla kırık örneklerin her birinin dış kenarından örnekler alındı. Kullanılan SEM, LEO-EVO 40 (Cambridge-İngiltere) idi. Numunelerin kaplama gerektirmemesi için düşük vakum koşullarında kullanılmıştır. Kullanılan EDX analizi Bruker-125 eV (Berlin-Almanya) idi. Numuneyi oluşturan elementlerin tanımlanmasını sağlayan EDX ile birlikte BSE (geri saçılmış elektron) modu kullanıldı. SEM analizleri oda sıcaklığında yapıldı. XRD analizi için Rigaku RINT-2000 X-ışını kırınım ölçer aletleri kullanıldı. Ayrıca bu sistemlere entegre bir Jade 6+ kristal analiz programı ve kütüphanesi bulunmaktadır.

3. Araştırma Bulguları

3.1. Ultrasonik Darbe Hızı (UPV)

Çimento esaslı harç ile alçı esaslı harç ses iletim hızları karşılaştırıldığında

çimento esaslı harç 4600 m/s, tarihi alçı esaslı harç ise 3100 m/s olarak ölçülmüştür Tablo 3. Malzemede çatlak ve boşluklar malzemenin ses iletim hızını yavaşlatır. Alçı esaslı harcın ses iletim hızının düşük olması çimento esaslı harca göre çatlak ve boşlukların daha fazla olduğunu göstermektedir [31]. Çatlak ve boşluk basınç mukavemetinin düşmesine de neden olmaktadır.

Tablo 3. Ultra ses geçiş hız (UPV) değerleri.

Harç	UPV (m/s)
Çimento esaslı harç	4600
Alçı esaslı harç	3100

3.2. Mekanik Değerler

Çimento esaslı harçlar kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) bağı sayesinde yüksek dayanıma sahipken, alçı esaslı bir harç olan Cas, alçıtaşı oluşumu ile dayanım kazanmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan 200 yıllık Cas harcı 6,03 MPa basınç dayanımına sahip iken çimento esaslı harç 37,64 MPa basınç dayanımına sahiptir. Yığma yapı harçlarının basınç dayanımı (f'j) yığma yapı duvarlarda kullanılan kayacın basınç dayanımı (f'b) ile uyumlu olması gerekmektedir. Kireç taşından oluşan yığma duvarların basınç dayanımı, alçı esaslı harçlar ile bağlanması durumunda f'j / f'b = 0,21<0,4 olduğu için deprem anında harçlarda ezilmeler ve kireç taşı blokların dağılması durumu yaşanabilir. Ancak kireç taşından oluşan yığma duvarların basınç dayanımı, çimento esaslı harçlar ile bağlanması durumunda f'j / f'b = 1,28> 0,4 olduğu için hem harçta hem de kayaçta ezilme ve kesilmeler yaşanabilir. Bağlayıcı malzemelerin mekanik analiz sonuçları Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Deney malzemelerinin mekanik değerleri.

Malzeme	Basınç Dayanımı	Eğilme Dayanımı	f'j / f'b
	MPa		
Kireçtaşı	29,33 0,05	-	1
Çimento esaslı harç	37,64 0,05	8,44 0,05	1,28
Alçı esaslı harç	6,03 0,05	0,05	0,21

3.3. Isıl İletkenlik

Çimento esaslı harç ile alçı esaslı harcın ısı iletimleri karşılaştırıldığında çimento esaslı harcı ısı iletkenliği 1,612 W/mK, alçı esaslı harcın 0,700

W/mK olarak ölçülmüştür. Çimento esaslı harcı termal yayılımı ortalama 1,033 mm^2/s, alçı esaslı harcın 0,512 mm^2/s olarak ölçülmüştür. Bir maddenin birim kütlesinin sıcaklığını 1 °C değiştirmek için gerekli ısı miktarına öz ısı denir. Her maddenin aynı şartlarındaki öz ısısı farklıdır. Dolayısıyla öz ısı maddeler için ayırt edici bir özelliktir. Öz ısı ortalamaları çimento esaslı harç 1,564 MJ/m^3K, alçı esaslı harcın 1,398 MJ/m^3K olarak ölçülmüştür. Çimento esaslı harcın ısı iletkenliği ve termal yayılımı tarihi alçı harcının çok üzerinde olduğunu göstermiştir Tablo 5.

Tablo 5. Termal sonuçlar.

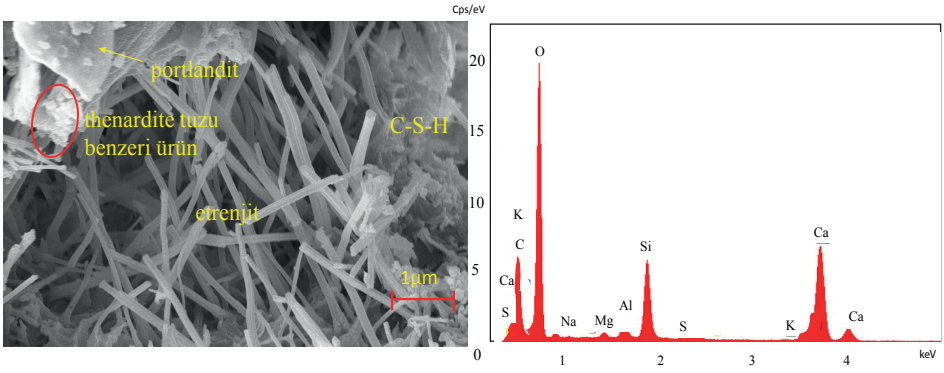
Harç	Isı iletkenlik, W/mK	Termal yayılım, mm^2/s	Öz ısı, MJ/m^3K
Çimento esaslı harç	1,612	1,033	1,564
Alçı esaslı harç	0,700	0,512	1,398

Onarım harçlarının, yapılarda oluşan hasarları önleyebilmesi önemlidir, ancak çimento esaslı harçlar ile tarihi yapıya ait alçı esaslı harcın termal sonuçlarındaki yüksek fark ısınma/soğumaya bağlı genleşme/büzülmelerden kaynaklı bozulmalara bağlı neden olacaktır.

3.4. SEM Analizleri

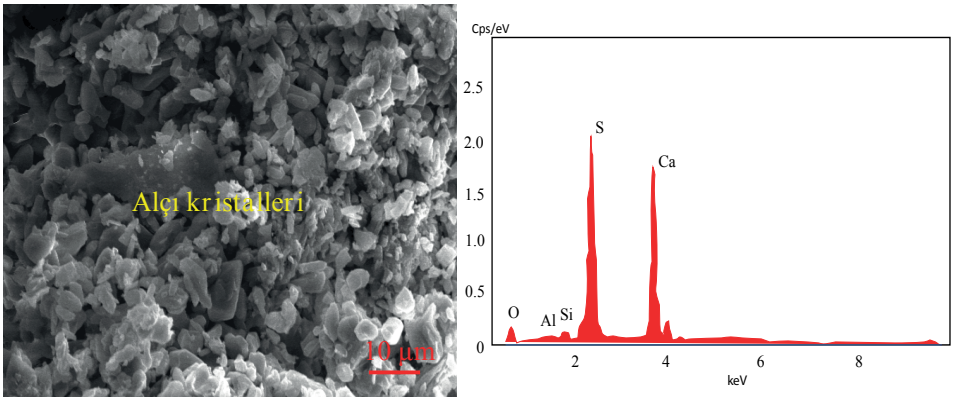
Çimento esaslı harçların SEM analizlerinde çimentonun su ile birleşmesi sonucu ile oluşan hidratasyon ürünleri portlandit, etrenjit ve C-S-H bağı gibi beklenen ürünler gözlemlenmiştir. Portlandit (CH) çokgen kristal şeklindedir. Hidratasyon sonrası oluşan ürünlerin hacmen %25'ini oluşturmaktadır. Etrenjit iğnemsi yapıya benzemekte olup hacimsel genleşme oluşturan bir üründür. Etrenjitin dayanımına bir katkısı yoktur. C-S-H bağı ağımsı bir yapıya sahiptir ve çimento esaslı harçlarda dayanımı artıran ürün olarak bilinmektedir.

EDS analizleri SEM de görülen ürünlerin içeriklerini destekleyen elementler olduğunu göstermiştir. Çimento esaslı harç EDS analizinde CH, C-S-H bağı, etrenjit ürünleri için gerekli olan kalsiyum (Ca), silisyum (Si), alüminyum (Al) ile birlikte sodyum (Na), magnezyum (Mg) ve kükürt (S) gibi elementler varlığını göstermektedir. Çimento harcında S varlığı sülfat tuzlarına işarettir. Sol üstte kırmızı halka içerisine alınan beyaz kristalin tuz olabilir. EDS analizlerinde Thenardite bir sodyum sülfat (Na_2SO_4) minerali olabileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 8. Çimento esaslı harcın SEM-EDS analizi.

Alçı esaslı harçların düşük örneklerde alçı kristallerinin veya matris yapısının iyi gelişemediği dayanımı yüksek örneklerde ise bu gelişimin daha kaliteli olduğunu göstermektedir [32]. Deneysel çalışmada kullanılan alçı esaslı harcında alçı kristallerinin oldukça belirgin ve iyi geliştiğini gözlemlemek mümkündür. Bu tarihi yapıya ait alçı esaslı harcın dayanımının diğer alçı harçlarına göre yüksek olduğunu göstermektedir. Alçı esaslı harçta yüksek oranda alçıtaşına bağlı gerekli olan kalsiyum (Ca), kükürt (S) elementlerinin varlığını göstermektedir. Alçı esaslı harçta düşük oranda bulunan silisyum (Si) içeriği harç içerisine karışan silis içerikli agregalardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

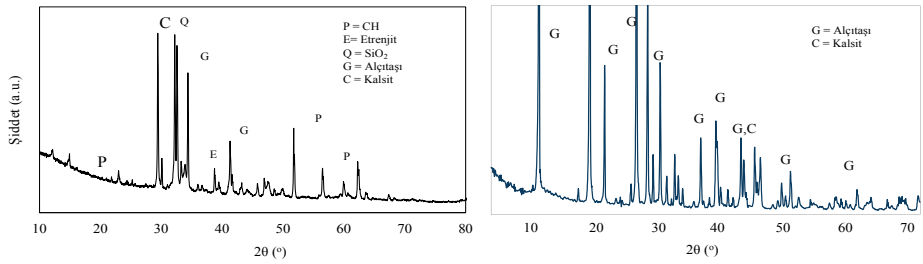


Şekil 9. Alçı esaslı harcın SEM-EDS analizi.

3.5. XRD faz analizi

XRD faz analizi çimento esaslı harçlarda dayanım oluşturan, quartz, portlandit, etrenjit, kalsit ve alçıtaşı gibi çok çeşitli ürünleri oluşurken, geleneksel Cas harcında dayanım oluşturan yoğun alçı taşı ve kalsit zirvelerinin olduğunu göstermiştir (Şekil 10).
Cas harcında kalsit zirvesinin olması kireçtaşı agregasından veya bir miktar kireç karıştırılmasından kaynaklanıyor olabilir.

Şekil 10a'da SiO_2 varlığı çimento-esaslı harcın güçlü C-S-H bağına sahip olduğunu, Şekil 10b'de geleneksel Cas harcında alçıtaşının yoğun olması alçı esaslı bir harç olduğunu ve önceki analiz sonuçlarını desteklediğini göstermektedir.



Şekil 10. a) Çimento esaslı harcın b) alçı esaslı harcın XRD analizi.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Yapı malzemeleri için temel performans gereksinimleri yüksek mukavemet ve dayanıklılıktır. Güçlü kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) bağı nedeniyle, çimento esaslı harçların hem basınç (37,64 MPa) hem de eğilme (8,44 MPa) dayanımları, geleneksel alçı esaslı Cas harçlarının hem basınç (6,03 MPa) hem de eğilme (2,11 MPa) dayanımlarına kıyasla çok yüksektir. Bu durumda restorasyon çalışmalarında tarihi bina duvar harçlarında çimento esaslı harçların kullanılmasının tarihi harcın ezilmesine neden olabilir.

Çimento esaslı harç ile alçı esaslı harcın ısı iletimleri karşılaştırıldığında çimento esaslı harcı ısı iletkenliği 1,612 W/mK, alçı esaslı harcın 0,700 W/mK olarak ölçülmüştür. Çimento esaslı harcı termal yayılımı ortalama 1,033 mm^2/s, alçı esaslı harcın 0,512 mm^2/s olarak ölçülmüştür. Öz ısı or-

talamaları çimento esaslı harç 1,564 MJ/m^3K, alçı esaslı harçta 1,398 MJ/m^3K olarak ölçülmüştür. Çimento esaslı harçların termal özelliklerinin alçı esaslı harca göre çok yüksek olması tarihi yapılarda termal konforu düşüreceği gibi ısınma/soğuma döngüsüne bağlı genleşme/büzülme gerilmeleri ile tarihi yapıya zarar verebilir.

SEM-EDS, XRF ve XRD sonuçlarına göre, çimento esaslı harçlarda alkali tuzların (Na_2O ve K_2O) içermesi, tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesinde sorunlara neden olabilir.

Bu çalışma, çimento esaslı harçlar ile tarihi alçı esaslı harçların kimyasal ve mekanik özelliklerindeki büyük farklılıkları vurgulamaktadır. Tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesinde, orijinal harcın bağlayıcı malzemesinin ve harcı oluşturan agregaların gradasyonunun yapının onarımında/güçlendirilmesinde aslına uygun olarak kullanılması, tarihi yapının korunmasına ve geleceğe güvenli bir şekilde aktarılmasına fayda sağlayacaktır.

Kaynaklar

[1] Erdoğan T.Y., Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık, Ankara, 2002.

[2] Böke H., Akkurt S., Ipekoğlu B., Uğurlu E., Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters, Cem Concr Res 36 (2006) 1115–1122. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.011.

[3] Arandigoyen M., J.I. Alvarez, Pore structure and mechanical properties of cement-lime mortars, Cem Concr Res 37 (2007) 767–775. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.023.

[4] Binici, H., Çağatay, İ. H., Kaplan, H., Değişik Faktörlerin Beton Mukevemetine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesİ , Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 6 (3) (2000) 203–209.

[5] Hejazi M., Hejazi B., Hejazi S., Evolution of Persian traditional architecture through the history, Journal of Architecture and Urbanism 39 (2015) 188–207. https://doi.org/10.3846/20297955.2015.1088415.

[6] Hekal E.E., Kishar E., Mostafa H., Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances, 2002.

[7] Lopez-Arce P., Doehne E., Greenshields J., Benavente D., Young D., Treatment of rising damp and salt decay: the historic masonry buildings of Adelaide, South Australia, Materials and Structures/Materiaux et Constructions 42 (2009) 827–848. https://doi.org/10.1617/s11527-008-9427-1.

[8] Uğur, T.,Güleç, A., Harç, sıva ve diğer kompozit malzemelerde kullanılan bağlayıcılar ve özellikleri. , Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi, 17 (2014) 77–91.

[9] Török, B., Len, A., Orbán, Z., Salt content analysis of historic masonries with SEM 12.3 , Pollack Periodica (2017) 99-108.

[10] Akman, M. S., Güner, A., Aksoy, I. H., The history and properties of khorasan mortar and concrete., Turkish and Islamic Science and Technology in the 16th Century, ITU Research Centre of History of Science and Technology 1 (1986) 101–112.

[11] Ahunbay Z, Tarihi Çevre Koruma ve Restorasyon., 2009.

[12] Collepardi M., Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings, 1990.

[13] de Buergo M.A., T.Ballester, González L., Restauración de edificios monumentales, Monografías Del Ministerio de Obras Públicas Transportes y Medio Ambiente, Spain. (1994).

[14] Moropoulou A., Bakolas A., Moundoulas P., Aggelakopoulou E., Anagnostopoulou S., Strength development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries, Cem Concr Compos 27 (2005) 289–294. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.017.

[15] Siedel H., Salt efflorescence as indicator for sources of damaging salts on historic buildings and monuments: a statistical approach, Environ Earth Sci 77 (2018). https://doi.org/10.1007/s12665-018-7752-4.

[16] Güleç A T.T., Physico-chemical and petrographical studies of old mortars and plasters of Anatolia. , Cem Concr Res (1997) 227–234.

[17] Lanas J., Alvarez J.I., Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior, Cem Concr Res 33 (2003) 1867–1876. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00210-2.

[18] Öncü, M.E., Karaşin A., Çok Katlı Yığma Binaların Deprem Güvenliklerinin Değerlendirilmesi. (DAD)., Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi 8(1) (2009) 63-67.

[19] Bayülke N., Yığma yapılar taş ve tuğla, , TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi. (2018).

[20] Qiu H., Chin R., Ingham J., Dizhur D., Experimental shear testing of unreinforced masonry wall panels 2016 NZSEE Conference, 2016.

[21] Göker Ş., Karaşin A., Depremde hasar gören kırsal yapılar için bir yapısal hasar değerlendirmesi., DUJE, 6, 1 (2015) 31–38.

[22] Berk M.G., Proposal for an Automated Form Finder System to Deduce the Authentic Morphology of Siirt Cas Houses, in: VR Technologies in Cultural Heritage, Springer, Brasov, Romania, 2018: pp. 20–32.

[23] Ozavcı D., Turkan Z., Structural Identities of Siirt Cas Houses in Anatolian Traditional Architecture. , Journal of King Saud University-Science, 102938. (2023).

[24] Tayla H., Geleneksel Türk mimarisinde yapı sistem ve elemanları. , Türkiye Anıt Çevre Turizm Değerlerini Koruma Vakfı (2007).

[25] Koday S., Koday Z., Kizilkan Y., Siirt İlinde Bir Mesken Kültürü: Cas Evleri, 2017.

[26] Naz B., Siirt Cas Evleri Mimari İncelemesi ve Bir Örnek Üzerinden Restorasyon Önerileri, EJONS International Journal of Mathematic, Engineering and Natural Sciences 4 (2020). https://doi.org/10.38063/ejons.331.

[27] Doğruyol M., Ayhan E., Karaşin A.,, 1st International Conference on Scientific and Academic Research Siirtin Taş Yapılı Cas Evlerinin Malzeme ve Yapısal Özellikleri, 2022. https://www.icsarconf.com/.

[28] Akın C.T., Bekleyen A., Yıldırım M., Preservation initiatives for the truncated pyramid-shaped traditional houses of Siirt, Turkey, Frontiers of Architectural Research 5 (2016) 360–370. https://doi.org/10.1016/j.foar.2016.06.005.

[29] ASTM C109/C109M-21, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens), 2021.

[30] BS EN 196-1, Methods of testing cement Determination of strength, 2016.

[31] Zebari Z, Bedirhanoğlu İ., Aydın E., Beton basınç dayanımının ultrasonik ses dalgası yayılma hızı ile tahmin edilmesi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi 8.1 (2016) 43-52.

[32] Koyutürk G., Alçı – Kireç – Puzolan Esaslı Harçlarda Bazı Atık Kireç Kaynaklarının Kullanılabilirliğinin İncelenmesi." Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi (2002).

TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI ANKARA ŞUBESİ
TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI DİYARBAKIR ŞUBESİ
ODEYA ENDAZYARÊN AVAHÎYÊ

SIMULATING THE IN-PLANE FAILURE MECHANISM OF UNREINFORCED MASONRY WALLS WITH TIMBER-BASED RETROFIT

Emma BABULA[1], Danielle MALOMO[2], Daniel CHUNG[3], Philip TIDWELL[4], Bora PULATSU[5]

[1]Undergraduate researCher, carleton university, emmababula@cmail.carleton.ca
[2]assistant professor, mcgill university, daniele.malomo@mcgill.ca
[3]associate professor, university of toronto, danielh.chung@daniels.utoronto.ca
[4]assistant professor, university of california - berkeley, philip.tidwell@berkeley.edu
[5]assistant professor, Carleton university, bora.pulatsu@carleton.ca

Abstract

This study investigates the behaviour of unreinforced masonry (URM) walls that are strengthened via a recently developed timber-based panel using advanced computational modelling strategy based on the discrete element method. The proposed computational modelling approach offers an explicit representation of the masonry unit, unit-mortar interface, timber panel and the masonry-timber connection. the validated modelling strategy is utilized to investigate the role of shear connection between urm wall and timber retrofit. The results underline the improved macro-response of composite masonry-timber system when considering strong and ductile shear connections preventing sudden capacity loss of urm walls failing due to diagonal tension failure.

Keywords: computational modelling, masonry walls, in-plane failure mechanism, timber retrofit.

1. Introduction

As witnessed in past and recent earthquakes, unreinforced masonry (URM) buildings are often vulnerable to out-of-plane (OOP) failure mechanisms, mostly stemming from lack of diaphragm action and poor interlocking or connection between the orthogonal walls [1, 2]. However, if the proper constraints ensure the box-like behaviour, in-plane (IP) failure mechanisms become more likely to develop in the URM walls. The IP failure mechanism of URM walls, categorized as sliding, diagonal tension failure and flexural/rocking, are primarily influenced by the aspect ratio of the walls (geometrical properties), size and location of the openings, pre-compression load (vertical stress) and mechanical properties of masonry constituents (material properties), boundary conditions, among other factors. While the mentioned failure modes of URM walls can develop independently, as shown in Figure 1, they frequently interact with each other under increased lateral displacement [3]. Each failure mechanism corresponds to different ductility limits and energy dissipation capacities. Typically, the diagonal tension failure is associated with the sudden force drop upon the URM wall reaching its lateral load-bearing capacity, and it indicates roughly half of the ultimate drift (lateral deformation divided by the wall height) of the flexural/rocking mechanism [4]existing criteria for estimating lateral strength and stiffness of stone masonry walls are reviewed and improvements proposed. The drift capacity of stone masonry walls is evaluated at six different limit states that characterise the response from the onset of cracking to the collapse of the wall. To provide input data for probabilistic assessments of stone masonry buildings, not only median values but also the corresponding coefficients of variation are determined. In addition, analytical expressions that estimate the ultimate drift capacity either as a function of masonry typology and failure mode or as a function of masonry typology, shear span and axial load ratio are proposed. The paper provides also estimates of the uncertainty related to the natural variability of stone masonry by analysing repeated tests and investigates the effect of mortar injections and the effect of the loading history (monotonic vs cyclic. Therefore, developing a solid understanding of the most likely IP failure mechanism of URM walls controlling the global stability of URM buildings plays a vital role in the structural assessment and implementation of the most effective retrofitting solution.

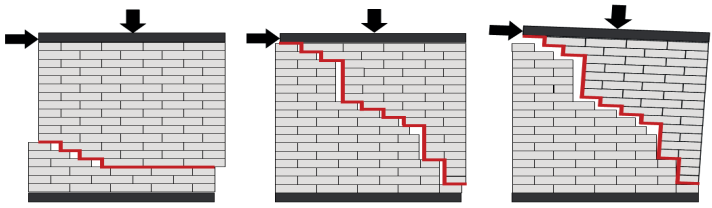


Figure 1. The in-plane failure mechanism of unreinforced masonry walls – sliding, diagonal tension failure and flexural/rocking (left to right).

With the increasing interest in sustainable and green retrofitting plans to improve the in- and out-of-plane seismic performance of URM buildings, the use of timber-based products has been proposed as a promising solution (e.g., [5, 6]retrofit, and seismic upgrading of historic masonry structures. Different rehabilitation techniques and some successful applications throughout the Balkans and Italy are described, with particular emphasis to the shear reinforcement of wall panels. The selected techniques aim at improving the seismic performance, preserving the structures for future generations, having the least impact in altering the architectural and heritage values, as well as being sustainable, in terms of reduced carbon dioxide emissions, reversibility, and low energy consumption. The use of cross-laminated timber (CLT). To this end, the present research explores the composite action of recently developed timber-based retrofitting intervention for masonry walls, comprising a structural layer made of plywood panels with cross-brace frames anchored to URM walls via advanced computational modelling. The proposed modelling strategy takes advantage of both continuum and discontinuum-based analysis adopted within the discrete element method (DEM) framework. The main goal is to develop a computational modelling framework that can accurately predict the effect of a recently developed low-cost timber-based rehabilitation strategy on the IP behaviour of URM walls. The results of this research highlight the potential applications of the adopted modelling strategy and shed light on the complex mechanical behaviour of the combined timber-masonry system.

3. Discontinuum-based analysis of composite masonry-timber system

In this study, the simplified micro-modelling approach is utilized based on the discrete element method (DEM) developed by Cundall [7]. The nonlinear behaviour of masonry is simulated via the system of linearly elastic discrete blocks that can interact along their boundaries [8, 9]. The adopted computational modelling strategy relies on solving Newton's equations of motion for discrete bodies via explicit finite-difference formulation. The mechanical interaction taking place between distinct blocks discretized into constant strain tetrahedral (CST) volumes (each consisting of four nodes – or gridpoints) are predicted at the contact points (also called sub-contacts), as shown in Figure 2. The numerical solutions of the governing differential equation (*i.e.*,) based on the central difference method provides nodal velocities of discrete blocks that can interact with its surroundings via action/reaction forces at the sub-contacts. Artificial damping scheme is utilized to obtain quasi-static solutions using Cundall's local damping formulation [10]. The predicted nodal velocities are utilized to compute nodal displacements that are further used to obtain block deformations and relative sub-contact displacements. At each sub-contact, three orthogonal springs (one in the normal and two in the shear direction relative to the contact plane) are defined (see Figure 2). Through this research, the soft-contact approach is utilized in which the inter-block penetration is allowed and governed by the normal () and shear () contact stiffness. Moreover, recently implemented elasto-softening contact constitutive laws are employed at the contact points to simulate interaction between adjacent blocks [11].

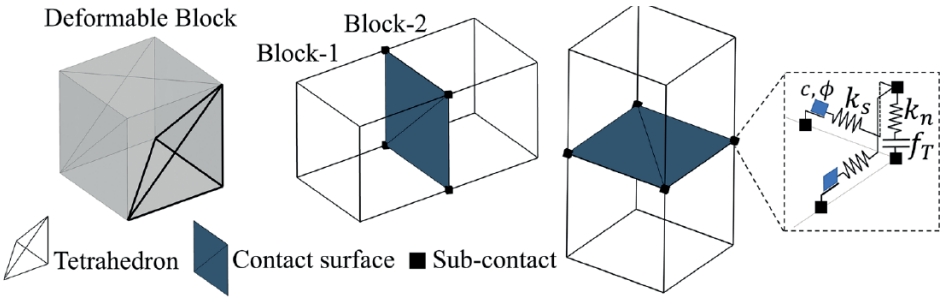


Figure 2. Illustration of the distinct elastic blocks and contact points (also denoted as sub-contact) [11].

The adopted nonlinear sub-contact stress-displacement relationships are shown in Figure 3. In the normal direction, tension and compression stresses at the sub-contacts are limited by the assigned tensile strength (f_T) and masonry composite compression strength (f_m), respectively (Figure 3a). Furthermore, the Coulomb-Slip Joint model is used in the shear direction (Figure 3b), which requires cohesion (c) and friction angle (ϕ) to calculate the shear strength (i.e., $\tau = c + \tan\phi\sigma$, σ: normal stress). It is important to note that the softening branch of the implemented elasto-softening behaviour in tension, shear and compression is controlled by the user-defined mode-I (G_f^I), mode-II (G_f^{II}) and compression (G_c) fracture energies, respectively. A linear stiffness degradation is considered for unloading and re-loading regimes in the normal directions, whereas no stiffness degradation is adopted for shear, which aligns with similar computational investigations and experimental studies presented in the literature [12, 13]. A detailed explanation of the adopted numerical modelling strategy and computational procedure of DEM can be found in the reference studies ([11, 14, 15]).

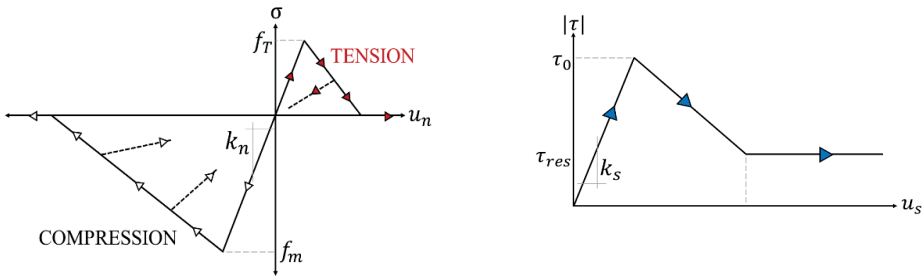


Figure 3. Elasto-softening contact constitutive laws: (a) normal direction, (b) shear direction.

It is worth noting that the proposed modelling strategy aims to capture masonry unit failure at the pre-defined potential contact surfaces (considered at the mid-length of the masonry unit). Therefore, two sets of mechanical properties are considered, i.e., one for the masonry unit potential crack surface and the other for unit-mortar interfaces (or denoted as bond), which can be depicted in Figure 4. Furthermore, steel anchors used to mount timber panels to the URM wall are simulated via one-dimensional truss elements (also called reinforcement) embedded into the discrete blocks, as shown in Figure 4b. In addition, an elasto-plastic spring parallel to a pre-defined discontinuity (e.g., the contact plane between the timber panel and URM wall) is

utilized to capture shear failure over some reinforcement length, considered approximately equal to reinforcement diameter. The interaction between reinforcement elements and their surrounding medium is considered through reinforcement nodes, which are linked with a particular tetrahedron (denoted as host zone), to calculate the axial displacement of the reinforcement. Moreover, a parallel cohesive bond is defined at each reinforcement node to simulate the bond-slip phenomenon [16].

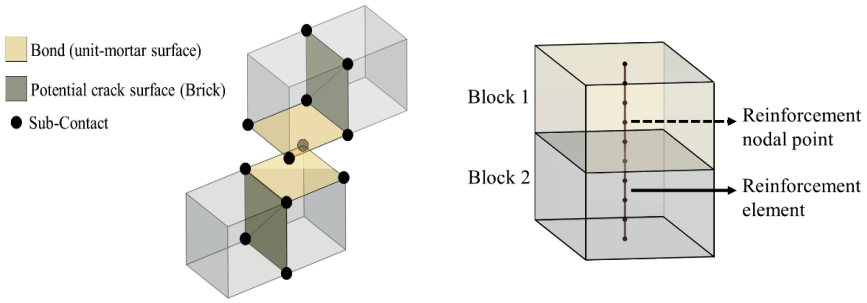
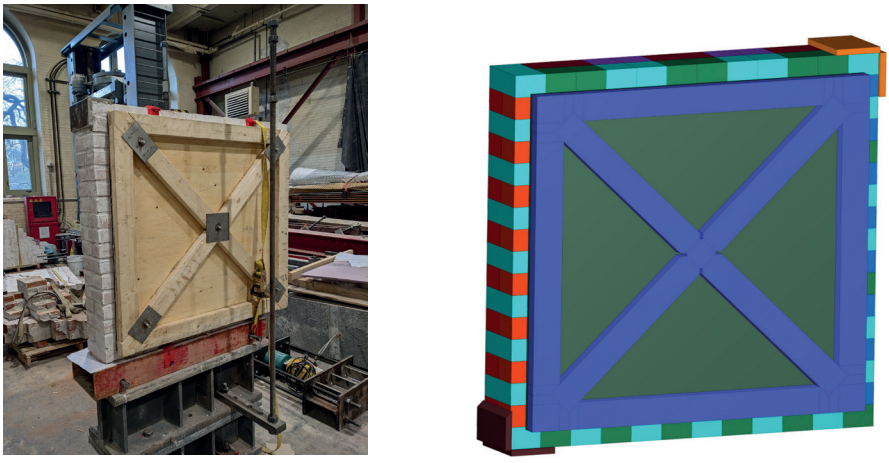


Figure 4. Illustration of the contact planes (a) within masonry unit blocks and intra-masonry unit block interaction surfaces, (b) reinforcement element embedded into two discrete blocks.

In summary, the composite nature of masonry brickwork is simulated using a simplified micro-modelling strategy, and the adopted timber-based retrofit solution is considered to use continuous deformable blocks connected to the generated discontinuous medium via structural elements. The possible shear failure at the connections between timber panel and masonry is considered by defining local shear springs parallel to discontinuities. It is worth noting that the proposed computational modelling strategy offers great potential for simulating the localized failure in masonry (such as sliding along the bed joints and cracking at the head joints) and addressing the connection failure between masonry constituents and the timber panel. Throughout this research, a commercial three-dimensional discrete element code, 3DEC developed by Itasca Consulting Group, is used during the analyses. In the following section, validation of the implemented modelling approach is presented.

3. Validation and Application of The Proposed Computational Modelling Strategy

The adopted computational modelling strategy is validated by comparing it against the recent experimental investigations performed on the small-scale URM walls (approximately 1.2 1.2 m^2) upgraded via a recently developed timber retrofit panel. The tested double whyte URM walls are built using clay bricks (each has dimensions of 195 mm in length, 90 mm in width and 65 mm in height) and standard type O mortar. The proposed modular timber retrofit panel is constructed using lumber (38 90 mm^2) and a plywood panel that is screwed and glued to form 1.2 1.2 m^2 modules. As shown in Figure 5a, diagonal members are connected at the center of the panel. There are five anchors used to mount the designed timber panel to an unreinforced masonry wall (see Figure 5a). The computational model, corresponding to the URM wall specimen with timber retrofit panel, is shown in Figure 5b.



(a) (b)

Figure 5. (a) Reference URM wall specimen, including timber retrofit panel and (b) the DEM-based computational model.

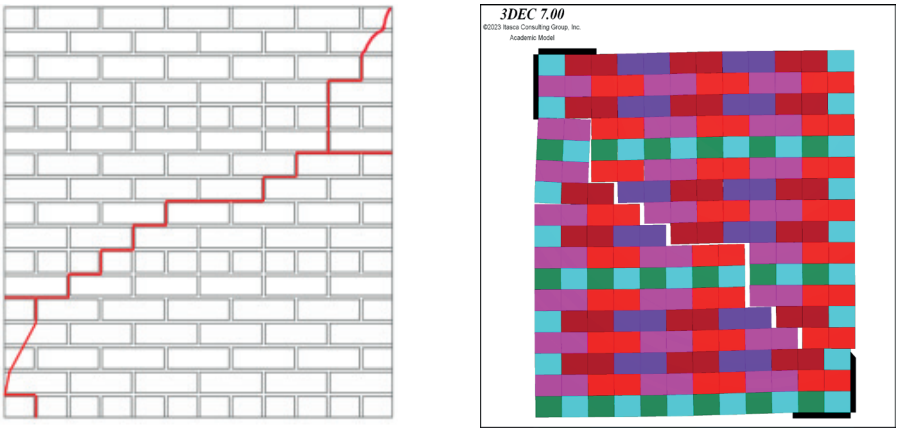
The effectiveness of the designed timber-based retrofit panel is tested following the ASTM E519-07 [17]. Accordingly, it is aimed to obtain the tensile strength of unreinforced and retrofitted small-scale URM walls. A detailed explanation of the experimental setup and testing program, together with the mechanical properties of the masonry constituents and composite, are provided in the reference study [18]. The input properties utilized in

the discontinuum-based computational model are presented in Table 1 and determined based on the available experimental findings. The brick elastic modulus is taken as 17 GPa, and contact stiffnesses are calibrated to match the reference stiffness obtained from the experiment.

Table 1. Mechanical properties defined at the contact points.

Brick tensile strength (MPa)	Bond tensile strength (MPa)	Initial and residual bond friction angle (degrees)	Compression strength of masonry (MPa)
3.6	0.4	37	17.5

The result of the unreinforced wall analysis is shown in Figure 6, where the failure mechanism obtained from the reference experimental study and computational model is presented. As depicted in Figure 6, the localized diagonal tension failure, captured from the discontinuum-based analysis, follows a similar failure mechanism where the cracks are predominantly concentrated at the mortar joints. Furthermore, a good agreement is found regarding the ultimate diagonal compression force and displacement (see Figure 7a). As mentioned earlier, diagonal tension failure yields an abrupt capacity loss in the brickwork assemblage observed both experimentally and numerically.

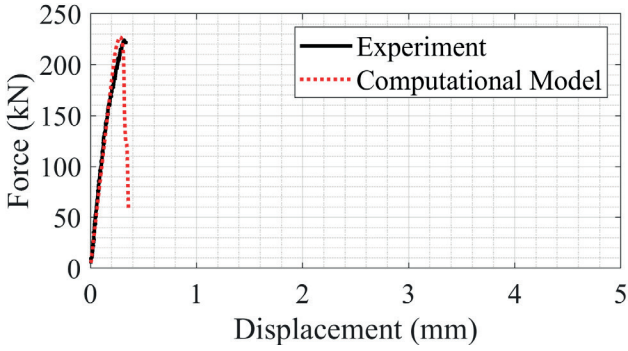


(a) (b)

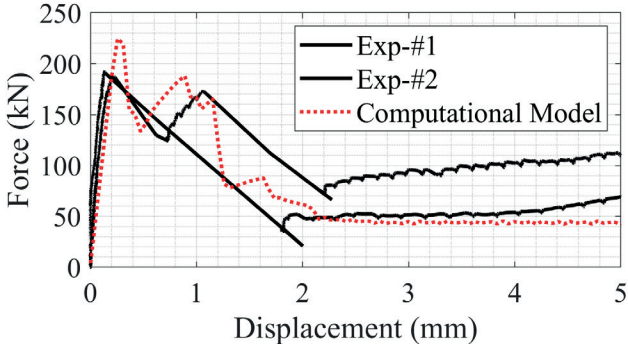
Figure 6. Comparison of the failure mechanism: (a) experiment (sketched via red-line) and (b) computational model.

Next, the same modelling strategy is utilized to simulate the composite action of the masonry-timber panel system. The primary interaction between masonry and timber retrofit is considered through the previously mentioned

reinforcement elements and local elasto-plastic shear springs at the discontinuities (also denoted as dowel springs) in the normal and shear directions, respectively. Note that the reinforcement elements are defined at the location matching the bolts used in the specimen. The bond stiffness and strength parameters of the reinforcement elements (parallel to the reinforcement element) are calibrated via pull-out test results, whereas shear reinforcement parameters are determined to best capture the overall mechanism observed during the experiment due to the absence of experimental results in the shear direction of the connection. It is also worth noting that the proposed retrofitting option is designed as a rather practical and general solution independently of the detailed consideration of most likely crack patterns in the analyzed URM walls. The results of the computational investigations are presented in Figure 7b and compared against two experimental force-displacement curves.



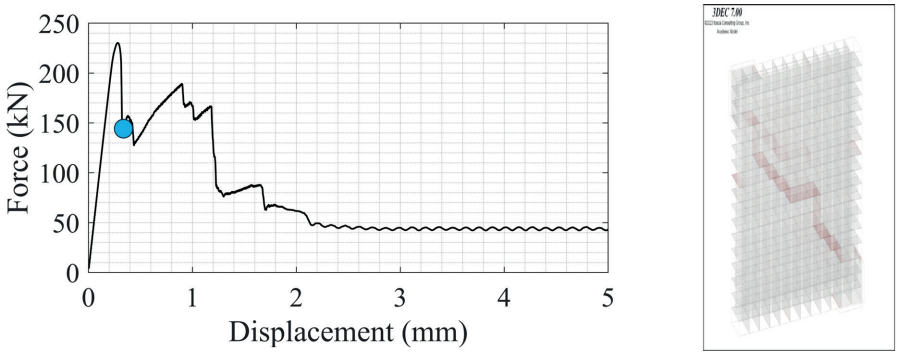
(a)



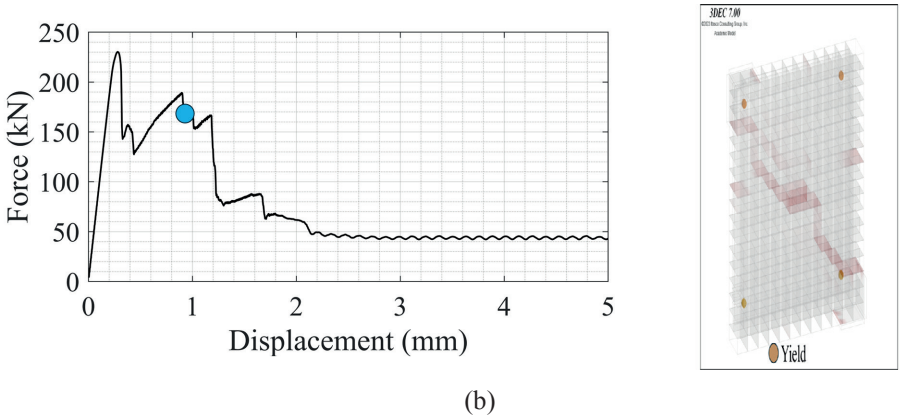
(b)

Figure 7. Comparison of experimental findings (diagonal compression test) againts computational models: (a) unreinforced masonry wall, (b) URM with timber retrofit.

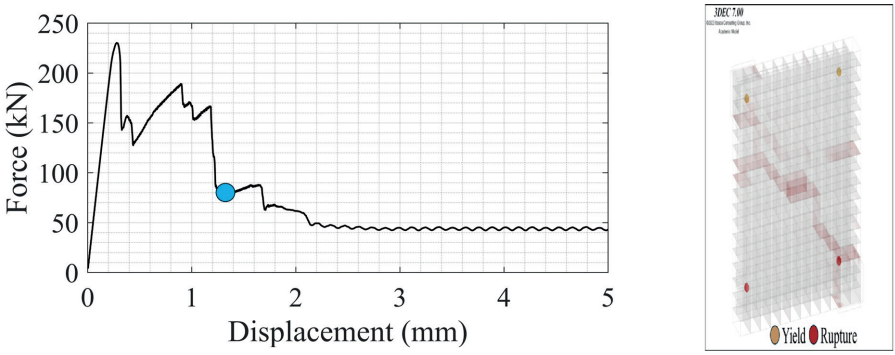
In line with the experimental results, the sudden force drop obtained from unreinforced masonry wall panels is moderately prevented by the adopted timber panel, which increased the displacement capacity of the composite system. To further explore the progressive failure mechanism, the damage state at the abrupt force changes is provided in Figure 8. It is evident that the initial force drop is associated with the diagonal tensile failure developing parallel to the applied compression force direction (Figure 8a). Then, the force-recovery occurs under the increased displacement, which is later restrained due to yielding failure in the shear direction at the connections between the masonry wall and timber panel. Note that the yield force limit for the dowel spring () is determined to capture second force-peak observed during the experiment, as shown in Figure 8b. Finally, a significant force drop is noted upon reaching the rupture strain assigned for the dowel spring () that can be seen in Figure 8c. Overall, the observed progressive damage mechanism in the computational model aligns well with the experimental findings. In Figure 8d, the final failure state, obtained from the reference experimental program, is presented, where the shear failure at the bolt can be observed. It is worth noting that the implemented connection within the DEM framework addresses only the basic mechanism occurring in the physical model. Hence, the rupture strain (adopted for the dowel spring in the numerical simulation) only refers to the bond slippage rather than the anchor (or bolt) fracture. To better understand the influence of input parameters assigned for the dowel spring, a parametric study is conducted on the necessary mechanical features of the shear reinforcement and the results are shared in the following section.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 8. Predicted damage progression (a-c) at the unit-mortar interfaces and connections obtained from the computational model (CM) under the increased diagonal compression displacement for the retrofitted URM wall – tension+shear failure at the contact planes are shown as red surfaces; (d) experimental result.

4. Parametric analysis on the input properties of the masonry-timber retrofIt connection

The proposed computational modelling approach offers combined usage of one-dimensional truss elements (essentially functional in their local axial direction) and shear (dowel) springs only defined at the discontinuities. When we consider the failure mechanism of the composite masonry-timber-panel system, the contribution of the adopted timber-based retrofit is governed by steel anchors, especially in the shear direction (perpendicular to the panel surface). In other words, the mechanical properties of the dowel spring utilized in the validated computational model are directly related to the overall efficiency of the proposed rehabilitation system. To this end, a parametric analysis is performed on the input parameters of the elasto-plastic dowel connection in order to shed light on its influence on the overall macro-response of the URM wall.

The results of the computational investigations are presented in Figure 9. First, the contribution of the dowel spring is noted by excluding and including its contribution in the numerical model. In the absence of dowel spring, the abrupt decrease in force is noted, which is similar to the unreinforced URM wall behaviour (see Figure 9a). This observation suggests the critical role of the shear connection between the URM wall and the timber panel. Next, the yield force capacity of the dowel is increased systematically to examine the influence of a stronger shear connection. As shown in Figure 9b, the second force peak, developing upon diagonal tension failure of the URM wall, is significantly affected by the yield strength of the shear (dowel) spring. Also, the failure of the retrofitted URM wall is delayed when stronger shear connections are used. Finally, higher strain limits for the dowel spring are considered. According to the results of the analyses, the more ductile response of the retrofitted masonry panel is noted for plastic strain limits larger than the reference value, given in Figure 9c. In general, the results highlight the better performance of the implemented timber-based system when considering the enhanced properties in shear connections between the masonry and timber panel, while the diagonal tensile strength of the URM wall still governs the initial force-drop.

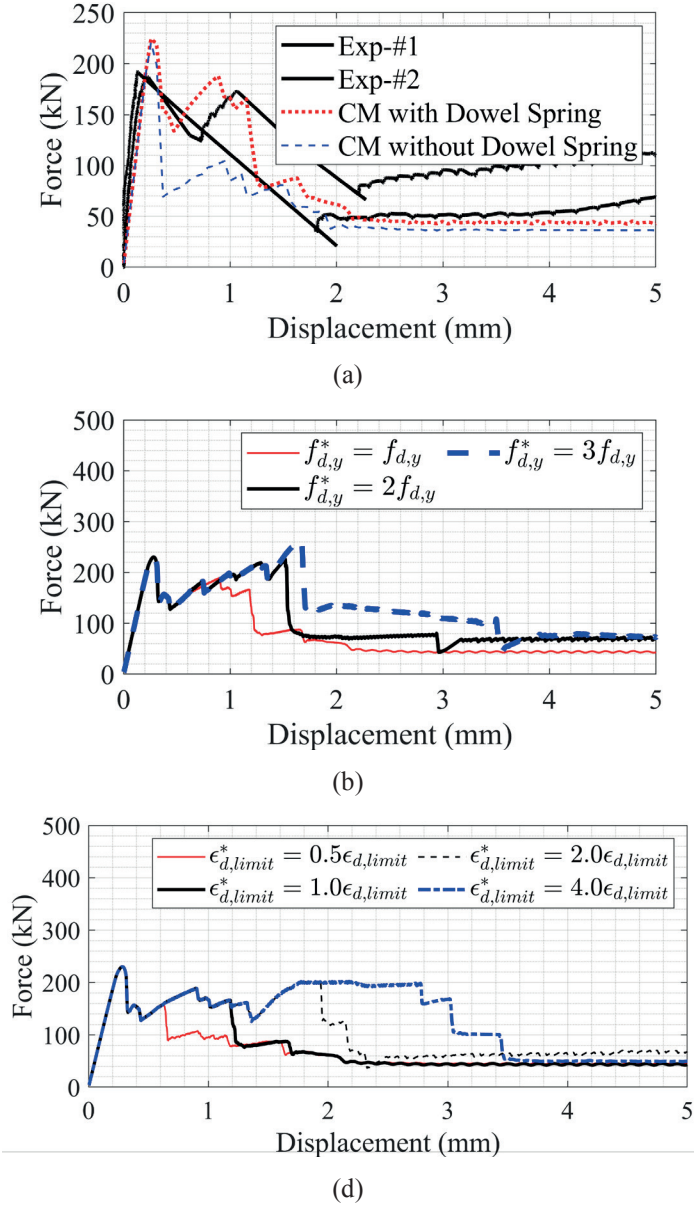


Figure 9. Results of the parametric analysis: (a) the contribution of dowel spring on the macro-behaviour of the masonry-timber system, (b)the effect of dowel yield strength and (c) the influence of dowel spring strain limit.

5. Conclusions

This research investigates the structural behaviour of the recently developed timber-based retrofitting solution for unreinforced masonry panels via an advanced computational modelling strategy based on the discrete element method. The proposed numerical modelling approach is validated against the experimental findings and further utilized to better understand the influence of shear connection between the masonry wall and timber panel. The results show that the adopted computational model captures the role of the retrofitting solution, which prevents the abrupt capacity loss of the URM wall due to diagonal tension failure while slightly affecting the load-carrying capacity. Furthermore, the computational investigations underline the positive influence of the stronger and ductile dowel connections on the macro-response of masonry walls with timber retrofit. Future studies will explore the influence of pre-stressing steel anchors that are used to mount timber panels and numerically test the designed timber panel on large-scale URM walls and pier-spandrel structures.

Acknowledgements

The “Digital twin-informed engineered timber retrofits for sustainable preservation, up-grading and reuse of existing housing supplies” project received Incubation Funding under the Housing Supply Challenge – Building for the Future Round. The views expressed herein are the personal views of the author, and CMHC accepts no responsibility for them.

References

1. Lourenço PB, Mendes N, Ramos LF, Oliveira D V. (2011) Analysis of masonry structures without box behavior. Int J Archit Herit 5:369–382. https://doi.org/10.1080/15583058.2010.528824

2. Vlachakis G, Vlachaki E, Lourenço PB (2020) Learning from failure : Damage and failure of masonry structures , after the 2017 Lesvos earthquake (Greece). Eng Fail Anal 117:104803. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104803

3. Pulatsu B, Tuncay K (2024) Computational Modeling of Damage Progression in Unreinforced Masonry Walls via DEM. Turkish J Civ Eng 35:. https://doi.org/10.18400/tjce.1323977

4. Vanin F, Zaganelli D, Penna A, Beyer K (2017) Estimates for the stiffness, strength and drift capacity of stone masonry walls based on 123 quasi-static cyclic tests reported in the literature. Bull Earthq Eng 15:5435–5479. https://doi.org/10.1007/s10518-017-0188-5

5. Corradi M, Mustafaraj E, Speranzini E (2023) Sustainability considerations in remediation, retrofit, and seismic upgrading of historic masonry structures. Environ. Sci. Pollut. Res. 30:25274–25286

6. Valluzzi MR, Saler E, Vignato A, et al (2021) Nested buildings: An innovative strategy for the integrated seismic and energy retrofit of existing masonry buildings with CLT panels. Sustain 13:1–19. https://doi.org/10.3390/su13031188

7. Cundall PA (1971) A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems. In: The International Symposium on Rock Mechanics. Nancy, pp 47–65

8. Lourenço PB, Rots JG (1997) Multisurface interface model for analysis of masonry structures. J Eng Mech 123:660–668

9. Lemos J V. (2007) Discrete element modeling of masonry structures. Int J Archit Herit 1:190–213. https://doi.org/10.1080/15583050601176868

10. Cundall PA, C. D (2017) Dynamic relaxation applied to continuum and discontinuum numerical models in geomechanics, 1st Editio. CRC Press, Boca Raton, FL

11. Pulatsu B (2023) Coupled elasto-softening contact models in DEM to predict the in-plane response of masonry walls. Comput Part Mech 10:1759–1770. https://doi.org/10.1007/s40571-023-00586-x

12. Lemos J V., Sarhosis V (2022) Discrete Element Bonded-Block Models for Detailed Analysis of Masonry. Infrastructures 7:31. https://doi.org/10.3390/infrastructures7030031

13. Lourenço PB, Ramos LF (2004) Characterization of Cyclic Behavior of Dry Masonry Joints. J Struct Eng 130:779–786. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2004)130:5(779)

14. Cundall PA (1988) Formulation of a Three-dimensional Disctinct Element Model - Part I. A Scheme to Detect and Represent Contacts in a System Composed of Many Polyhedral Blocks. Int J Rock Mech Min Sci Geomech 25:107–116

15. Hart R, Cundall PA, Lemos J V. (1988) Formulation of a three-dimensional distinct element model - Part II. Mechanical calculations for Motion and Interaction of a System Composed of Many Polyhedral Blocks. Int J Rock Mech Min Sci Geomech 25:117–125

16. Pulatsu B, Erdogmus E, Lourenço PB, et al (2021) Numerical modeling of the tension stiffening in reinforced concrete members via discontinuum models. Comput Part Mech 8:423–436. https://doi.org/10.1007/s40571-020-00342-5

17. ASTM (2010) E519 Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages

18. Malomo D, El-Assaly M, Liu J, et al (2024) A sustainable low-cost timber retrofit design for improving structural and energy performance of existing masonry buildings: preliminary results. In: Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference. Niagara Falls

TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI ANKARA ŞUBESİ
TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI DİYARBAKIR ŞUBESİ
ODEYA ENDAZYARÊN AVAHÎYÊ

DOĞAL ZEOLİT VE POLİPROPİLEN LİF KATKILI KİREÇ HARÇLARININ FİZİKO-MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Muhammet Ahmet Mecit IŞIK[1], Gamze ÜÇDEMİR[2], Oğuzhan UĞURLU[3] Gökhan KAPLAN[4], Abdulkadir Cüneyt AYDIN[5]

[1]Lisansüstü öğrencisi, Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
m.ahmetmecit@gmail.com
[2]Arş. Gör., Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
gamzeucdemir@atauni.edu.tr
[3]Arş. Gör., Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
oguzhan.ugurlu@atauni.edu.tr
[4]Doç. Dr., Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
gkaplan@atauni.edu.tr
[5]Prof. Dr., Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
acaydin@atauni.edu.tr

Özet

Bu çalışma, tarihi yapıların restorasyonunda kullanılan kireç harçlarının doğal zeolit (DZ) ve polipropilen lif (PL) katkılarıyla mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesini amaçlamaktadır. Tarihi yapılarda uzun yıllardır kullanılan kireç harçlarının dayanıklılığını artırmak için modern restorasyon teknikleriyle birleştirilen bu malzemeler, özellikle dayanım ve geçirgenlik performansları açısından incelenmiştir. Çalışmada, çeşitli oranlarda DZ ve PL eklenerek hazırlanan kireç harçlarının basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su emme oranı ve görünür porozite gibi özellikleri test edilmiştir. Sonuçlar, DZ oranının artmasıyla birlikte kireç harçlarının mekanik dayanımının arttığını ve geçirgenliğinin azaldığını göstermektedir. PL katkısı ise harçların eğilme dayanımını belirgin şekilde artırarak, çatlak oluşumunu

azaltmıştır. Özellikle %20 DZ ve %1 PL oranlarıyla hazırlanan karışımlar, en iyi performansı sergileyerek restorasyon amaçlı kullanıma uygun olduğunu kanıtlamıştır. Bu bulgular, doğal zeolit ve polipropilen lif katkılı kireç harçlarının tarihi yapıların onarımı ve korunmasında önemli bir alternatif malzeme sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Sözcükler: Kireç, Doğal zeolit, Onarım, Tarihi Yapılar, Restorasyon Harcı

Abstract

This study aims to improve the mechanical and physical properties of lime mortars used in the restoration of historical buildings with natural zeolite (DZ) and polypropylene fiber (PL) additives. These materials, combined with modern restoration techniques to increase the durability of lime mortars used in historical buildings for many years, were investigated, especially regarding strength and permeability performances. The study tested the compressive strength, flexural strength, water absorption rate and apparent porosity of lime mortars prepared by adding various ratios of DZ and PL. The results show that the mechanical strength of lime mortars increases, and permeability decreases with increasing DZ content. PL admixture significantly increased the flexural strength of the mortars and reduced crack formation. Especially the mixtures prepared with 20% DZ and 1% PL exhibited the best performance and proved to be suitable for restoration purposes. These findings suggest the historic zeolite and polypropylene fiber reinforced lime mortars offer an important alternative material for the repair and conservation of historic buildings.

Keywords: Lime, Natural zeolite, Restoration, Historic Buildings, Restoration Mortar

1. Giriş

Kültür, toplumsal hayatın bir ürünü olarak kuşaktan kuşağa aktarılan ve sürekli evrilen bir olgudur. Aynı zamanda, bir topluluğun kimliğini ve aidiyetini tanımlayan, insanları bir arada tutan önemli bir unsurdur. Kültürel miras ise, toplumların en değerli zenginliklerinden biridir [1]. Taşınmaz kültürel eser mimarisi, çok zengin tarihi ve kültürel bilgiler içeren, bir ülkenin ve milli medeniyetin ürünü ve simgesi olup, bir milletin tarihinin somut bir temsilidir [2]. Kültürel miras yerel kimliğin ayrılmaz bir parçası olmasının yanı sıra turistik öneme de sahiptir [3]. Kültürel bir miras olan tarihi yapı ise eski uygarlıklardan kalıp günümüze ulaşan, geldiği toplumla ilgili önemli bilgiler içeren, geçmişteki önemli olaylara tanıklık etmiş her türlü yapıya denir [4]. Bu bağlamda milli ve tarihi değerlerin korunmasının yanı sıra kültürün nesiller boyunca aktarılmasını sağlamak için tarihi yapıların korunması büyük bir önem taşımaktadır. Bu da son yıllarda tarihi yapıların restorasyon uygulamasına ve teorisine karşı ilginin artmasını sağlamıştır. Özellikle antik restorasyon çalışmaları, ekonomiyi, toplumu ve ideolojiyi araştırmak için yeni bakış açıları sunarken aynı zamanda bilim adamlarının antik mimariye ilişkin pratik ve teorik bilgileri yeniden yapılandırmasına da olanak tanır [5].

Tarihi yapıların geleneksel malzemeler kullanılarak inşa edilmesi, bu malzemelerin doğal yapılarından ötürü çevresel koşullardan etkilenmesine yol açmaktadır. Tarihi yapıların restorasyonunda kullanılan harçlar geçmişten günümüze en çok kullanılan yapı malzemesi olmuştur. Tarihi yapılarda kullanılan harçlar, içerisinde bulunan bağlayıcı malzemeye veya kullanım yerine göre isimlendirilir. İnsanlık tarihi boyunca kullanılan en eski yapı malzemsi kerpiçtir. Bunun dışında kireç harçları, alçı harçları, kireç ve puzolanlı harçlar, kil bağlayıcılı harçlar gibi birçok çeşit saymak mümkündür [6]. Ancak tarih boyunca yapı malzemesi olarak kullanılan harçların büyük kısmı kireç ve puzolan adı verilen doğal volkanik silis tozunun birleşimine dayanmaktadır [7]. Puzolanın kireçle reaksiyona girmesi, sıvalara daha yüksek dayanıklılık kazandıran hidratlı kalsiyum silikatları oluşturur. Böylece hidrolik ve mekanik özellikleri ve dayanıklılıkları, yapısal amaçlı kullanımları ve mimariye getirdikleri yenilikler nedeniyle tarihin önemli malzemelerindendir. Bu malzemelerin çevreye karşı daha dayanıklı olması nedeniyle, bazı orijinal sıvalar veya sıva parçaları günümüze kadar korunmuştur. Doğal puzolan görevi gören volkanik kül, tüf ve kırılmış volkanik kaya gibi volkanik malzemeler, antik Roma topraklarında geniş ölçüde bulunabilmeleri nedeniyle kaba agrega veya toz halinde geniş çapta kullanılan ilk puzolanik malzemelerdir [8]. Roma dönemine kadar genellikle dekoratif amaçlı kul-

lanılan kireç harçlarının özelliklerindeki gelişmeler kompakt, dayanıklı ve sağlam yapı malzemelerinin üretilmesini sağlamış ve mimaride önemli yeniliklerin önünü açmıştır [9]. Kireçle ilgili yapılan çalışmalarda; Stefanidou [10] Yunanistan'dan iki doğal puzolanın mineralojik, kimyasal, morfolojik ve fiziksel özelliklerini incelemek amacıyla sistematik olarak analiz etmiş ve puzolanları tamir harcı üretiminde kireçle birlikte kullanmıştır. Bu harçların mekanik ve fiziksel özellikleri de incelenmiştir. Sonuç olarak test edilen puzolanların yüksek kalite ve reaktiviteye sahip malzemeler olduğu ve tarihi binaların restorasyonu için uyumlu onarım harçlarının üretiminde kullanılabileceği gösterilmiştir. Ayrıca, Paiva [11] tarafından yapılan çalışmada ise hava kireci, hava kireci ve çimento, hava kireci ve hidrolik kireç, hava kireci ve puzolanlar ve hava kireci ve diğer katkılardan oluşan harç karışımlarını incelemiştir. Sonuç olarak hava kirecinin puzolanlarla kullanıldığında mekanik özelliklerin önemli derecede iyileştiğini belirlemiştir. Villca vd. [12] tarafından yapılan çalışmada puzolan ve buna benzer kimyasal bileşime sahip malzemeler ile kireç/puzolan/geopolimer karışımlarının mekanik ve mikro yapısı analiz edilmiştir. Geopolimerik reaksiyon ürünlerinin oluşturulmasıyla kireç-puzolan karışımında basınç dayanımı gelişimi açısından oldukça olumlu olduğu gösterilmiştir. Malathy vd. [13] tarafından kireç bazlı bağlayıcıların inşaat ve restorasyon uygulamalarında sürdürülebilirliğin artırılması amacıyla düşük karbon emisyonuna sahip kirecin, puzolanlarla birlikte kullanılmasıyla hidratasyon ürünlerinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca kireç-puzolan bağlayıcıların yapısal olmayan bölümlerde çimento kullanımını azaltmak için harç ve sıva olarak etkili bir şekilde kullanılabileceği belirtilmiştir.

Genel olarak harçların gevrek bir davranış sergilemesi tekrarlanan darbelere dayanmasını zorlaştırır. Harçlarının enerji emme kapasitesini arttırmaya yönelik geliştirilen çözümlerden biri karışıma lif eklenmesidir [14]. Geleneksel harçlarda doğal liflerin kullanılması yaygın bir tekniktir. Antik Yunanistanda'da boyutsal kararlılığı arttırmak için özellikle ahşap ve saman lifleri kullanılmıştır. Hint-İslam mimarisinde aderansı güçlendirmek ve çatlakları azaltmak için jüt ve saman kullanılmıştır. Bunların yanı sıra at kılı, koyun yünü gibi hayvansal lifler de harçlarda kullanılmaktadır. Lifler genellikle plastik ve kuruma büzülmesinden kaynaklanan çatlamayı kontrol etmek, çekme dayanımını, tokluğu ve dayanıklılığı arttırmak için kullanılır. İşlevleri geometrilerine (uzunluk, çap ve şekil), kullanım oranlarına, bağlayıcı ile etkileşimlerine ve karışım içindeki yönelim ve dağılımlarına bağlıdır. Za-

manla teknolojinin gelişmesiyle birlikte doğal liflerin yerini polipropilen, çelik, cami bazalt ve karbon lifler gibi modern malzemeler almıştır [15]. Lif kullanılarak hazırlanan harç karışımlarına dair literatür çalışmalarına bakılacak olursa Pederneiras vd. [14] tarafından yapılan çalışmada yün lifi, hindistancevizi lifi, keten lifi ve tekstil-akrilik lifi olmak üzere dört lif atığı içeren çimento esaslı ve çimento-kireç harçlarının yaşlanma öncesi ve sonrası darbe direnci değerlendirilmiş, lifli harçların az miktardaki yük altında şekil değiştirebildiği belirtilmiştir. Bunun yanı sıra lifli çimento-kireç harçlarının çatlak genişliklerinde değil, darbe dayanımında artış gözlenmiştir. Ayrıca çimento esaslı harçlara hindistan cevizi liflerinin, çimento-kireç harçlarında ise keten lifinin eklenmesiyle daha iyi mekanik özellikler gözlenmiştir. Sonuç olarak yüksek miktarda lif ekleyerek harçların çatlama duyarlılığı ve darbe direnci açısından performansını artırmak için geri dönüştürülmüş elyaf kullanımının mümkün olduğu gösterilmiştir. Kesikidou ve Stefanidou [15] tarafından yapılan çalışmada ise aynı uzunluktaki doğal lifler olan jüt, hindistancevizi ve yosunun çimento ve kireç harçlarındaki davranışı incelenmiştir. Lif türüne bakılmaksızın harçtaki kullanım oranına göre, lifli harçların eğilme dayanımında ve kırılma enerjisinde artış olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, doğal liflerin dayanım, dayanıklılık, ekonomik ve çevresel konulardaki faydaları vurgulanmıştır. Fantilli vd. [16] tarafından yapılan çalışmada harçlarda bitkisel lif olan kenevir ile hayvansal lif olan koyunyününün kullanımının çimentolu harcın performansına olan katkısı karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda çimentolu harçlara işlenmiş veya işlenmemiş yün eklendiğinde hem eğilme dayanımında hem de süneklikte artış sağladığı, ayrıca kenevire benzer şekilde kullanılan koyun yününün harçların mekanik ve ekolojik performansını artırdığı açıklanmıştır. Demircan vd. [17] tarafından yapılan çalışmada at kılı, polipropilen, karbon, bazalt ve cam elyafı ilavesinin doğal hidrolik kireç bazlı harçların fiziko-mekanik dayanıklılığı ve mikro yapı özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda at kılı kullanılarak hazırlanan harç karışımın en yüksek kuru yoğunluğa ve en düşük su emme yüzdesine sahip olduğu diğer yandan sentetik liflerin kullanımıyla kuru yoğunluğun azalıp su emme yüzdesinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca 7 ve 28 günlük basınç dayanımının en yüksek polipropilen lifli harçlarda görüldüğü, at kılı lifli harçlarda ise 7 günlük dayanımın polipropilen liflerden daha düşük olduğu 28 günlük dayanımın ise benzer olduğu gösterilmiştir.

Tarihi yapıların onarımı için kireç harçlarının genel olarak çimento esaslı harçlara göre daha uygun olduğu düşünülmektedir. Ancak kireç harçları, hidrolik özelliklerden yoksun olmaları nedeniyle nemli ortamda kullanıma uygun değildir. Bu nedenle restorasyon amaçlı olarak hidrolik özellikli harçların kullanımı sıklıkla tercih edilmektedir. Hava kirecine puzolan ilavesi, harçların hidrolik özelliklerini, suya dayanıklılık ve mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Doğal zeolitler, puzolanik yapısı ve özellikleri ile günümüzde sıklıkla araştırma konusu olan bir malzemedir. Zeolitlerin harçlarda kullanımıyla artan kür süresine bağlı olarak karbonatlaşmasının artması ve böylece zamana bağlı artan hidratasyon ürünleri basınç dayanımını önemli ölçüde artırmaktadır [18].

Bu çalışmanın amacı, kireç harçlarının doğal zeolit (DZ) ve polipropilen lif (PL) katkılarıyla fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirerek tarihi yapıların restorasyonu için uygun bir malzeme üretmektir. Kireç harçları, antik dönemlerden beri kullanılan önemli yapı malzemelerindendir ve günümüzde özellikle tarihi yapıların onarımında tercih edilmektedir. Bununla birlikte, kirecin hidrolik özelliklerinin yetersiz olması, nemli ortamlarda dayanıklılığını azaltmaktadır. Bu sorunları aşmak için kirece doğal zeolit (puzolanik aktivite için) ve polipropilen lif eklenerek, hem dayanıklılığının artırılması hem de mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışma, modern restorasyon yöntemleriyle geleneksel malzeme kullanımını birleştirerek tarihi yapıların korunması ve güçlendirilmesi konusunda yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Ayrıca, tarihi yapıların onarımında kullanılan kireç harçlarına yönelik geliştirilmiş bir karışım da önermektedir.

2. Malzeme ve Yöntem

2.1. Malzemeler

Karışımların hazırlanmasında kullanılan doğal zeolite (DZ) ve sönmüş kirecin XRF (X-Işını Floresans) yöntemiyle belirlenen kimyasal özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur. Kirecin özgül ağırlığı 2.62, DZ'nin ise 2.42'dir. Sönmüş kireç TS EN 459-1 standardına uygun CL 70S sınıfına girmektedir. Polipropilen lifin (PL) teknik özellikleri ise Tablo 2'de sunulmuştur. Tablo 2'de yer alan teknik özellikler üretici firmadan elde edilmiştir.

Tablo 1- DZ ve sönmüş kirecin kimyasal özellikleri

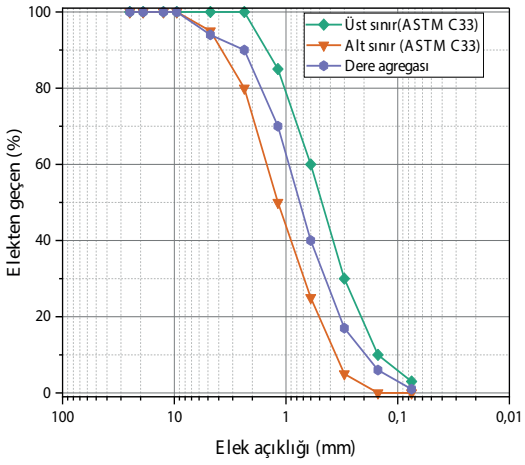
Oksit (%)	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	KK*
DZ	2.7	69.1	14.3	0.9	1.4	0.6	2.1	2.5	5.9
Sönmüş kireç	72.2	1.6	0.4	0.3	1.3	0.2	0.3	0.4	23.1

*Kızdırma kaybı

Tablo 2- PL'nin teknik özellikleri

Özgü ağırlık	Uzunluk (mm)	Çap (µm)	Çekme dayanımı (MPa)	Erime noktası (°C)	Elastisite modulü (GPa)	Kopma uzaması (%)
0.91	6	18	450	160	4	20

Karışımların hazırlanmasında kullanılan dere agregasının maksimum tane boyutu 4 mm'dir. Özgül ağırlığı 2.61, 24 saat sonundaki su emmesi ise %1.5'dir. Dere agregasının ASTM C33 standardına göre tane dağılımı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1- Agrega elek analiz grafiği

2.2. Numunelerin hazırlanması ve kürü

Karışımlarda DZ kireç yerine %10 ve 20 oranında (ağırlıkça) kullanılmıştır. PL ise hacimce karışıma %1 ve 2 oranında eklenmiştir. Karışım oranları ve malzeme miktarları *Tablo 3'*de verilmiştir. Tüm karışımlarda toplam bağlayıcı miktarı (Kireç+DZ) 500 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Ön deneyler sonucunda optimum işlenebilirlik için su/bağlayıcı (s/b) oranı 0.60 olarak belirlenmiştir.

Tablo 3- Karışım oran ve miktarları

Karışım oranları	Karışım oranları (%)		Malzeme miktarları (kg/m^3)				
	DZ	PL*	Kireç	DZ	Su	Dere Agrega	PL
Z0P0	0	0	500,0	0,0	300,0	1287,5	0,0
Z0P1		1	500,0	0,0	300,0	1261,5	9,1
Z0P2		2	500,0	0,0	300,0	1235,5	18,2
Z10P0	10	0	450,0	50,0	300,0	1282,4	0,0
Z10P1		1	450,0	50,0	300,0	1256,4	9,1
Z10P2		2	450,0	50,0	300,0	1230,4	18,2
Z20P0	20	0	400,0	100,0	300,0	1277,3	0,0
Z20P1		1	400,0	100,0	300,0	1251,3	9,1
Z20P2		2	400,0	100,0	300,0	1225,3	18,2

*Hacimce

Numuneler kalıba yerleştirildikten sonra 24 saat laboratuvar koşullarında saklanmıştır. Kalıplarından sökülen numuneler deney gününe kadar 25±2 ^{o}C ve %60 bağıl neme sahip kür odasında saklanmıştır.

2.3. Test yöntemleri

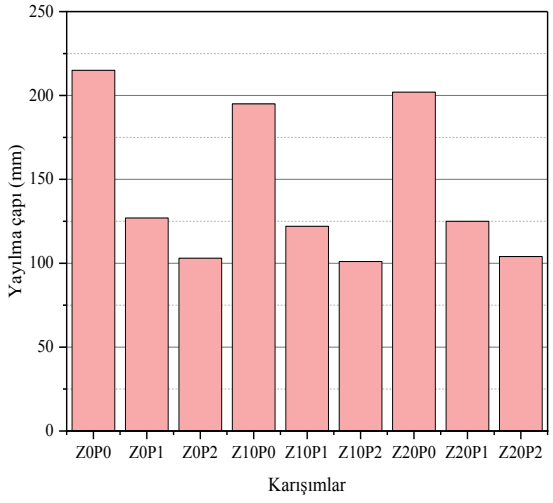
Karışımların taze hal özellikleri yayılma tablası yardımıyla ASTM C1437 standardına göre belirlenmiştir. Görünür porozite, su emme ve etüv kurusu yoğunluk gibi fiziksel özellikler ise ASTM C642 standardına göre tespit edilmiştir. Fiziksel özellikler 28 günlük kür sürecinden sonra 50x50x50 mm küp numunelerde ölçülmüştür. Kireç harçlarında ilk olarak 40x40x160 mm numunelerde ASTMC 348 standardına göre eğilme dayanımı gerçekleştirilmiş, daha sonra sonrasında kırılan numunelerde (Eğilme dayanımı testi sonrasında) ASTM C349 standardına göre basınç dayanımı belirlenmiştir. Harçların geçirimlilik özelliklerinin belirlenmesi için TS EN 1015-18 standardına uygun olarak kapiler su emme davranışları ölçülmüştür. Bu kapsam-

da 50x50x50 mm numuneler üretilmiş ve 28 günlük kür sürecinden sonra kapiler su emme davranışları ölçülmüştür.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1.Taze harç özellikleri

Harç karışımlarında farklı oranlarda kullanılan DZ ve PL'nin yayılma üzerindeki etkileri Şekil 2'de gösterilmiştir. Kirecin ağırlıkça %10'u yerine DZ kullanılmasıyla yayılma çapında yaklaşık %9,3 oranında azalma gözlenirken ağırlıkça %20 DZ kullanıldığında %6'lık azalma gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre DZ miktarının artışına bağlı olarak taze harcın işlenebilirliğinin azalmakta olduğu ve taze harç özelliklerinin bu durumdan olumsuz etkilendiği söylenebilir (Şekil 3).



Şekil 2- DZ ve PL oranının harç karışımı yayılma çapı üzerindeki etkisi



(a) (b) (c)

Şekil 3- Farklı DZ oranına sahip kireç harç karışımlarının taze hal özellikleri (a) Ağırlıkça %0 DZ olan harç karışımı, (b) Ağırlıkça %10 DZ olan harç karışımı, (c) Ağırlıkça %20 DZ olan harç karışımı

Harç karışımlarında hacimce farklı yüzdelerde kullanılan PL'nin yayılma çapı üzerindeki etkisine bakmak için *Şekil 2* incelendiğinde hacimce %1 oranında PL kullanılmasıyla kireç harcının yayılma çapı yaklaşık %41 azalırken %2 oranında PL kullanılmasıyla %52 azalma olduğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde karışımda kullanılan PL oranının artması taze harcın hal özellikleri üzerinde olumsuz etki oluşturarak işlenebilirliğinin azalmasına sebep olmuştur (*Şekil 4*). Karışımların yayılma çapı üzerinde DZ ve PL'nin etkisine bakılacak olursa PL kullanılmasıyla yayılma çapındaki azalmanın DZ'den kaynaklı oluşan azalmadan oldukça büyük olduğu görülmektedir. Bu da PL'nin taze hal özellikleri üzerinde daha olumsuz etkiye sebep olduğunu göstermektedir.



(a) (b) (c)

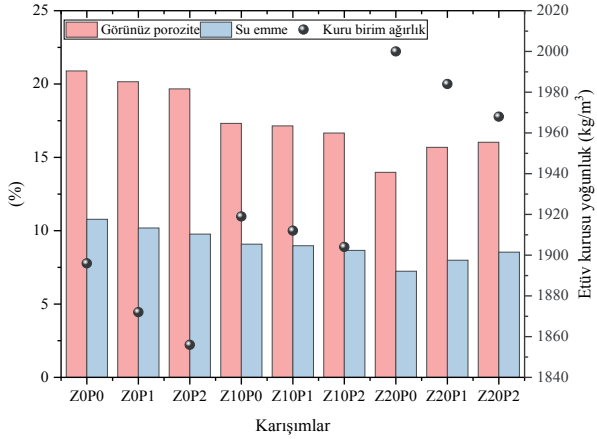
Şekil 4- Farklı PLoranına sahip kireç harç karışımlarının taze hal özellikleri; (a) Hacimce %0 PLolan harç karışımı, (b) Hacimce %1 DZ olan harç karışımı, (c) Hacimce %2 DZ olan harç karışım

3.2. Fiziksel özellikler

Harç karışımlarının fiziksel özelliklerine ait bilgilerin bulunduğu Şekil 5 incelendiğinde DZ oranının veya PL oranının artışına bağlı olarak karışımdaki mikro boşlukların daha iyi doldurulduğu ve dolayısıyla görünür porozitenin azaldığı söylenebilir. Ancak %20 DZ kullanılan karışımlarda PL artışına bağlı olarak görünür porozitede artış söz konusudur. Bu durum işlenebilirliğin oldukça azalması sonucu harcın kalıplara yerleştirilmesinde meydana gelen boşluktan kaynaklanıyor olabilir. En fazla porozite değeri DZ ve PL'nin kullanılmadığı karışıma aittir ve değeri %20,9'dur. En düşük porozite ise %13,9'luk oranla %20 DZ'nin kullanıldığı, PL'nin kullanılmadığı karışıma aittir.

Karışımların su emme oranları incelendiğinde porozitede olduğu gibi DZ veya PL oranı arttıkça genellikle su emme oranı azalmaktadır. Ancak %20 kullanılmasıyla beraber artan PL oranıyla su emme oranı dolayısıyla boşluk miktarı artmaktadır. Su emme miktarı en fazla %10,8'lik oranla DZ ve PL kullanılmayan karışıma aittir. Su emme miktarı en düşük olan karışım ise %7,2 değerine sahip, %20 DZ ve %0 PL olan karışıma aittir.

Etüv kurusu yoğunluklarına bakıldığında DZ oranının artmasıyla beraber kuru birim ağırlık artmaktadır. Bu da karışımın daha az boşluklu ve yoğun olduğunu göstermektedir. Porozitedeki azalış da bu durumu desteklemektedir. Ancak tam aksine PL oranı arttıkça kuru birim ağırlığının azaldığı söylenebilir. Çünkü PL'nin özgül ağırlığının düşük olması dolayısıyla hacim artışına bağlı olarak karışımın kuru ağırlığı da azalmaktadır. En fazla kurum birim ağırlık %20 DZ ve %0 PL olan karışıma ait olup değeri 2000 kg/m^3'tür. En az ise %0 DZ ve %2 PL olan karışıma ait olup değeri 1856 kg/m^3'tür.

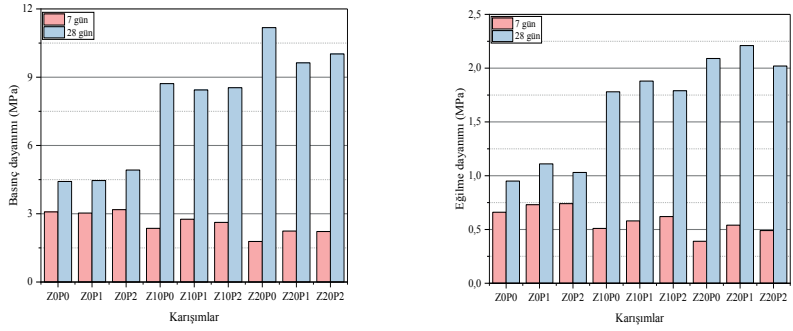


Şekil 5- Harç karışımlarının fiziksel özellikleri

3.3. Mekanik Özellikler

Farklı DZ ve PL oranlarında hazırlandıktan sonra 25±2 °C ve %60 bağıl neme sahip kür odasında saklanan harç karışımları 7 ve 28 gün sonunda deneye tabi tutulmuş ve mekanik özelliklere ait elde edilen veriler Şekil ***6***'daki grafikte sunulmuştur. Grafik incelendiğinde DZ oranı arttıkça 7 günlük basınç ve eğilme dayanımında azalma olmaktadır ancak 28 günlük dayanımlara bakıldığında DZ oranı arttıkça basınç ve eğilme dayanımının arttığı gözlenmiştir. Zeolitin erken dayanıma etkisi düşüktür ancak yüksek Si/Al oranına sahip olmasından ötürü $Ca(OH)_2$ ile daha hızlı reaksiyona girmesi zamanla daha yüksek dayanıma ulaşmasını sağlamaktadır [19], [20]. Pl'nin, karışımın mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelendiğinde 7 günlük dayanımlara bakılarak artan PL oranının basınç dayanımına olumlu etkisi söz konusudur. 28 günlük dayanıma bakıldığında DZ'nin kullanılmadığı karışımlarda PL oranının basınç dayanımına olumlu etkisi olduğu ancak DZ kullanıldığı karışımlarda artan PL oranıyla beraber dayanımda artış olmadığı tespit edilmiştir. En yüksek 7 günlük basınç d ayanımı 3,2 MPa değerine sahip, bağlayıcı olarak sadece kirecin kullanıldığı ve hacimce %2 PL kullanılan karışımdır. 28 günlük basınç dayanımı en fazla olan karışım ise kireç yerine %20 DZ ikame edilen ve PL kullanılmayan karışımdır ve değeri 11,2 MPa'dır. Ayrıca her karışım için en yüksek eğilme dayanımı değerinin %1 PL oranına sahip olan karışım ait olduğu görülmektedir [21], [22], [23], [24] . Ancak %2 PL oranına sahip karışımlarda eğilme dayanımı değerlerinde

düşüş gözlenmektedir [24]. %2 PL olan karışımda yoğunluk arttığından karışımın yeterli homojenlikte hazırlanamaması eğilme dayanımındaki düşüşe sebep olarak gösterilebilir. Buradan eğilme dayanımı açısından optimum PL oranının %1 olduğu söylenebilir.

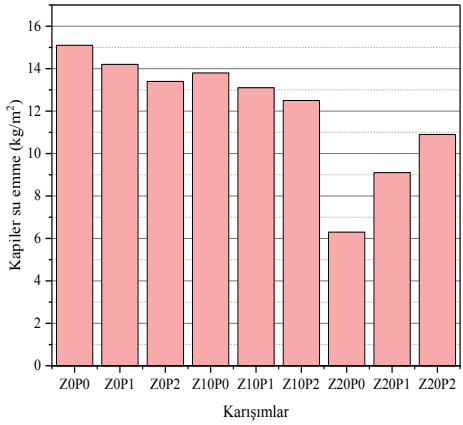


(a) (b)

Şekil 6- Hazırlanan harç karışımlarının 7 ve 28 gün sonunda elde edilen mekanik özellikleri; (a) basınç dayanımı, (b) eğilme dayanımı

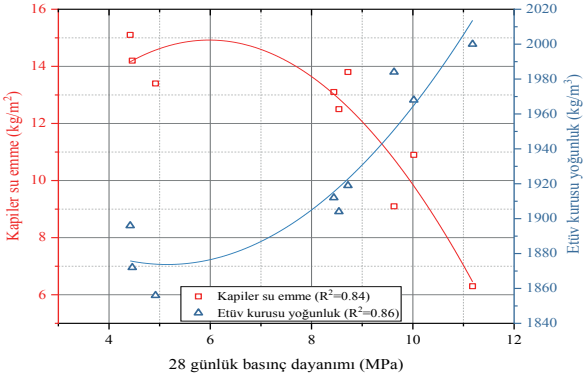
3.4. Kapilarite

Genellikle yağmur gibi çevresel olaylara maruz kalabilecek veya ıslak ortamda olabilecek harçlar için kapiler su emme son derece önemli bir özelliktir. Elde edilen harç karışımlarına ait su emme değerlerinin verildiği Şekil 7'e bakıldığında DZ oranının artmasıyla beraber kapiler su emme miktarının azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi karbonatlaşma sonucu oluşan hidratasyon ürünlerinin harç arayüzeyinde ve matriste bulunan boşlukları doldurmasıdır. Bu da harcın porozitesinin ve kapiler su emme miktarının daha düşük olmasını sağlamıştır [20], [25]. PL oranının artması işlenebilirliğin azalmasına ve bu sebeple yoğurma suyunun miktarının artmasına sebep olmaktadır. Bu durum da harcın daha gözenekli olmasına ve su emme miktarının daha fazla olmasına yol açmaktadır [26].



Şekil 7- Harç karışımlarına ait kapiler su emme miktarları

Şekil 8'de karışımların kapiler su emme ve etüv kurusu yoğunluklarının 28 günlük basınç dayanımı ile ilişkisini gösteren regresyon eğrileri verilmiştir. Basınç dayanımı ile kapiler su emme arasında azalan, etüv kurusu yoğunluk ile arasında ise artan bir ilişki söz konusudur. Daha önce de bahsedildiği gibi harcın işlenebilirliğinin düşük olması gerekli olan yoğurma suyu miktarının fazla olması gözenek sayısının artmasına ve dolayısıyla kapiler su emme miktarının fazla, kuru birim ağırlığının düşük ve bu da basınç dayanımının daha yüksek olmasını sağlayacaktır.



Şekil 8- Harç karışımlarına ait kapiler su emme, etüv kurusu yoğunluk ve 28 günlük basınç dayanımı arasındaki ilişki

4. Sonuçlar

Tarihi yapıların onarımı ve güçlendirilmesi, toplumların kültürel mirasını gelecek nesillere aktarabilmesi açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu amaçla çalışmada, dayanımı ve dayanıklılığı daha yüksek harçlar elde etmek için DZ ve PL kullanılmış ve bu harç karışımlarının mekanik ve fiziksel özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Araştırma bulguları, artan DZ miktarının harcın mekanik özelliklerini olumlu yönde geliştirdiğini göstermiştir. Ayrıca, PL ilavesinin eğilme dayanımını belirgin biçimde artırdığı da gözlenmiştir. Bunun yanı sıra, DZ miktarının artması kapiler su emme miktarı gibi harcın fiziksel özellikleri üzerinde iyileşmeye sebep olmuştur. Aşağıda sıralanan çalışma sonuçları, bu yenilikçi malzemelerin tarihi yapıların korunmasında önemli katkılar sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

- Kirecin yerine ağırlıkça %10 DZ ikame edilmesiyle taze harcın yayılma çapında yaklaşık %9,3 oranında azalma gözlenirken ağırlıkça %20 oranında DZ kullanıldığında %6'lık azalma gözlenmiştir.
- PL'nin hacimce %1 oranında kullanılmasıyla taze harcın yayılma çapı yaklaşık %41 azalırken %2 oranında PL kullanılmasıyla %52 azalma gözlenmiştir.
- Harçlarda en yüksek porozite değeri %20,9'luk oranla DZ ve PL kullanılmayan harca aittir. En düşük porozite ise %20 DZ kullanılan karışıma aittir ve değeri %13,9'dur.
- Su emme oranı en fazla olan karışım DZ ve PL bulunmayan karışıma aittir en düşük su emme ise PL **içermeyen ve %20** DZ olan karışıma aittir.
- 28 günlük basınç dayanımında DZ kullanılmayan karışıma göre artma miktarı yaklaşık %153'tür.
- 28 günlük eğilme dayanımında DZ kullanılmayan karışıma göre %120 oranında artış söz konusudur.
- PL kullanılmasıyla çatlak ilerlemesi engellendiği için eğilme dayanımında artış olmuştur.

Kaynaklar

[1] Ö. G. Bayır ve T. Ç. Köse, "Kültürel Miras ve Korunmasına İlişkin Ortaokul Öğrencilerinin Görüşleri", *Kastamonu Education Journal*, c. 27, sy 4, Art. sy 4, Tem. 2019, doi: 10.24106/kefdergi.3393.

[2] W. Peng, "Inheritance, Protection and Tourism Development of", *Tourism Management and Technology Economy*, c. 6, sy 3, ss. 25-29, May. 2023, doi: 10.23977/tmte.2023.060303.

[3] M. Grmuša, S. Šušnjar, ve M. Lukić-Tanović, "The attitudes of the local population toward the importance of cultural and historical heritage", *Journal of the Geographical Institute "Jovan Cvijic", SASA*, c. 70, sy 3, ss. 299-307, 2020.

[4] M. Tever, "Otel Olarak Işlevlendirilmiş Tarihi Yapıların Incelenmesi", Master's, 2013. Erişim: 14 Haziran 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.proquest.com/docview/2606878080/abstract/EBFC5F1C0B8F4C0DPQ/1

[5] A. Andreotti *vd.*, "Ancient restoration practices in the Monumental Nymphaeum at Tripolis ad Maeandrum (Turkey): multi-analytical approach on Roman and Byzantine bonding mortars", *Journal of Cultural Heritage*, c. 63, ss. 71-80, Eyl. 2023, doi: 10.1016/j.culher.2023.07.006.

[6] H. Aktaş, "Tarihi Çeçen Süleyman Efendi Konağındaki Sıvaların İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2019.

[7] M. Monaco, G. Faella, ve M. Guadagnuolo, "ANALYSIS OF POZZOLANIC MORTARS FOR RESTORATION", 2021.

[8] E. Vejmelková, M. Keppert, P. Rovnaníková, Z. Keršner, ve R. Černý, "Application of burnt clay shale as pozzolan addition to lime mortar", *Cement and Concrete Composites*, c. 34, sy 4, ss. 486-492, Nis. 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.01.001.

[9] E. U. Sağın, H. E. Duran, ve H. Böke, "Lime mortar technology in ancient eastern Roman provinces", *Journal of Archaeological Science: Reports*, s. 103132, Eki. 2021, doi: 10.1016/j.jasrep.2021.103132.

[10] M. Stefanidou, "Use of natural pozzolans with lime for producing repair mortars", *Environmental Earth Sciences*, c. 75, Nis. 2016, doi: 10.1007/s12665-016-5444-5.

[11] H. Paiva, A. Velosa, R. Veiga, ve V. M. Ferreira, "Effect of maturation time on the fresh and hardened properties of an air lime mortar", *Cement and Concrete Re-*

search, c. 40, sy 3, ss. 447-451, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.09.016.

[12] A. R. Villca *vd.*, "Lime/pozzolan/geopolymer systems: Performance in pastes and mortars", *Construction and Building Materials*, c. 276, s. 122208, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122208.

[13] R. Malathy, R. Shanmugam, D. Dhamotharan, D. Kamaraj, M. Prabakaran, ve J. Kim, "Lime based concrete and mortar enhanced with pozzolanic materials – State of art", *Construction and Building Materials*, c. 390, s. 131415, Ağu. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131415.

[14] C. Maia Pederneiras, R. Veiga, ve J. de Brito, "Impact Resistance of Rendering Mortars with Natural and Textile-Acrylic Waste Fibres", *Fibers*, c. 10, sy 5, Art. sy 5, May. 2022, doi: 10.3390/fib10050044.

[15] F. Kesikidou ve M. Stefanidou, "Natural fiber-reinforced mortars", *Journal of Building Engineering*, c. 25, s. 100786, Eyl. 2019, doi: 10.1016/j.jobe.2019.100786.

[16] A. P. Fantilli, S. Sicardi, ve F. Dotti, "The use of wool as fiber-reinforcement in cement-based mortar", *Construction and Building Materials*, c. 139, ss. 562-569, May. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.096.

[17] R. K. Demircan, B. A. Tayeh, D. N. Celik, G. Kaplan, ve D. E. Tobbala, "The effect of animal and synthetic fibers on the physico-mechanical durability and microstructure properties of natural hydraulic lime-based mortars", *Materials Today Communications*, c. 35, s. 106041, Haz. 2023, doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.106041.

[18] V. Pavlik ve M. Uzakova, "Use of zeolite dust in lime mortars", *Inżynieria Mineralna*, c. R. 14, nr 2, sy 2, ss. 31-36, 2013.

[19] V. Pavlík ve M. Užáková, "Effect of curing conditions on the properties of lime, lime–metakaolin and lime–zeolite mortars", *Construction and Building Materials*, c. 102, ss. 14-25, Oca. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.128.

[20] S. Ceylan, S. Yazicioğlu, ve L. Turanli, "Mikronize edilmiş zeolitin yüksek performanslı betonda kullanımı", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 36, sy 1, ss. 163-176, Ara. 2020, doi: 10.17341/gazimmfd.686689.

[21] H. Chen, C. Xie, C. Fu, J. Liu, X. Wei, ve D. Wu, "Orthogonal Analysis on Mechanical Properties of Basalt–Polypropylene Fiber Mortar", *Materials*, c. 13, sy 13, Art. sy 13, Oca. 2020, doi: 10.3390/ma13132937.

[22] B. Ruan, H. Ding, J. Teng, W. Deng, S. Zheng, ve C. Ruan, "Mechanical Properties and Microstructure of Polypropylene Fiber Reinforced Cement Mortar

Soil", *KSCE J Civ Eng*, c. 25, sy 6, ss. 1985-1997, Haz. 2021, doi: 10.1007/s12205-021-1125-3.

[23] A. E. Özsoy Özbay, O. Erkek, S. Çeribaşı, A. E. Özsoy Özbay, O. Erkek, ve S. Çeribaşı, "The effect of polypropylene, steel, and macro synthetic fibers on mechanical behavior of cementitious composites", *Revista de la construcción*, c. 20, sy 3, ss. 591-601, 2021, doi: 10.7764/rdlc.20.3.591.

[24] L. Julon, B. Zarate, M. Silvera, F. Campos, M. Silvera, ve D. Palacios-Alonso, "Evaluation of the influence of polypropylene fiber on the flexural strength of rigid pavements", *LACCEI*, c. 1, sy 8, Art. sy 8, 2023, doi: 10.18687/LACCEI2023.1.1.491.

[25] B. Ahmadi ve M. Shekarchi, "Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material", *Cement and Concrete Composites*, c. 32, sy 2, ss. 134-141, Şub. 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.10.006.

[26] A. Izaguirre, J. Lanas, ve J. I. Alvarez, "Effect of a polypropylene fibre on the behaviour of aerial lime-based mortars", *Construction and Building Materials*, c. 25, sy 2, ss. 992-1000, Şub. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.080.

KAN UNUNUN KİREÇ ESASLI HARÇLARDA KATKI MALZEMESİ OLARAK KULLANILMASI

Emine ÖZDOĞRU[1], Kemal ERDİL[2], Nabi YÜZER[3], Oruç Kaan TÜRK[4]

[1]Arş. Gör., Yıldız Teknik Üniversitesi, eozdogru@yildiz.edu.tr
[2]Kuveyt Türk Katılım Bankası, kemalerdil@kuveytturk.com.tr
[3]Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, nyuzer@yildiz.edu.tr
[4]Arş. Gör., Yıldız Teknik Üniversitesi, oturk@yildiz.edu.tr

Özet

İnşa edildikleri günden bugüne çeşitli etkilerle bozulmalar yaşayan tarihi yapıların onarım süreçlerinde yapıda daha ciddi hasarlara sebebiyet vermemek için yapının özgün malzeme özelliklerinin korunması kritik bir noktadır. Literatürde antik çağlarda yapıların inşa süreçlerinde hayvan kanı kullanıldığı belirtilmektedir. Bu doğrultuda, hayvan kanının tamir harçlarında kullanılabilir olup olmadığının araştırılması büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada ticari bir su geçirimsizlik katkısı ile halihazırda farklı endüstrilerce kullanılmakta olan ticari kan ununun kireç esaslı harçların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bulgulara göre kan katkısının kılcal su emme katsayısı değerini ise önemli oranda azalttığı, küresel boşluklar oluşturması sebebiyle eğilme ve basınç dayanımı değerlerini azalttığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Tarihi yapılar, Onarım, Kan unu, Kireç harcı, Su geçirimsizlik

Abstract

It is critical to preserve the original material properties of the buildings in order not to cause more serious damages in the repair processes of historical buildings that have been deteriorated by various effects since the day they were built. It is stated in the literature that animal blood was used in the construction processes of buildings in ancient times. Accordingly, it is important to investigate whether animal blood can be used in repair mortars. In this study, the effects of a commercial water resisting admixture and commercial blood meal, which is currently used by different industries, on the physical and mechanical properties of lime-based mortars were investigated. The results showed that the blood admixture decreased the flexural and compressive strength values due to the formation of spherical voids, while it significantly improved the capillary water absorption coefficient value.

Keywords: Historic buildings, Repair, Blood meal, Lime mortar, Water resisting

1. Giriş

Kültürel ve doğal miras olarak kritik bir öneme sahip olan tarihi yapılarda yüzyıllardır doğa ve/veya insanlar etkisiyle oluşan çeşitli hasarların onarılması, tarihi yapıların korunması ve sonraki nesillere aktarılmasını sağlamak açısından oldukça kritiktir. Bu kapsamda, günümüzde tarihi yapıların varlığının sürdürülmesi amacıyla ulusal ve evrensel kültürün bir bileşeni ve uygarlık belgesi olarak korunmaları amaçlanmaktadır [1]. Kültürel ve doğal mirasın korunması kavramının gelişmesi ile bu konuda uzmanlık alanları ortaya çıkmış, konu ile ilgili ölçütler belirlenmiş, yasal düzenlemeler yapılmıştır. Bu amaçla, tarihi yapıların korunması çerçevesine 1931 yılında Carta Del Restauro ve 1964 yılında Venedik Tüzüğü gibi yasal sorumluluklar getirilmiş, temel ilkeler belirlenmiştir [2,3]. Bu ilkelere göre; onarım uzmanlık gerektiren bir iştir ve amacı anıtın estetik ve tarihi değerini ortaya çıkarmak ve korumaktır. Bunun sağlanması için, onarımda, özgün malzeme kullanılmalı ve güvenilir belgelere bağlı kalınmalıdır [3].

Harç ile onarım yöntemi, tarihi yapıların onarım ve restorasyonunda veya mimari elemanlar üzerinde kopmaların bulunduğu durumlarda boşlukların doldurulması için kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Yöntemin genel amacı yapının bütünlüğünün korunması, tarihi yapının mekanik dayanımının artırılması ve mimari elemanlarda sürekliliğin sağlanmasıdır. Bu sebeple onarımda kullanılacak harcın mekanik, fiziksel ve dayanıklılık özelliklerinin özgün malzeme ile uyumu oldukça önemli olup yapıda daha ciddi boyutlu hasarlar oluşmasını engellemek adına özgün malzeme özellikleri belirlendikten sonra uygun onarım malzemesi karışımı belirlenmelidir. Bu karışımlarda bazı özelliklerin geliştirilmesi amacıyla katkı malzemesi olarak çeşitli organik malzemelerin kullanıldığı antik kaynaklarda belirtilmekte ve bazı araştırmalarda antik yapıların numunelerinde çeşitli organik malzemelere veya kan proteinlerine rastlandığı ifade edilmektedir [4-7]. Literatürde atık kanın hem kireç hem de çimento esaslı sistemlerdeki davranışı ile ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan birinde Fang vd. tarafından sıvı kanın kireç esaslı harçların fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmış ve kan katkısının kılcal su emme katsayısında anlamlı bir düşüşe sebep olduğu sonucuna ulaşılmış, bu sonuç temas açısı ölçümleri ile de desteklenmiştir [8]. Ayrıca Xu vd. sıvı kan kullandıkları çalışmalarında, artan sıvı kan içeriğinin çimento harcının su geçirimsizliğine katkıda bulunduğu sonucuna ulaşmışlardır [9]. Jasiczak ve Zielinski ise toz haldeki kanın çimento esaslı sistemlerde hava sürükleyici kimyasal katkıya

benzer etkide bulunarak donma-çözünme etkisine daha dayanıklı hale getirdiğini belirtmişlerdir [10]. Benzer şekilde Yüzer vd. tarafından yürütülen bir çalışmada sıvı kanın çimento harçlarının matrisinde küresel boşluklar oluşturduğu belirtilmiş, aynı zamanda sıvı kan katkılı çimento harçlarının kılcal su emmesinin referans harca kıyasla oldukça düşük olduğu da belirtilmiştir [11].

Literatürden elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda kan katkısının çimento ve kireç esaslı sistemlerde fiziksel ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirdiği değerlendirilmiştir. Bunun yanında hayvan kesimi sonrasında açığa çıkan ve atık olarak nitelendirilen sıvı kan, protein içeriği göz önünde bulundurulduğunda oldukça değerli bir kaynaktır. Buna rağmen, genellikle büyük bir kısmı kanalizasyonlara ve çöplüklere dökülerek bertaraf edilmektedir [12]. Bazı gelişmiş endüstrilerde bu atık, hayvan yemi ya da bitki gübresi üretiminde kullanılmaktayken farklı alanlardaki akademik çalışmalar kapsamında da değerlendirilebileceği belirtilmektedir [13-15]. Bu çalışma kapsamında halihazırda hayvan yemi veya bitki gübresi olarak kullanılmakta olan ve sıvı kanın ısıl işlemden geçirilmesi sonucunda elde edilen kan ununun kireç esaslı harçlarda kullanımının mekanik ve fiziksel özellikler üzerindeki etkisini incelemek için %1 oranında kan unu içeren 1-K kodlu numuneler üretilerek gerekli deneyler yapılmıştır. Kan ununun performansının daha gerçekçi olarak değerlendirilebilmesi amacıyla piyasada kullanıma sunulmuş olan ticari bir su geçirimsizlik katkısı içeren kireç harcının özellikleriyle karşılaştırması için ise %1 oranında ticari su geçirimsizlik katkısı içeren 1-S kodlu numuneler üretilerek deneyler yapılmıştır.

2. Malzeme ve Metodoloji

Harç üretiminde bağlayıcı olarak Ticm marka doğal hidrolik kireç (NHL 5), agrega olarak ise standart CEN kumu kullanılmıştır. Kireç harçlarında katkı malzemesi olarak etkisi değerlendirilen kan unu ise mezbaha atığı olan sıvı kanın ısıl işlemden geçirilmesi sonucunda elde edilen ve hayvan yemi ya da bitki gübresi olarak kullanılabilen, protein bakımından zengin bir ticari üründür. Deneysel çalışma kapsamında kullanılan ticari kan unu satın alındıktan sonra öğütülmüş ve 100 μm açıklığa sahip elekten elenerek kullanıma hazır hale getirilmiştir (Şekil 1). Karışım oranlarının belirlenmesinde kimyasal katkının tavsiye edilen kullanım oranı ile harçlara ASTM 1437-20 standardına göre uygulanan yayılma tablası deneyi ile taze haldeki kıvam tayini sonuçları etkili olmuştur (Tablo 1) [16]. %1 oranında ticari su geçirim-

sizlik katkısı içeren seride su/bağlayıcı oranının bozulmaması adına katkının katı madde oranı dikkate alınarak su miktarında eksiltme yapılmıştır.



Şekil 1. Kullanıma hazır kan unu

Tablo 1. Harç karışım oranları

Seri adı	NHL 5	Su	Agrega	Katkı	Katkı tipi
REF			3	-	-
1-K	1	0,65	0,01	Kan unu	
1-S			0,01	Ticari su geçirimsizlik katkısı	

Harç karışımlarının hazırlanması ve test edilmesinde YTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nın imkanlarından yararlanılmıştır. Harç karışımlarının hazırlanma prosedürü; (i) bağlayıcı ile suyun 60 saniye düşük hızda karıştırılması, (ii) karıştırma aynı hızda devam ederken agreganın eklenmesi ve 90 saniye daha karıştırılması, (iii) toplamda 150 saniyelik karıştırmanın ardından çeperlere yapışan malzemenin temizlenmesi ve katkının eklenmesi, (iv) düşük hızda 90 saniye daha karıştırmanın devam etmesi adımlarından oluşmaktadır. Karıştırma tamamlandıktan hemen sonra taze halde kıvam ve birim ağırlık tayini sırasıyla ASTM 1437-20 ve TS EN 12350-6 standartlarında belirtilen prosedürlere göre gerçekleştirilmiştir [16, 17].

Taze halde priz süresi ölçümü için 0,50 su/bağlayıcı oranı ile hamur karışımları hazırlanmış ve ASTM C191-21 standardına göre otomatik Vicat aleti ile priz süresi ölçümleri iğne her 30 dakikada bir batacak şekilde ayarlanarak yapılmıştır [18]. Hamur numuneler daha sonra hidrofobikliğin tayini için uygulanacak olan temas açısı ölçümlerinde kullanılmak üzere kalıplara yerleştirilmiştir. Temas açısı ölçümleri katı bir yüzeye damlatılan suyun yüzeyle yaptığı açının ölçüsüne göre bu sıvının yüzeyi ıslatabilirliği üzerine yorum yapmaya olanak tanıyan bir ölçümdür. Damlatılan sıvının ölçülmek istenen yüzey ile yaptığı açı 5°'den küçük ise numune süperhidrofilik, 5° ile 90° arasında ise hidrofilik, 90° ile 150° arasındaysa hidrofobik ve 150°'den büyükse süperhidrofobik olarak tanımlanmaktadır. Temas açısı ölçümleri YTÜ Çevre Mühendisliği Bölümü İçme Suyu Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca hamur numuneler boşluk yapısının görüntülenmesi için yapılacak olan SEM analizlerinde kullanılmak üzere tüplere yerleştirilerek kürlenmeye bırakılmıştır. SEM analizleri YTÜ Merkez Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

Taze haldeki harç ve hamur karışımları kalıplara yerleştirildikten 2 gün sonra kalıptan çıkarılmış, 5 gün boyunca 20±2°C sıcaklık ve 95±5% bağıl nemde, sonrasında test gününe kadar 20±2°C sıcaklık ve 65±5% bağıl nemde kürlenmiştir. 28. günde 50x50x50 mm boyutlarındaki 3'er adet kübik harç numunesine ASTM C109 standardına göre basınç dayanımı testi, 40x40x160 mm boyutlarındaki 3'er adet prizmatik harç numunesine TS EN 1015-11'e göre eğilme dayanımı testi uygulanmıştır [19, 20]. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi amacıyla 40x40x160 mm boyutlarındaki 3'er adet prizmatik harç numunesi TS EN 480-5 standardına göre kılcal su emme testine tabi tutulmuştur [21]. Harç karışımlarının yoğunluk ve dışa açık boşluk oranı değerlerinin belirlenmesinde ise ASTM C127-12 standardı kullanılmıştır [22].

3. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

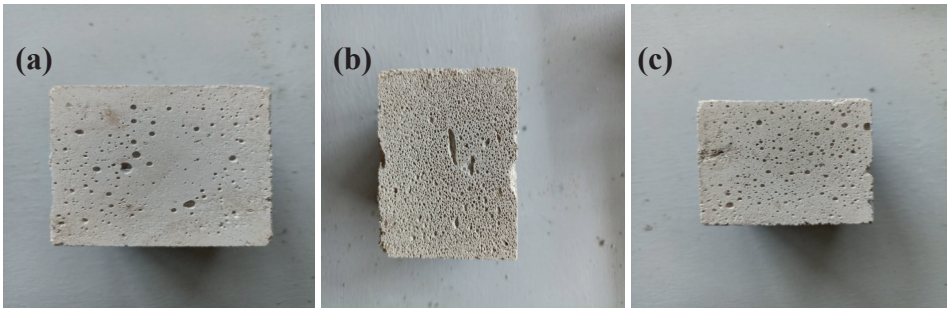
Harç karışımlarının taze halde yayılma ve birim ağırlık değerleri ile hamur karışımların priz süreleri Tablo 2'de verildiği gibidir. Elde edilen sonuçlara göre %1 oranında kan unu katkısı içeren seride (1-K) birim ağırlık değerinin referans seriye (REF) kıyasla %40 oranında azaldığı görülmüştür. Bu sonuç, Lynch vd. tarafından belirtilen kan proteinlerinin köpürme özelliği ile ilişkilendirilmiş, kan katkısı eklendikten sonra harç kıvamı ve yapısındaki değişim görsel olarak da gözlenmiştir [23]. %1 oranında ticari su ge-

çirimsizlik katkısı içeren seride (1-S) ise birim ağırlık değerinde anlamlı bir değişim görülmemiştir. Diğer yandan serilerin yayılma çapları arasında kıyaslama yapıldığında 1-K serisinin yayılma çapında az da olsa bir azalma görülmüş ve bu durum kan katkısının taze haldeki harç karışımının kohezyonunu arttırması ile ilişkilendirilmiştir. Priz süreleri incelendiğinde ise 1-K serisinin priz başlama ve bitiş süresinin REF ve 1-S serilerine göre uzadığı görülmüştür.

Tablo 2. Harç serilerinin taze hal özellikleri

Seri adı	Yayılma çapı (cm)	Birim ağırlık (g/cm^3)	Priz başlangıcı	Priz bitişi
REF	17,0	2,19	300 dakika	450 dakika
1-K	16,5	1,31	360 dakika	480 dakika
1-S	19,0	2,01	300 dakika	420 dakika

Şekil 2'de verilen sertleşmiş haldeki numunelerin görüntülerine göre kan katkısının taze halde oluşturduğu ve birim ağırlığın azalmasına sebep olan boşlukların sertleşmiş halde küresel şekilde stabil olarak kaldığı ve ayrışmaya uğramadan homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Bu görsel çıkarım, Tablo 3'te verilen yoğunluk değerlerinden 1-K serisinin yoğunluğunun REF serisine kıyasla yaklaşık %30 oranında azalmasıyla da desteklenmektedir. 1-S serisinin yoğunluk değerinde ise REF serisine göre büyük bir değişiklik görülmemektedir. Dışa açık boşluk oranı olarak da ifade edilen hacimce su emme oranının 1-K serisinde diğer serilere kıyasla daha yüksek olması da yine Şekil 1-b'de açık bir şekilde görülen dışa açık boşlukların 1-K serisinde diğer serilere kıyasla oldukça yüksek olmasıyla açıklanmıştır.



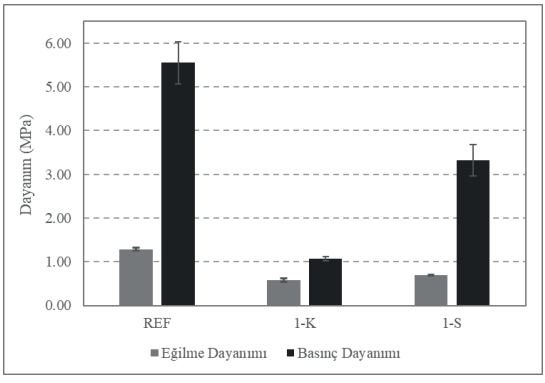
Şekil 2. Sertleşmiş halde (a) REF, (b) 1-K ve (c) 1-S serilerinin yüzey boşluk yapıları

Diğer yandan, her bir seriden 3'er adet numune üzerinde yapılan kılcal su emme ölçümü sonucunda elde edilen kılcal su emme katsayıları incelendiğinde 1-K ve 1-S serilerinin kılcal su emme katsayılarının REF serisine göre sırasıyla 23 ve 6 kat azaldığı görülmüştür. Bu sonuçtan yola çıkılarak kan unu katkısının kılcal su emmeyi hangi mekanizma ile azalttığının araştırılması amacıyla yapılan temas açısı ölçümleri sonucunda elde edilen veriler Tablo 3'te verildiği gibi olup, tamamen hidrofilik özellik gösteren kireç harcının kan katkısıyla birlikte hidrofobiklik eğilimi gösterdiği görülmüştür. Bu hidrofobiklik eğiliminin, kısıtlı kılcal su emme davranışının sebeplerinden biri olduğu düşünülmüştür. 1-S serisinde ise temas açısı hidrofobikliğe daha yakın olmasına rağmen kılcal su emme katsayısı 1-K serisine kıyasla daha yüksektir.

Tablo 3. Harç serilerinin sertleşmiş hal fiziksel özellikleri

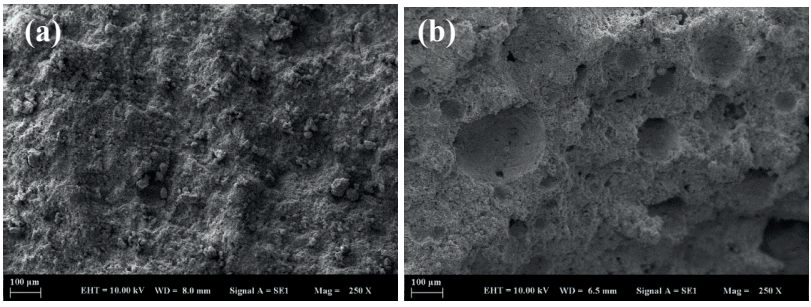
Seri adı	Yoğunluk (g/cm^3)	Dışa açık boşluk oranı (%)	Kılcal su emme katsayısı (10^{-4} cm^2/s)	Temas açısı ()
REF	1,85∓0,03	24,88∓0,07	1,68∓0,17	0
1-K	1,27∓0,02	33,47∓0,13	0,07∓0,00	63
1-S	1,70∓0,00	20,54∓0,07	0,27∓0,06	77

Sertleşmiş halde her bir seriden 3'er adet numune üzerinde mekanik özelliklerin tespiti için yapılan test sonuçları incelendiğinde ise kan katkılı serilerin REF serisine kıyasla oldukça düşük basınç ve eğilme dayanımı değerlerine sahip olduğu görülmüştür (Şekil 3). Bu durum Şekil 3'te verilen yoğunluk değerleri ile paralel olup daha düşük yoğunluğa, dolayısıyla daha yüksek boşluk oranına sahip 1-K serisinde diğer serilere kıyasla daha düşük eğilme ve basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir.



Şekil 3. Harç serilerinin mekanik özellikleri

Taze ve sertleşmiş haldeki testler sonucunda elde edilen sonuçlar SEM görüntüleriyle de desteklenmiş ve bahsi geçen boşluklu yapı görüntülenmiştir. REF numunesinde boşluksuz bir yüzey görülürken aynı büyütmelerde (250X), 1-K numunesinin matrisinde çeşitli boyutlardaki küresel şekilli boşluklar görülmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. (a) REF ve (b) 1-K numunelerinin SEM görüntüleri

4. Sonuçlar ve Öneriler

Ticari bir ürün olan kan ununun kireç harçlarında katkı malzemesi olarak kullanılmasına yönelik çalışmalar kapsamında halihazırda piyasada kullanıma sunulmuş olan ticari bir su geçirimsizlik katkısı (1-S) ile kan unu katkısının (1-K), taze ve sertleşmiş hal özelliklerine katkısı karşılaştırılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Kan unu katkısı köpürme özelliği göstererek taze halde birim ağırlık değerinin azalmasına neden olmaktadır. Oluşan köpük priz alma ve sertleşme sürecinde stabil olarak kalmakta ve sertleşmiş halde yoğunluk değeri de düşmektedir.
- 1-K serisinin taze haldeki birim ağırlık değeri katkısız (REF) ve 1-S numunelerine kıyasla daha düşüktür. Bu durumun kan proteinlerinin köpüklenme özelliği sonucunda harç karışımında çok yüksek miktarda boşluk oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Yayılma çapı değerleri incelendiğinde seriler arasında büyük bir fark olmadığı görülmektedir. Toz malzeme miktarındaki artışa rağmen yayılma çapında anlamlı bir değişiklik olmaması, işlenebilirlik üzerinde olumlu etkisi olan küresel boşlukların varlığıyla ilişkilendirilmiştir.

- Taze haldeki priz süresi ölçümleri sonucunda kan unu katkısının priz başlangıç ve bitiş süresinin artmasına sebep olduğu görülmüştür.
- Serilerin sertleşmiş haldeki yoğunluk değerleri taze haldeki birim ağırlık değerleriyle paralellik göstermiştir ve bu durum su varlığında oluşan köpüklerin priz alma ve sertleşme süreçlerinde ayrışmaya uğramadan stabilitelerini sürdürdüklerini göstermektedir.
- 1-K numunesindeki dışa açık boşluklar gözle görülür şekilde REF ve 1-S numunesinden fazladır ve bu durum hacimce su emme oranı değerleriyle de kanıtlanmıştır.
- 1-K numunesinin kılcal su emme katsayısı REF numunesine kıyasla 23 kat daha az olup bu durum kan katkısının kireç harçlarında hidrofobiklik eğilimi oluşturmasıyla ilişkilendirilmiştir. Kan unu katkısının kireç harçlarının kılcal su emme katsayısı üzerindeki performansının ticari su geçirimsizlik katkısı ile kıyaslandığında oldukça başarılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Boşluk oranı çok yüksek olan 1-K serisinin eğilme ve basınç dayanımı diğer serilere kıyasla oldukça düşüktür.
- SEM görüntülerinde görülen küresel boşlukların hava sürükleyici katkının matriste oluşturduğu küresel boşluklara oldukça benzer olduğu görülmüştür. Bu doğrultuda numunelerin donma-çözünme etkisine karşı dayanıklılıklarının incelenmelidir.
- İlerleyen çalışmalarda, kan unu katkılı kireç harçlarının farklı yaşlardaki fiziksel, mekanik, durabilite ve iç yapı özelliklerinin incelenmesi ve kan katkısının onarım için farklı tipte bağlayıcılarla hazırlanan sistemlerdeki davranışının detaylı olarak analiz edilmesi önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamındaki deneyler 221M279 numaralı “Kireç Esaslı Enjeksiyon Malzemesi ve Harç İçin Atık Kandan Kimyasal Katkı Üretimi” başlıklı TÜBİTAK projesi kapsamında sağlanan maddi destek ile gerçekleştirilmiştir.

Kaynaklar

[1] Ekşi-Akbulut, D., Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılacak Harçların Seçimine Yönelik Bir Öneri, Doktora Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.

[2] Carta del Restauro Tüzüğü, (1932). www.icomos.org.tr/Dosyalar/ICOMOSTR_069105300135367247 3.doc, 11 Mayıs 2024.

[3] ICOMOS, (1964). Venedik Tüzüğü, www.icomos.org/venicecharter2004/turkish.pdf, 11 Mayıs 2024.

[4] Zhang, K., The application history and scientific nature of blood-based materials in traditional Chinese mortar, Sciences of Conservation and Archaeology, 25, 2, 94-102, 2013.

[5] Zhang, K., Wang, L., Tie, F., Yang, F., Liu, Y., Zhang, Y., A preliminary study on the characteristics of lime-based mortars with egg white addition, International Journal of Architectural Heritage, 16, 8, 1184-1198, 2022.

[6] Fang, S. Q., Zhang, H., Zhang, B. J., Zheng, Y., The identification of organic additives in traditional lime mortar, Journal of Cultural Heritage 15, 2, 144-150, 2014.

[7] Fang, S., Zhang, H., Zhang, B., Li, G., A study of Tung-oil–lime putty—A traditional lime based mortar, International Journal of Adhesion and Adhesives, 48, 224-230,

[8] Fang, S., Zhang, K., Zhang, H., Zhang, B., A study of traditional blood lime mortar for restoration of ancient buildings, Cement and Concrete Research, 76, 232-241, 2015

[9] Xu, J. G., Zhao, T. J., Zhang, P., & Jiang, R., Influence of ox blood on water absorption of and chloride penetration into concrete, Advanced Materials Research, 261-263, 496–500, 2011.

[10] Jasiczak, J., Zielinski, K., Effect of protein additive on properties of mortar, Cement and Concrete Composites, 28, 5, 451-457, 2006.

[11] Yüzer, N., Özdoğru, E., Dinç-Şengönül, B., Türk, O.Ç., Yüzer, M.O., Atık sıvı kanın çimento esaslı harçlarda katkı malzemesi olarak değerlendirilmesi, Beton 2023-Hazır Beton Kongresi, İstanbul, 2023.

[12] Álvarez-Castillo, E., Felix, M., Bengoechea, C., Guerrero, A., Proteins from agri-food industrial biowastes or co-products and their applications as green materials, Foods, 10, 5, 981, 2021.

[13] Verbeek, C. J., Low, A., Lay, M. C., Hicks, T. M., Processability and mechanical properties of bioplastics produced from decoloured bloodmeal, Advances in Polymer Technology, 37, 6, 2102–2113, 2017.

[14] Álvarez-Castillo, E., Bengoechea, C., Guerrero, A., Composites from by- products of the food industry for the development of superabsorbent biomaterials, Food and Bioproducts Processing, 119, 296–305, 2020.

[15] Álvarez-Castillo, E., Bengoechea, C., Guerrero, A., Effect of pH on the properties of porcine plasma-based superabsorbent materials, Polymer Testing, 85, 106453, 2020

[16] ASTM C1437-20, Standard test method for flow of hydraulic cement mortar, ASTM, 2020.

[17] TS EN 12350-6, Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 6: Birim hacim kütlesi, TSE, 2019.

[18] ASTM C191-21, Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by vicat needle, ASTM, 2021.

[19] ASTM C109/C109M-20, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM, 2020.

[20] TS EN 1015-11, Kagir harcı - Deney yöntemleri - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın eğilmede çekme ve basınç dayanımının tayini, TSE, 2020.

[21] TS EN 480-5, Kimyasal katkılar - beton, harç ve şerbet için - deney metotları - bölüm 5: kılcal su emme tayini, TSE, 2008.

[22] ASTM C127-12, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM, 2015.

[23] Lynch, S.A., Mullen, A.M., O'Neill, E.E. and García, C.Á. (2017), Harnessing the potential of blood proteins as functional ıngredients: a review of the state of the art in blood processing, Comprehensive Reviews in Food Science And Food Safety, 16, 330-344, 2017

COMPARISON OF STONE COMPRESSIVE STRENGTHS OBTAINED FROM NON-DESTRUCTIVE IN-SITU MEASUREMENT TECHNIQUES WITH DESTRUCTIVE LABORATORY TESTS

Yunus ARCA[1], Kerem KURNAZ[2*], Medine ISPIR[3], Sinan ACIKGOZ[4], Anıl OZDEMIR[5]

[1]M'student, Istanbul Technical University, arca22@itu.edu.tr
[2]M'student, Istanbul Technical University, kurnazk22@itu.edu.tr
[3]Assoc. Prof., Istanbul Technical University, ispirm@itu.edu.tr
[4]Assoc. Prof., University of Oxford, sinan.acikgoz@eng.ox.ac.uk
[5]Asst. Prof., Gazi University, anilozdemir@gazi.edu.tr

Abstract

This study compares compressive strength estimations obtained from non-destructive field and destructive laboratory measurements on stones of twelve non-listed historical buildings which were affected by Kahramanmaraş earthquakes in 2023. In particular, compressive strengths are estimated, via correlations, from Schmidt hammer and Ultrasonic Pulse Velocity measurements conducted on loose stones. These estimations are then compared to compressive strengths obtained from standard cube tests, where cubes were cut from the same loose stone samples. These comparisons quantify the errors associated to non-destructive measurement techniques and correlations. They present a valuable contribution to the scientific literature where most previous studies were conducted under controlled laboratory conditions. The results indicate that Schmidt measurements and correlations provide reasonable estimates for compressive strength within their meas-

urement range. The measurement range is dictated by the device and the adoption of accessories (such as the mushroom plunger). However, the error profile demonstrates a strong bias, with large compressive strengths underestimated and vice versa. This indicates room for potential improvements in Schmidt-compressive strength correlations in the future. UPV results appear to provide less reliable compressive strength estimations, likely due to the influence of size effects. However, results indicate that they may be used to complement/improve Schmidt hammer measurements for high compressive strength stones.

Keyword: In-situ testing, Laboratory testing, Non-destructive tests, Schmidt hammer test, UPV, Earthquake, Masonry, Stone

1. INTRODUCTION

On February 6, 2023 at 04.17 and 13.24 (UTC+3 time zone), two earthquakes occurred at the epicentres of Pazarcık/Kahramanmaraş and Elbistan/Kahramanmaraş. The 7.8 magnitude earthquake occurred at a depth of 10 km, while the magnitude 7.5 earthquake occurred at a depth of 7.4 km [1]. These earthquakes affected 11 provinces with approximately 14 million people [2]. The severity of the earthquakes led to significant damage in immovable cultural assets, traditional rural architecture, archaeological sites and in urban settlements, especially Antakya, İskenderun and Osmaniye [3,4]. A significant part of the affected structures are of stone construction, regular and irregular, encompassing a wide variety of natural stone types [5].

In order to carry out appropriate repair or reconstruction activities in historical stone buildings that have been damaged or largely destroyed in earthquakes, the mechanical properties of the constituent materials used in historical buildings need to be characterised, especially natural stones [6]. A practical approach to conduct mechanical characterisation in the field is non-destructive testing [7]. Non-destructive techniques do not require sampling materials and rely on previously established correlations to estimate key properties, such as compressive strength of materials. Schmidt Hammer and Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) tests are among the most widely used non-destructive test methods in field studies [8]. Many correlations are available to estimate the compressive strength of stones [9], however, there are questions regarding limits of their applicability and reliability for different stone types. Evaluating this aspect would require comparing estimates for compressive strength from non-destructive tests in the field to results obtained from destructive tests in the laboratory. Separate techniques (such as in-situ mortar penetrometer tests [5] or lab double punch tests [10]) are needed for in-situ characterisation of mortar, which is beyond the scope of this study.

A post-earthquake reconnaissance study was conducted in the cities of Antakya, Iskenderun and Osmaniye after the Kahramanmaraş earthquakes. As a part of this study, Schmidt Hammer and UPV tests were carried out on twenty loose stones used in twelve non-listed historical buildings under private ownership (with building owners' permission). This paper describes how these were conducted and how the results were used to estimate the compressive strength of these stones. The stones were later cut down to

standard cube shapes to determine their compressive strength using standard tests in the laboratory environment. The paper also describes how the field estimates compare to the laboratory results to better understand the limitations of non-destructive compressive strength estimation procedures.

2. Test Methodology

2.1. Schmidt Hammer Tests

Schmidt Hammer Test is a quick and convenient non-destructive hardness test. A Schmidt Hammer measures the rebound of hammer strikes. Standard Test Method for Rebound Number ASTM 805/C 805M-08 [11] was used as a reference during the experiments. The precision of this test is highly dependent on several factors such as surface roughness, operator technique and calibration of hammer. Proceq Silver Schmidt Hammer with a mushroom plunger was used during field-tests. Compressive strengths in the range of 5-30 MPa can be measured with the mushroom plunger configuration [12]. Although it was envisioned that stones with a higher strength may have been present amongst the tested sample, due to a lack of prior knowledge of strength, the mushroom plunger was used for all tests. The same operators performed all the tests.

The hammer tests are presented in Figure 1. Before imparting a hammer strike, the test surface is polished with an abrasive tool, Figure 1a. After that, the operator places the steel plunger in contact with the polished surface and the hammer imparts an impact with a predetermined amount of energy. The device measures the rebound of the mass inside the hammer after the impact. These measurements are used to find the Q value. Overall, 10 readings are noted, and an average Q value is obtained. The average Q value is used to calculate compressive strength of each tested loose stone (f_s). The correlation proposed by the manufacturers is presented in Equation 1, with units of MPa.



Figure 1. (a) Stone surface polishing and (b) Schmidt Hammer measurements on loose stone samples

2.2. Ultrasonic Pulse Velocity Tests

Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) is a non-destructive testing technique which measures the speed of wave propagation in a solid material. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete - ASTM C 597-02 [13] was used as a reference during the experiments. The testing setup consists of a pulse generator, a pair of transducers (transmitter and receiver), an amplifier, a time measuring circuit, a time display unit, and connecting cables. The implementation of the test starts with an electro-acoustic transducer in contact with the surface of the tested samples that generates P-wave pulses. After passing through the material, the pulses are received by a second transducer at a distance L from the transmitting transducer and converted to electrical energy. The transit time T is electronically measured. The pulse velocity (V) is obtained by dividing L by T. All data presented in this study were taken with direct transmission techniques on loose stones.

The Pundit PL-200 was used on loose stones during tests. 54 kHz exponential transducers were used. These transducers can be used on rough surfaces without the use of coupling agents [14]. Machine calibrations were done using special rods for each building and each sample. All tests were done three times for different parts of each stone. Then the average value for three measurements was calculated. The image of the test, along with the test instrumentations, is presented in Figure 2.

UPV tests are typically used to estimate the Young's modulus of stones since a direct theoretical relationship exists between wave propagation speed and Young's modulus in homogenous isotropic media. However, previous studies correlated velocities obtained from UPV tests to the compressive strength of the material since this parameter is the most commonly used mechanical parameter for stones. Many different correlations can be found in the literature, some of them specific to the type of natural stones [15-17]. In this study, a general correlation (which is not linked to a specific type of stone) was used (e.g. Karakul et al [18]). The V value range explored by the developers of the correlation correspond well to the velocity range of stones examined in this study. According to this correlation, the compressive strength of stones (in MPa) are calculated via Eq.2. The pulse velocity (V) is used to calculate the compressive strength of each tested loose stone (f_{upv}).

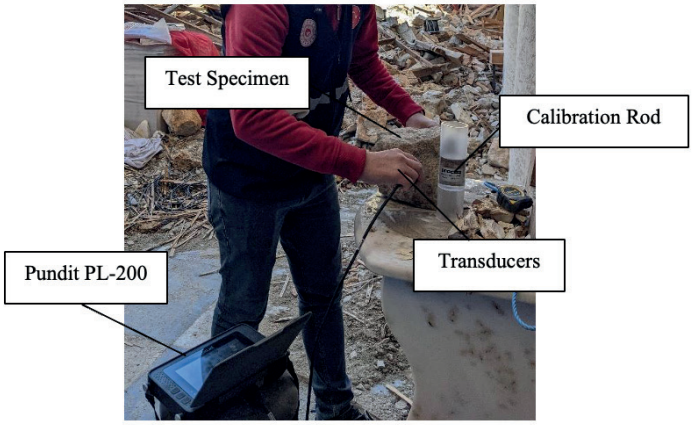


Figure 2. UPV testing equipment and field measurements on a loose stone sample

2.2. COMPRESSIVE STRENGTH TEST

According to TS EN 1926-2007 cubic compression test samples must have a minimum size of 50 mm [19-20]. To obtain more cube samples, 40mm cubes were used in this study. From each loose stone, an effort was made to extract at least three cubes. A maximum cutting error of ±2 mm was allowed. Each sample was conditioned in the oven at 60ºC until the weight change between two consecutive measurements was less than 1%. the conditioned samples were tested using a Instron Satec Series 1000RD universal testing machine. The ASTM C170-06 standard was followed. A Utest loading de-

vice with a spherical bearing was used to account for potential non-parallel surfaces. Loading was applied in a displacement-controlled manner at a rate of 0.025 mm/s. Sample cutting, conditioning and compressive testing are presented in Figure 3.

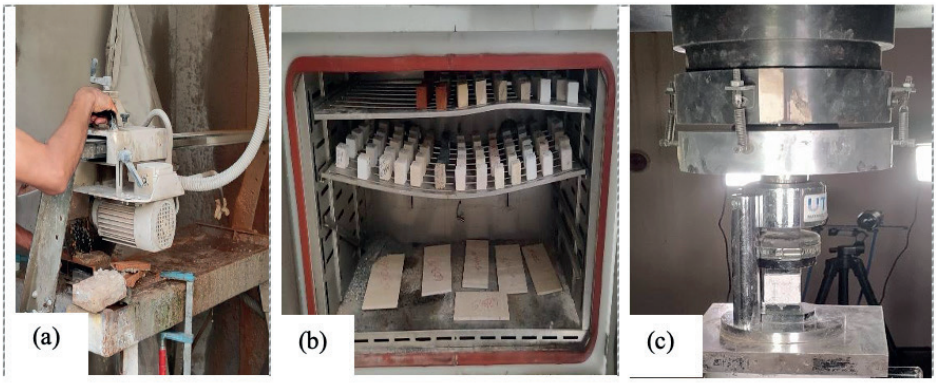


Figure 3. (a) Cutting of stone samples to cubes, (b) drying of stone cubes in an oven and (c) compressive strength test on cube samples

3. TEST RESULTS AND DISCUSSION

Within the scope of the field study, non-destructive tests were carried out on 20 loose stones listed in Table 1. In Table 1, the samples are listed from high to low cube average compressive strength (f_c) (obtained as the mean value of the compressive strength of all cubes extracted from each loose stone). Since the stones examined did not have clear bedding lines, they were assumed to be isotropic. The compressive strengths of the same stones were estimated using Eq (1), for the Schmidt test results. Similarly, average V values from UPV tests were used to estimate the compressive strength of stones via Eq (2).

The adopted sample size of 40 mm is smaller than the 50mm specified in the standard for compressive strength tests on natural stone cubes (TS EN 1926-2007). This may suggest that the compressive strength may be overestimated due to the small size of the sample. However, 40mm cube-like samples are commonly used to determine the compressive strength of mortars and yield similar results to 50 mm samples [21]. Therefore, the compressive strength using the 40 mm cube tests are considered to accurately represent the compressive strength of natural stones.

Sample No.	Laboratory Testing	In-situ Tests				f_c/f_s	f_c/f_{upv}
		Schmidt tests		UPV tests			
	Av. f_c (MPa)	Av. Q Values	f_s (MPa)	Av. Velocity (m/sn)	f_{upv} (MPa)		
S1	88.7	52.1	41.0	4984	72.5	2.2	1.2
S2	78.4	55.8	46.1	3756	45.2	1.7	1.7
S3	61.6	49.8	37.9	3618	42.4	1.6	1.5
S4	49.5	53.7	43.2	3992	50.0	1.1	1.0
S5	44.5	44.7	31.6	3522	40.6	1.4	1.1
S6	37.6	32.1	18.3	3291	36.2	2.1	1.0
S7	32.9	37.6	23.7	2665	25.4	1.4	1.3
S8	32.1	40.8	27.1	3277	36.0	1.2	0.9
S9	28.4	40.3	26.6	2994	30.9	1.1	0.9
S10	26.1	36.8	22.9	3714	44.3	1.1	0.6
S11	19.6	29.5	16.0	2736	26.6	1.2	0.7
S12	17.4	33.8	19.9	2300	19.9	0.9	0.9
S13	16.4	26.5	13.5	2882	29.0	1.2	0.6
S14	15.2	31.2	17.5	3203	34.6	0.9	0.4
S15	13.1	29.7	16.2	3007	31.2	0.8	0.4
S16	7.7	33.2	19.3	2191	18.4	0.4	0.4
S17	7.5	34.5	20.6	1898	14.4	0.4	0.5
S18	6.0	24.7	12.1	2210	18.6	0.5	0.3
S19	4.0	22.0	10.2	2263	19.4	0.4	0.2
S20	3.8	19.2	8.3	1880	14.2	0.5	0.3

Table 1. Compressive strength estimations of stone samples obtained from Schmidt Hammer, UPV and cube compressive tests

Laboratory tests indicate a wide range of compressive strengths, varying between 3.8 and 88.7 MPa. According to the Schmidt test results, the compressive strength of the same stones varies between 8.30 and 46.10 MPa. The results which are outside the measurement range of 5-30 MPa of the hammer are highlighted in grey in Figure 4. The same results vary between 14.2 and 72.5 according to the UPV test results.

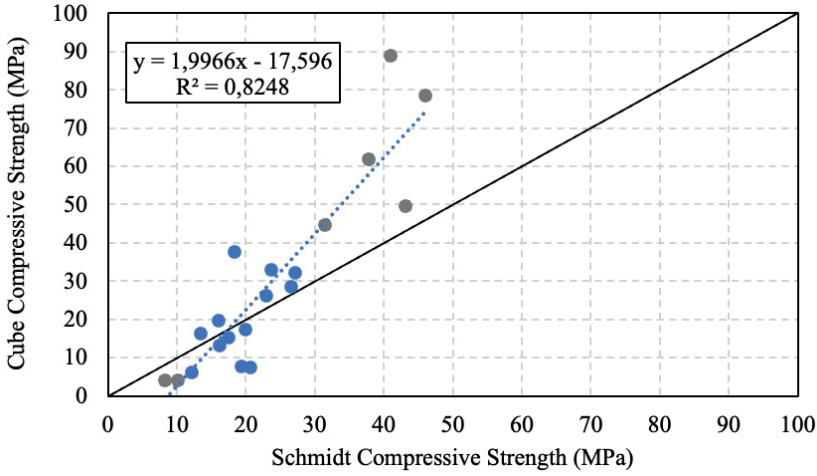


Figure 4. Schmidt hammer estimations and laboratory cube test results for the compressive strength of studied stones.

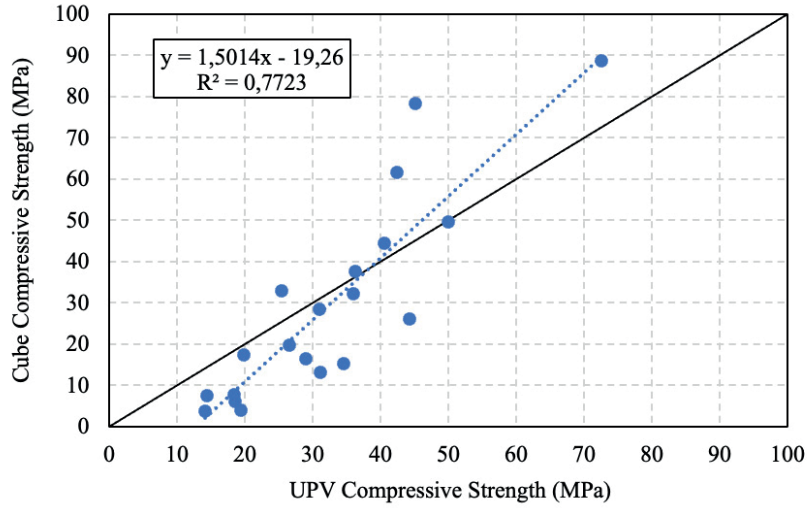


Figure 5. General relation between UPV and Cube compressive strength of studied stone samples.

The experimental data were analysed to determine linear correlations between Schmidt, UPV and cube compressive strength results. Figure 4 plots the Schmidt compressive strength vs cube compressive strength. There appears to be a linear trend between these estimates, although the scatter is

large, particularly outside the measurement range of Schmidt hammers (e.g. strengths greater than 30 MPa). The regression coefficient (R^2) value for the linear model is 0.82. It is also noteworthy that the slope of the fitted line is significantly different from 1. A line with a slope of 1 crosses the fitted line around 15 MPa; this indicates that the Schmidt measurements are likely to underestimate the strength above this value and overestimate the strength below this value.

Similar comments can be made for UPV estimates of compressive strength: As UPV compressive strength increases, cube compressive strength increases, Figure 5. A linear trendline was fitted to the data which results in a R^2 regression coefficient of 0.77. The poorer quality of fit is not surprising; large pore spaces or gaps in the loose stone samples may have influenced UPV measurements leading to erroneous velocity measurements. This aspect also creates a size effect; large loose stones may have experienced lower velocities due to increased likelihood of gaps in larger samples. In previous studies where correlations were derived, UPV was conducted in the laboratory environment on cube samples which were later destructively tested. This difference may explain the poorer quality of UPV correlations compared to Schmidt measurements, which only relies on surface data.

The slope of the fitted line is around 1.5 and the fitted line crosses the 1:1 line around 35 MPa. This suggests that UPV estimates are likely to underestimate the strength above this value and overestimate the strength below this value. When Figures 5 and 6 are examined, it can be noted that due to the larger magnitudes of the slope and crossing point, the compressive strength misestimation can be more severe for UPV, especially for strengths lower than 30 MPa. On the basis of these findings, it is recommended that Schmidt compressive strength estimations are likely to be more accurate in the range 10-30 MPa. UPV tests may be used to obtain estimates for higher values where Schmidt measurements are not applicable.

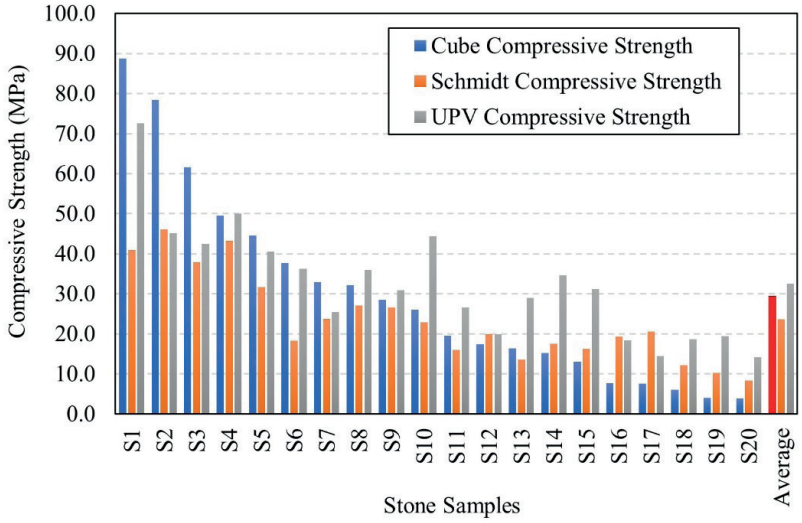


Figure 6. Comparison of compressive strength of stone samples.

Figure 6 presents the compressive strength estimations in the order of decreasing compressive strength according to cube test results. Figure 7 presents the ratios between the cube compressive strengths and Schmidt/UPV estimates in the same order. The average compressive strength from all samples are also provided in the figures. As can be seen from Figure 6 and Figure 7, deviations from cube compressive strength increase on stones with high and low strength in both methods. According to Schmidt tests, the closest results to cube pressure tests are observed in stone samples around 15 MPa, consistent with earlier statements. In the measurement range of 5-30 MPa, deviations up to 60% are observed, with systematic overestimation for values less than 15 MPa. Acceptable UPV estimations for compressive strength with less than 50% deviation from cube compressive strength were obtained in the range 16-50 MPa.

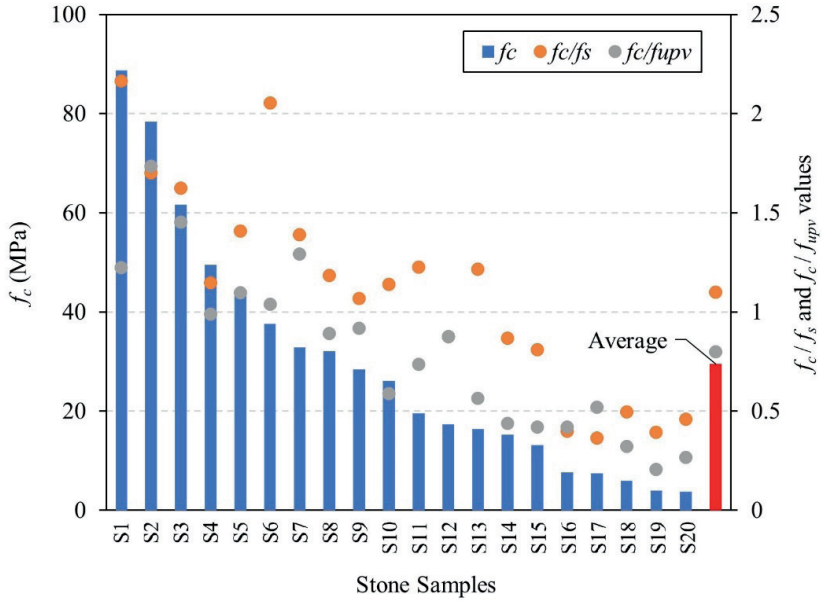


Figure 7. Examining the change rates between the cube compressive strength of stone samples and field tests.

4. Conclusions

This study evaluated the consistency between non-destructive field measurements (Schmidt Hammer and Ultrasonic Pulse Velocity) conducted on loose stones and destructive laboratory tests on associated cube samples from non-listed historical structures influenced by the 2023 Kahramanmaras earthquakes. All measurements are interpreted to obtain compressive strengths (directly from theory for cube measurements and via correlations for non-destructive measurements) and the trends between estimations are evaluated.

In-situ and laboratory test results demonstrate similar trends with a linear relationship. However, the slope of the trendline is greater than 1, which indicates over/underestimation of strength values in certain regions. The regression coefficient R^2 value is higher for Schmidt tests, which was most reliable in its measurement range 5-30 MPa (the limited range is due to the use of a mushroom plunger). Schmidt tests only measure surface hardness and are not affected by sample size. In contrast, UPV measurements which

measure wave propagation may have been influenced by pores or gaps in samples, which are more likely to be found in larger samples. UPV estimations appeared to be most accurate (demonstrating up to 50% deviation) in the range 16-50 MPa. Both Schmidt and UPV correlations indicated strength dependent error profiles (e.g. higher compressive strengths were often underestimated), which suggests that is room to improve correlations in future studies.

The results suggest that Schmidt measurements appear to provide reasonably consistent estimates of compressive strength (up to 60% deviation) in their measurement range. In future studies, UPV measurements may be conducted to provisionally identify stones which are outside the measurement range of the mushroom plunger. This can help determine whether the mushroom plunger should be used for Schmidt hammer measurements. More broadly, this research makes an important contribution by comparing practical field estimations for compressive strength obtained in a post-earthquake field study to compressive strength measurements obtained in controlled laboratory conditions. Most prior studies [22, 23] focussed on comparisons conducted in laboratory conditions which may not reflect potential differences fully.

References

[1] Preliminary Reconnaissance Report on February 6, 2023, Pazarcık Mw=7.7 and Elbistan Mw=7.6, Kahramanmaraş-Türkiye Earthquakes, METU.

[2] Strategy and Budget Office (SBO) of Presidency of Türkiye (2023). "2023 Kahramanmaras and Hatay earthquakes report." (https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/03/2023-Kahramanmaras-and-Hatay-Earthquakes-Report.pdf) (Apr. 18, 2024).

[3] Dilsiz, A., Günay, S., Mosalam, K. M., Miranda, E., Arteta, C., Sezen, H., ... & Safiey, A. (2023). StEER-EERI: 2023 Mw 7.8 Kahramanmaras, Türkiye Earthquake Sequence Joint Preliminary Virtual Reconnaissance Report (PVRR). ETH Zurich.

[4] Aktas, Y., So, E., Johnson, C., Donmez, K., Ozden, A. T., Parammal Vatteri, A., ... & Rossetto, T. (2024). The Türkiye earthquake sequence of February 2023: A longitudinal study report by EEFIT.

[5] Bozyigit, B., Ozdemir, A., Donmez, K., Dalgic, K. D., Durgut, E., Yesilyurt, C., ... & Acikgoz, S. (2024). Damage to monumental masonry buildings in Hatay and Osmaniye following the 2023 Turkey earthquake sequence: The role of wall geometry, construction quality, and material properties. Earthquake Spectra, 87552930241247031.

[6] Costa, A. G. (2006). Strengthening and repairing earthquake damaged structures. In Assessing and Managing Earthquake Risk: Geo-scientific and Engineering Knowledge for Earthquake Risk Mitigation: developments, tools, techniques (pp. 403-426). Dordrecht: Springer Netherlands.

[7] Menéndez, B. (2016). Non-destructive techniques applied to monumental stone conservation. Non-destructive testing, 1-42.

[8] Hamidian, M., Shariati, A., Khanouki, M. A., Sinaei, H., Toghroli, A., & Nouri, K. (2012). Application of Schmidt rebound hammer and ultrasonic pulse velocity techniques for structural health monitoring. Scientific Research and Essays, 7(21), 1997-2001.

[9] Kong, F., Xue, Y., Shang, J., Zhu, C., Han, M., Qu, Z., ... & Yang, K. (2024). Predicting uniaxial compressive strength of building stone based on index tests: Correlations, validity, reliability, and unification. Construction and Building Materials, 438, 137227.

[10] Pelà, L., Roca, P., & Aprile, A. (2018). Combined in-situ and laboratory minor destructive testing of historical mortars. International Journal of Architectural Heritage, 12(3), 334-349.

[11] ASTM C 805/C 805M–08 Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, 2008, 3 p.

[12] Kumavat HR, Chandak NR, Patil IT (2021) Factors influencing the performance of rebound hammer used for non-destructive testing of concrete members: A review. Case Studies in Construction Materials 14: e00491.

[13] ASTM. (2003a). "Standard test method for pulse velocity through concrete." Annual book of American Society of Testing and Materials, C 597-02, West Conshohocken, Pa., 04–02.

[14] Wróblewska J, Kowalski R, Głowacki M, Juchnowicz-Bierbasz B (2021) Application of ultrasonic pulse velocity test to concrete assessment in structures after fire. Archives of Civil Engineering 67(3): 395–413.

[15] Gomez-Heras, M., Benavente, D., Pla, C., Martinez-Martinez, J., Fort, R., & Brotons, V. (2020). Ultrasonic pulse velocity as a way of improving uniaxial compressive strength estimations from Leeb hardness measurements. Construction and building materials, 261, 119996.

[16] Vasanelli, E., Colangiuli, D., Calia, A., Sileo, M., & Aiello, M. A. (2015). Ultrasonic pulse velocity for the evaluation of physical and mechanical properties of a highly porous building limestone. Ultrasonics, 60, 33-40.

[17] Militzer H, Stoll R (1973) Einige Beitraige der Geophysik zur primadatenerfassung im Bergbau. Neue Bergbautechnik 3:21–25.

[18] Karakul, H., & Ulusay, R. (2013). Empirical correlations for predicting strength properties of rocks from P-wave velocity under different degrees of saturation. Rock mechanics and rock engineering, 46, 981-999.

[19] ASTM C 170 Standard test method for compressive strength of dimension stone. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA

[20] TS EN 1926-2007 Natural stone test methods - Determination of uniaxial compressive strength.

[21] Parsekian, G. A., Fonseca, F. S., Pinheiro, G. L., & Camacho, J. S. (2014). Properties of Mortar Using Cubes, Prism Halves, and Cylinder Specimens. ACI Materials Journal, 111(4).

[22] Sarkar K, Vishal V, Singh TN (2012) An empirical correlation of index geomechanical parameters with the compressional wave velocity. Geotech Geol Eng 30(2):469–479.

[23] Vasanelli, E., Calia, A., Colangiuli, D., Micelli, F., & Aiello, M. A. (2016). Assessing the reliability of non-destructive and moderately invasive techniques for the evaluation of uniaxial compressive strength of stone masonry units. Construction and Building Materials, 124, 575-581.

28 EYLÜL 2024

7. ULUSLARARASI TARİHİ YAPILARIN GÜÇLENDİRİLMESİ VE GELECEĞE GÜVENLE DEVRİ SEMPOZYUMU

7. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRENGTHENING HISTORICAL BUILDINGS AND TRANSFERRING THEM SAFELY TO THE FUTURE

7. SEMPOZYÛMA NAVNETEWEYÎ LI DERBARÊ QEWÎKIRIN Û PARASTINA AVAHÎYÊN DÎROKÎ

DİYARBAKIR, SEZAİ KARAKOÇ KÜLTÜR MERKEZİ

B SALONU - 5B OTURUMU

Oturum Başkanları
Halim Karaşin, Jale Alel

Denetimli Makine Öğrenimi Yöntemleriyle Tarihi Yığma Minarelerde Hasar Tespiti
Cemile Duman, Kemal Hacıefendioğlu, Tekin Gültop

Mardin'in Eryeri Mahallesi'nde Bulunan Geleneksel Evlerin Yapısal Koruma Sorunları
Yasemin Ercan Gündüz, Mine Turan, Engin Aktaş

Diyarbakır On Gözlü Köprü'nün Değişen Çevresi ve Dijital Modelleme Yaklaşımı
İzzettin Kutlu, Deryanur Şimşek

Van Ernis Köy Enstitüsü Taş Yığma Hamam Yapısının Deprem Performansının Belirlenmesi
Yaşar Subaşı Direk, Fırat Kuas, Elif Su Direk

Tarihi Yapılarda Su Odaklı Tasarım: Konya İnce Minareli Medrese Donanım Kuruluşu Üzerinden Bir Bakış
Kolbay, SD.

DENETİMLİ MAKİNE ÖĞRENİMİ YÖNTEMLERİYLE TARİHİ YIĞMA MİNARELERDE HASAR TESPİTİ

Cemile DUMAN [1], Kemal HACIEFENDİOĞLU[2], Tekin GÜLTOP[3]

[1]Doktora Öğrencisi, Gazi Üniversitesi, cemile.duman@gazi.edu.tr
[2]Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, kemalhaciefendioglu@ktu.edu.tr
[3]Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, tgultop@gazi.edu.tr

Özet

Bu çalışma, tarihi bir yığma minaredeki hasarın tespitinde denetimli makine öğrenimi tekniklerinin etkinliğini araştırmaktadır. Minare, yükseklik boyunca değişen duvar kalınlıkları ve geometrik özelliklerden oluşan yedi farklı bölümün bir kombinasyonundan meydana gelmektedir. Benzer geometrik özelliklere ve yüksekliğe sahip on farklı bölgeye odaklanılarak çalışılmıştır. Bu bölgelerin elastisite modülü kullanılarak minarenin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir, böylece deneysel ve analitik yöntemlerle elde edilen frekanslar arasında tutarlılık sağlanmıştır. Daha sonra, beş farklı hasar seviyesi için veri grupları elde edilmiştir. Elde edilen veri grupları, elastisite modüllerindeki değişikliklere göre hasar seviyelerine ayrılmış ve frekans değerlerine dayalı olarak hasar indeksleri belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Makine Öğrenmesi, Analitik Model Güncelleme, Sonlu Elemanlar Metodu, Tarihi Yığma Minare.

Abstract

This study investigates the efficacy of supervised machine learning techniques in detecting damage in a historic masonry minaret. The minaret comprises seven different sections formed by varying wall thicknesses and geometric features along its height. Focusing on ten different regions with similar geometric properties and height, optimization of the minaret was conducted using the modulus of elasticity to ensure consistency between experimental and analytical frequency data. Subsequently, data groups were obtained for five different levels of damage. These data groups were categorized into damage levels based on changes in the modulus of elasticity, and damage indices were determined accordingly.

Keywords: Machine Learning, Analytical Model Update, Finite Element Method, Historic Masonry Minaret.

1. Giriş

Tarihi yapılar, kültürel mirasımızın önemli bir parçasıdır.Bu nedenle genellikle koruma altına alınarak veya restore edilerek günümüze kadar varlığını sürdürmesi hedeflenmiştir. Ancak doğal afetler, çevresel etkiler ve diğer faktörler nedeniyle hasar görme olasılıkları devam etmektedir. Olası hasarların tespiti ve doğru bir şekilde değerlendirilmesi, yapıların uzun vadeli sağlamlığını ve güvenliğini sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Geleneksel metodlarla yapılan hasar tespiti genellikle zaman alıcı, maliyetli ve subjektif olabilmektedir. Bu nedenle yapay zeka ve makine öğrenmesi tekniklerinin kullanımı son yıllarda tarihi yapıların hasar tespitinde daha etkili ve verimli bir yol olarak öne çıkmaktadır. Bu teknikler, yapısal hasarın belirlenmesinde daha hızlı, daha hassas ve daha nesnel sonuçlar sağlayabildiğinden önemli ölçüde yardımcı olabilmektedir.

Bu çalışmada, tarihi bir yapıda hasar tespiti için denetimli makine öğrenimi metodlarının etkinliği incelenmektedir. Bu doğrultuda, farklı makine öğrenimi algoritmalarının performansı karşılaştırılmış ve tarihi yığma minarede hasar tespitinde en etkili yöntem belirlenmiştir. Bu çalışma, deneysel, analitik ve makine öğrenmesi gibi birçok yöntemin bir arada ve belli bir sıralamaya uyarak uygulanmasıyla oluşturulmuştur.

Çalışmada uygulama olarak seçilen tarihi yığma minarenin doğal frekansları Operasyonel Modal Analiz (OMA) metodunu kullanan bir çalışmadan elde edilmiştir [1]. Yapı veya sistemin doğal frekanslarını, mod şekillerini ve bunların doğal sönüm oranlarını tespit etmek için kullanılan bu metod, gerçek dinamik yükler altında bir yapı veya sistemde doğrudan ölçülen titreşim verilerini kullanarak sistemdeki modal parametreleri belirlemeyi amaçlamaktadır. Genellikle yapısal sağlamlık, yapısal hasar tespiti, yapısal sağlık izleme ve yapısal dinamik davranışın anlaşılması gibi alanlarda kullanılmaktadır [2,3,4,5].

Analitik analizler için minarenin ANSYS Workbench programı kullanılarak sonlu elemanlar modeli benzer geometrik özellikler ve yükseklik bakımından eşit 10 bölüm şeklinde oluşturulmuştur. Oluşturulan sonlu elemanlar modelinin modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Modal analiz sonucu elde edilen frekanslar ile deneysel metodla elde edilen frekansların uyumunu sağlamak için ANSYS Workbench DesignXplorer yazılımının bir ürünü

olan 'Response Surface Optimization(RSO)' optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem tepki yüzeyi metoduna dayalı olarak çalışmaktadır ve kendi içinde 'Desing of Experiments(DOE)', 'Response Surface(RS)' ve 'Optimization' olmak üzere 3 adımda optimizasyon işlemini tamamlamaktadır. Optimizasyon işlemi için girdi parametreleri olarak sonlu elemanlar modelinde belirlenen malzemenin mekanik özelliklerinden seçim yapılırken, çıktı parametreleri olarak frekanslar seçilmiştir. Bu optimizasyon yöntemi yapının mekanik ve dinamik özellikleri kullanılarak doğru sonuçlar elde edilmesinde önemli rol oynamıştır [6].

Çalışmanın son adımı ise analitik yöntemlerle elde edilmiş verilerin excel veya csv formatında düzenlenerek makine öğrenmesi algoritmasında kullanılmasını içermektedir. Bu adımda kullanılacak veriler eğitim ve test seti olarak iki ana gruba ayrılmıştır. Sınıflandırma işleminden sonra denetimli makine öğrenmesi algoritmalarından 'k-Nearest-Neighbor' (k-NN), 'Decision Tree' (DT), 'Random Forest' (RF), 'Support Vector Machine' (SVM), 'Navie Bayes' (NB) ile analiz edilerek algoritmalar dört temel metrik açısından kıyaslanmıştır. Böylece algoritmlar arasından tarihi yığma minare için en etkili hasar tespiti yönteminin belirlenmesi sağlanmıştır [7].

2. Metodoloji

2.1. Model

Tarihi yığma minare, yükseklikleri ve geometrik şekilleri farklı bölümlerin bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Bu bölümler temel, kaide, geçiş segmenti, gövde, şerefe, petek ve külahtır. Ayrıca minare giriş kapısından şerefe kapısına kadar devam eden merdiven bulunmaktadır. Minare, temel alt kotu -2.62 m ile +33.10 m külah üst kotu arasında yaklaşık 36 m yapı yüksekliğine sahiptir. Külah bölümü dahil olmak üzere tüm bölümler kesme taş malzemesinden imal edilmiştir.

Minarenin sonlu elemanlar modeli ANSYS Workbench programında modellenerek modal analizi yapılmıştır. Modal analiz sonucunda elde edilen frekans değerlerini kıyaslamak için aynı tarihi minarenin literatürde var olan doğal frekansları kullanılmıştır [1]. Modal analiz sonucu elde edilen frekanslar ile minarenin doğal frekansları arasındaki farklılıkları gidermek için model güncelleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

2.2.Analitik Model Güncelleme

Analitik modeli ANSYS Workbench ile elde edilen tarihi yığma minare, benzer geometrik özellikler dikkate alınarak eşit yükseklikte on bölüme ayrılmıştır. Geometrisi mevcut minare ile uyumlu olan sonlu elemanlar modelinin modal analizi yapılmış ve sonuçlarının deneysel yöntemlerle elde edilen frekans değerleriyle uyumlu olmadığı tespit edilmiştir. Bu aşamada model güncelleme için gerekli girdi ve çıktı parametrelerinin belirlenmesi adımına geçilmiştir. Minarenin mekanik özelliklerinden elastisite modülleri girdi parametreleri, modal analiz sonucu elde edilen frekans değerleri ise çıktı parametreleri olarak belirlenmiştir. Girdi parametreleri P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9 ve P10 şeklinde isimlendirilirken çıktı parametreleri olarak ise ilk altı frekanstan dördü (f1, f3, f5 ve f6) seçilmiştir. Çıktı parametreleri seçiminde tekrarlamayan ve farklı mod şekillerine sahip frekanslar tercih edilmiştir (Şekil-1).

Analitik modelin güncellenmesi için ANSYS Workbench te modal analiz modülüne DesignXplorer yazılımının bir bileşeni olan 'Response Surface Optimization' bileşeni bağlanarak optimizasyon adımları üç aşamada uygulanmıştır.

2.2.1. Deneysel Tasarım

Deneysel Tasarım, numune alma noktalarının yerlerinin bilimsel bir şekilde sistematik olarak belirlenmesi için kullanılan önemli bir tekniktir. Mühendislik çalışmalarında çeşitli deneysel tasarım algoritmaları ve yöntemleri mevcuttur. Bu tekniklerin ortak bir hedefi; gerekli örnekleme noktalarının sayısını en aza indirirken girdi parametreleri alanı içindeki örnekleme noktalarını verimli bir şekilde araştırmak ve temel bilgileri toplamaktır. Stratejik konumlarda numune alma noktalarının seçilmesi yalnızca gerekli noktaların toplam sayısını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda bu numune alma noktalarının sonuçlarından elde edilen yanıt yüzeyinin doğruluğunu da artırmaktadır.

Analizin bu aşamasında, kullanıcı belirli tasarım değişkenlerinin (örneğin, boyutlar, malzeme özellikleri) belirli bir aralıkta nasıl değiştirileceğini tanımlanmaktadır. Bu değişkenlerin her biri için bir alt ve üst sınır belirlenmiştir. Ayrıca, deney tasarımını optimize etmek için kullanılacak istatistiksel bir tasarım planı seçilmiştir. ANSYS Workbench'te gerçekleştirilen tarihi minare analizi kapsamında, seçilen deneysel tasarım türü, ilgili parametre

sayısına göre seçilen 'Merkezi Kompozit Tasarım' (MKT)'dir. MKT, giriş parametrelerinin eksenleri boyunca bulunan noktaları, kesirli faktöriyel tasarımda hesaplanan noktalarla merkezi bir nokta olarak birleştiren bir tekniktir. Bu tasarımlar iyi planlanmış bir faktöriyel deneyden elde edilen değerli bilgileri kapsayabildiğinden, deneysel plan sıralı bir deney gerektirdiğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Optimizasyon için seçilen parametrelere ait değer aralıkları bu aşamada tanımlanmıştır. Optimizasyonun bu adımında ve parametreleri bu adıma bağlı olan diğer iki aşamada da en fazla 10 parametre kullanılabilmektedir. Bu durum minarenin on hasar bölgesinde incelenmesinin tek sebebidir.

Deneysel tasarım analiziyle yaklaşık 600 tasarım noktası oluşturulmuştur. Bu noktalar değerli bir veri seti görevi görür ve seçilen giriş değerlerinin belirlenen aralıklarda otomatik olarak belirlenebilen frekans değerlerine ilişkin bilgiler sunmaktadır. Ayrıca bu veri seti içerisinde çıkış parametreleri için hesaplanan minimum ve maksimum değerleri gözlemlenmektedir. Bu değerler bir dizi potansiyel sonuç sağlar ve söz konusu sistemin değişkenliği ve davranışının anlaşılmasına yardımcı olmaktadır.

Bu aşamada elde edilen tasarım noktaları denetimli makine öğrenimi aşamasına veri sağlamada kullanılmaktadır.

2.2.2. RS Yöntemi

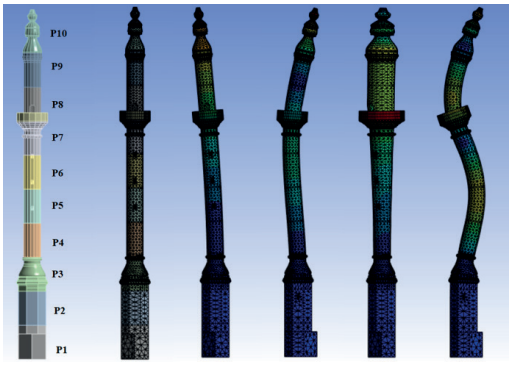
Tepki yüzeyleri, çıkış parametrelerinin giriş parametrelerindeki değişikliklerle nasıl değiştiğini açıklayan matematiksel fonksiyonlardır. Deneysel Tasarım oluşturulduğunda, ayrıntılı bir çözüme ihtiyaç duymadan, tasarım alanı boyunca yaklaşık çıktı parametre değerlerinin hızlı bir şekilde tahmin edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yanıt yüzeylerinin doğruluğu, çıktı parametrelerinin kombinasyonları, orijinal Deneysel Tasarımdaki nokta sayısı ve seçilen yanıt yüzeyinin türü dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır.

ANSYS Workbench'te tarihi minare analizi için seçilen yanıt yüzeyi algoritma türü 'Genetic Aggregation'dur. Analiz, deneysel tasarım aşamasında tanımlanan parametre değer aralığı dahilinde gerçekleştirilir. Analiz sonuçları, giriş parametrelerinin çıkış parametrelerini nasıl etkilediğine dair öngörü sağlar, çıkış parametrelerinin minimum ve maksimum değerlerini temsil eden hesaplanmış değerlerin kombinasyonlarını sunar ve sistemin davranışı ve farklı giriş koşullarına tepkisi ile ilgili çeşitli ayrıntılara da yer verir.

2.2.3. Optimizasyon

ANSYS Workbench'te optimizasyon teknikleri, 'Goal-Directed Optimization' (GDO) sistemleri aracılığıyla erişilebilir hale getirilmektedir. Bu sistemler, tasarımcıların yanıt yüzeylerini veya tasarım noktalarını içeren diğer bileşenleri kullanarak tasarım adaylarını belirlemesine olanak tanmaktadır. GDO süreci, belirli hedefleri uygularken girdi parametrelerinin çıktı parametrelerini nasıl etkilediğinin değerlendirilmesini kolaylaştırmaktadır.

Bu adımda, tarihi minare analizinin optimizasyon sürecine yönelik hedefler ve kısıtlamalar tanımlanmaktadır. Özellikle seçilen optimizasyon türü 'Multi-Objective Genetic Algorithm' (MOGA) dır. Parametre değer aralığı önceki aşamalarda belirlenen aralıkla tutarlı kalmaktadır. MOGA, birbiriyle çelişen birden fazla hedefin aynı anda optimize edilmesinin gerektiği çok amaçlı optimizasyon problemleriyle uğraşırken uygun bir seçimdir. Tasarımcıların çeşitli tasarım olanaklarını keşfetmesine olanak tanıyarak, bu çelişen hedefler arasındaki etkileşimi temsil eden bir dizi çözüm bulmaya yardımcı olmaktadır. Bu adımda optimizasyon, deneysel frekansların hedef olarak belirlenmesiyle girdi parametrelerini kullanarak çıktı parametrelerini deneysel frekanslara uyumlu hale getirmeyi amaçlamaktadır.



Parametreler	Mesh	f1	f3	f5	f6

Şekil 1- Analitik model tasarımı

2.3.Analitik Model Güncelleme Çıktıları

Model güncelleme aşamasında öncelikle analitik metodla elde edilen frekanslarla doğal frekansların uyumlu hale gelmesi için parametrelerin güncel değerleri elde edilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1- Parametre değerlerinin optimizasyon öncesi ve sonrası değerleri

(GPa)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Önce	10.797	5.7679	11.769	8.9015	11.969	8.7399	11.415	9.9787	8.0928	8.6916
Sonra	5.543	5.8585	6.8932	11.747	10.698	9.3401	5.95581	5.2191	5.184	5.7834

Tablo 2- Deneysel ve analitik metodlara ait frekans ve hata oranı değerleri

Frekans No	Deneysel Metod	Analitik Metod				
		Optimizasyon				**Modal Analiz**
		Önce	ε (%)	**Sonra**	ε (%)	
1	0.738	0.807	9.35	0.74734	1.27	0.77726
3	3.207	3.9864	24.30	3.2073	0.001	3.2647
5	9.1743	9.2131	0.42	8.7266	4.88	8.7464
6	9.9482	11.624	16.84	9.7847	1.64	10.018

Bu aşamaya kadar frekanslarda meydana gelen güncellemeleri özetleyecek olursak (Tablo 2) deneysel metot ile elde edilen birinci, üçüncü, beşinci ve altıncı frekanslar optimizasyon öncesindeki aynı numaralı frekanslar için referans kabul edilerek optimizasyon sonrası frekansları elde edilmiştir. Elde edilen frekanslar %5 hata oranıyla (ε) başarılıdır. Optimizasyon sonucu elde edilen P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10 elastisite modülü değerleri (Tablo 1) analitik modelde güncellenerek tekrar modal analiz yapılmış ve sağlıklı modelin frekans değerleri elde edilmiştir.

ANSYS Workbench 'Design Experiment' analizi ile makine öğrenmesinde kullanılabilecek yaklaşık 600 veri elde edilmiştir. Bu veriler excel dosyası olarak kaydedilerek düzenlemeler yapılmıştır.

2.4. Hasar Oranlarının Belirlenmesi

ANSYS Workbench programı ile deneysel tasarım aşamasında elde edilen yaklaşık 600 verinin excel ortamına aktarılması ile burada yer alan verilerin hasarsız modele göre elastisite modüllerinde meydana gelen yüzde değişim ve her bir veri için toplam rijitlik kaybı hesaplanmıştır. Bu veri grubunun her bir satırı bir örneğe ait olup, P1-P10 aralığındaki elastisite modülü değerlerini ve bu parametre değerlerine karşılık gelen f1, f3, f5 ve f6 frekans değerlerini içermektedir. Verilerin sağlıklı modele göre parametre değişim yüzdelerinin hesaplanmasında $(E^u-E^d) / E^u$ formülü kullanılmıştır. Burada E^u hasarsız duruma ait elastisite modülü değeri ve hasarlı duruma ait elastisite modülü değeridir.

Hasar grupları belirlenirken sıklıkla tekrar eden veya yakın hasar yüzdelerine sahip örnekler tercih edilmiştir. Hasar grupları 3.28%, 6.71%, 7.91%, 13.37%, 29.08% şeklinde 5 gruptan ve 272 örnekten oluşmaktadır. 3.28% grubu tarihi yığma minarenin hasarsız durumunu temsil etmektedir. Hasar grupları belirlendikten sonra veri grubundaki örneklerin yapı hakkında bilgi veren kısmı frekanslar olacaktır. Bundan sonraki adımlarda elastisite modülleri ile işlem yapılmayacağından veri seti daha sade hale getirilmiştir.

2.4. Hasar İndeksine Bağlı Veri Setlerinin Oluşturulması

Bir yapıda meydana gelen yapısal bir hasar, yapının dinamik ve mekanik özelliklerinde değişikliklere sebep olmaktadır. Bu değişiklikler hasar indekslerine bağlı olarak sınıflandırılabilir. Bu aşamada öncelikle yapı veya sistemin hasar durumunu belirlemek için bazı parametreler tespit edilmelidir. Bu parametreler yapının dinamik özellikleri arasından seçilebilir. Bu çalışmada yapının frekans değerleri hasar indeksi belirlemede kullanılmaktadır.

Hasar indeksi (HI), genellikle hasarsız veya sağlıklı bir duruma sahip olduğu düşünülen bir referans sistemden elde edilen frekans değerlerinin hasarlı durumlarla karşılaştırılmasıyla formüle edilmektedir [8,9]. Hasar indeksleri, hasar miktarının belirlenmesine yönelik tahmin teknikleriyle ilişkilidir ve yapısal sağlık durumu hakkında önemli bilgileri ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle HI, yapının hiçbir hasarla suçlanmadığı 'sıfır' ile 'bir' arasındaki değerlerde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, bulunan hasar indeksleri birden çıkarılarak kullanılmıştır. Bunun nedeni, küçük hasar oranları sebebiyle hasar indekslerinin de çok küçük değerler çıkmasına karşılık bu sayıları birden çıkararak daha anlamlı sayılarla çalışmak istenmesidir.

Yapısal tutarsızlıkları ve hasarı tespit etmek için doğal frekans değişiklikleri dikkate alınmaktadır. Bu çalışmada doğal frekans değerleriyle uyumlu hale getirdiğimiz modal frekans değerleri referans alınmaktadır. Bu ilişki, yapının bütünlüğünü sınıflandırmak için bir gösterge oluşturmak amacıyla kullanıl maktadır [10]. Denklem (1) de hasarsız duruma ait frekans değerini ve hasarlı duruma ait frekans değerini temsil etmektedir.

$$HI = \frac{f_i^u - f_i^d}{f_i^u} \tag{1}$$

Bu çalışmada hasarsız duruma ait referans frekanslar tablo 2 de belirtildiği gibi f_1^u=0.77726, f_3^u=3.2647, f_5^u=8.7464 ve f_6^u=10.018 şeklindedir. Veri setinden seçilen 272 örneğin hasar indeksleri bu frekanslara göre belirlenmektedir.

2.5. Denetimli Makine Öğrenimi

Bu çalışma, tarihi yığma minarenin modal frekans değerlerinden elde edilen verileri kullanarak oluşturulan 5 hasar grubunun denetimli makine öğrenimi teknikleriyle incelenmesini amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda 'K-Nearest-Neighbor Classifier' (kNN), 'Decision Tree' (DT), 'Random Forest' (RF), 'Support Vector Machine' (SVM), 'Navier Bayes' (NB) gibi çok sınıflı yaklaşıma sahip makine öğrenimi algoritmaları kullanılmıştır. Süreç, veri kümesinin çıkarılmasıyla başlar, ardından verilerin eğitim ve test için sırasıyla %80 ve %20'ye bölünmesi ile devam eder. Sonraki adımda ise hasarın tanımlanması, sınıflandırma ve bilgi sağlamak için makine öğrenimi (ML) algoritmasının uygulanması gelir. Tüm hasar tespiti ML uygulaması Python'da scikit-learn [11] kütüphanesini kullanmaktadır.

Algoritmaların genel performansı dört metrikle değerlendirilir. Bu metrikler bir sınıflandırma modelinin performansını değerlendirmek için kullanılan önemli ölçütlerdir.

- ***Accuracy (Doğruluk):*** Modelin doğru tahmin ettiği gözlemlerin oranını ifade etmektedir. Genellikle tüm sınıfların doğru tahmin edilme oranını gösteren genel bir performans ölçütüdür.

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (2)$$

Bu formülde;
TP: Gerçek pozitiflerin sayısı
TN: Gerçek negatiflerin sayısı
FP: Pozitif olarak tahmin edilen gerçekte negatiflerin sayısı
FN: Negatif olarak tahmin edilen gerçekte pozitiflerin sayısı

- ***Precision (Hassasiyet):*** Pozitif olarak tahmin edilen örneklerin ne kadarının gerçekten pozitif olduğunu ifade etmektedir. Modelin yanlış pozitiflerle (FP) ne kadar az olduğunu göstermektedir.

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (3)$$

- ***Recall (Duyarlılık / Geri Çağırma):*** Gerçek pozitiflerin ne kadarının doğru bir şekilde tanındığını ifade etmektedir. Modelin ne kadar gerçek pozitifi kaçırdığını göstermektedir.

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (4)$$

- ***F1 Score (F1 Puanı):*** Hassasiyet ve duyarlılık arasında bir denge sağlayan bir ölçüdür. Bunlar arasındaki harmonik ortalama olarak hesaplanmaktadır.

$$F1\ Score = 2\ x\ \frac{Precision\ x\ Recall}{Precision + Recall} \quad (5)$$

Bu metrikler, sınıflandırma modelinin hangi sınıfları ne kadar doğru tahmin ettiğini ve yanlış tahmin ettiğini belirlemeye yardımcı olur.

Scikit-learn paketinde bulunan algoritmalar ikili veya çok sınıflı bir sınıflandırma sağlamaktadır. Bu aracın doğru kullanımı için doğru model seçimi yapmak ve ne tür bir algoritmanın (denetimli veya denetimsiz) sorunu çözeceğine karar vermek önemlidir. Doğru modeli seçmek için değişken alt kümesi seçimi ve eğitim süresinin kısa olması önemli bir etkendir. Bu nedenle performans ölçümleri modelleme aşamasında önemlidir.

Algoritmanın genel performansını belirleyen dört metriğin yanı sıra 'Confusion Matrix' te veri kümesi sınıflandırmasını izlemek için kullanılmaktadır. Bu matris, hasar oranının sınıf tahminini temsil eden satır ve sütunlara sahiptir. Bu matris, ML tekniklerinin sınıflandırmasındaki hasar tespit modellerini ve hatalarını anlamamızı sağlamaktadır. Matris elemanları veri koşullarını TP, TN, FP ve FN olarak göstermektedir. 'Confusion Matrix'in köşegeni doğru hasar tespit oranını temsil etmektedir. Bu nedenle, ideal modelin köşegeninde yüksek değerler ve başka yerlerde minimum değerleri vardır. Bu çalışmada, ML algoritmasının değerlendirme metrikleri, hasar tespiti kabiliyetini doğruluk, hassasiyet, geri çağırma, F1 puanı ve Confusion matris aracılığıyla karşılaştırmak için ele alınmıştır.

2.5.1. kNN Yöntemi

Bu yöntem en basit denetimli öğrenme yöntemlerinden biri olup desen tanıma alanında geniş çapta kullanılmaktadır. kNN, hem sınıflandırma hem de regresyon için uygulanabilmekte ve genellikle verilerin ayrık etiketlerle sınıflandırılması veya sürekli etiketlerle regresyonu için tercih edilmektedir. Sınıflandırma işlemi, her bir noktanın en yakın komşularının basit çoğunluk oylamasıyla belirlenmektedir; bir sorgu noktası, kendisine en yakın komşular arasında daha fazla temsilciye sahip olan veri sınıfına atanır. Bu işlem için noktalar arasındaki uzaklığı ölçmek için bir metrik kullanılır.

En yaygın kullanılan kNN uygulaması, Öklid mesafesi temelli sınıflandırmadır. Öklid mesafesi, iki vektör arasındaki uzaklığı ölçmek için kullanılan bir metriktir ve hesaplanması oldukça basittir. Bu metrik, kNN algoritmasının pratik kullanımını sağlayan kolaylık ve etkinlik sağlar. Denklem (6) da x_i ve x_j vektörleri arasındaki Öklid mesafesi denklemi tanımlanmıştır.

$$F1\ Score = 2\ x\ \frac{Precision\ x\ Recall}{Precision + Recall} \tag{6}$$

En basit haliyle, kNN algoritması yalnızca bir en yakın komşuyu dikkate almaktadır. Bu da tahmin etmek istediğimiz noktaya en yakın eğitim veri noktasını ifade etmektedir. Tahmin, bu eğitim noktası için bilinen çıktıdır. ‘k’ hiper-parametresine bağlı olarak, her bir örnek benzerlik veya yakınlık için ‘k’ çevresindeki örneklerle karşılaştırılmaktadır. Örneğin, k=3 olduğunda, bireysel örnekler en yakın üç örnekle karşılaştırılır ve bu nedenle bilinmeyen örnek buna göre sınıflandırılmaktadır. ‘k’ değerinin optimal seçimi oldukça veriye bağımlıdır, genelde daha büyük bir ‘k’ sınıflandırma sınırlarını daha belirgin hale getirmektedir. Bu nedenle, hiper-parametre ‘k=3’ olarak ayarlanmış ve ağırlık fonksiyonunun değerleri, her komşulukta tüm noktaların eşit olarak ağırlıklandığını temsil edecek şekilde tanımlanmıştır. Sorgu oluşturma ve hızı etkileyen tabaka boyutu 30 olarak belirlenmiştir.

2.5.2. DT Yöntemi

‘Decision Tree’ (DT), denetimli bir algoritmadır. Frekansları sistemin sağlıklı durumuyla karşılaştırmak için hasarlı veya hasarsız bir durumun kategorik değişkenlerini kullanarak, redgresyon için sürekli değişkenleri hedefler [12]. DT yöntemi bizi doğru cevaba en hızlı şekilde ulaştıracak ‘if/else’ sorularının sırasını öğrenmek anlamına gelmektedir.

DT algoritmasının tatmin edici sonuçları, seçilen niteliklerin kriterlerine bağlı olmaktadır. Kriter seçimleri ise sınıflandırma için en uygun niteliklerin istatistiksel ölçümlerine göre gerçekleştirilir. Bu çalışma, genel olarak kullanılan bir ölçüm olan 'Gini Index' i kullanmaktadır [12]. Verilerin heterojenliğini ölçen istatistiksel bir dağılım indeksidir.

$$gini(S) = i - \sum_{i=1}^{K} p(\frac{C_i}{n})^2 \quad (7)$$

Bu denklem (7), her biri sınıfına sahip kayıt içeren bir veri kümesi için belirtilmiştir. kümesi iki veya daha fazla alt kümesine bölünürse bölümlenmiş verinin 'Gini Index' i şu şekilde tanımlanmaktadır (Denklem 8).

$$gini(S) = i - \sum_{i=1}^{K} \frac{n_i}{n}\, gini\,(S_i) \quad (8)$$

Burada;
S_i, S deki C_i sınıfının göreceli olasılığıdır.
n, S kümesindeki kayıt sayısıdır.
K, sınıf sayısıdır.
n_i, S_i alt kümesindeki kayıt sayısıdır.

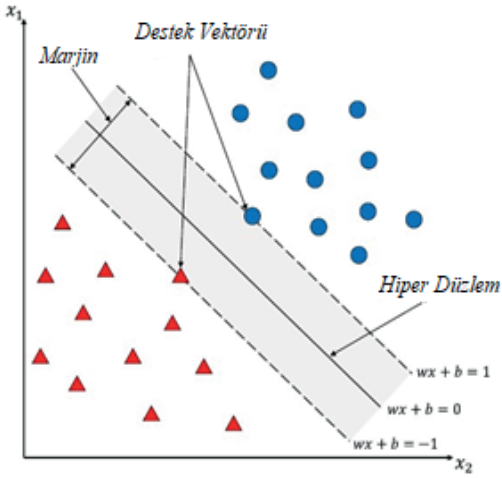
2.5.3. RF Yöntemi

Bu makine öğrenmesi algoritması, sınıf çıktısının bireysel ağaçlardan oluşan düğüm olduğu birçok karar ağacından oluşan bir topluluk sınıflayıcıdır. RF, yüksek tahmin doğruluğuna, sağlam istikrara, iyi toleransa ve aşırı uyum sorunu olmaksızın büyük sayılar yasasına sahiptir. Yapısal hasar tespiti için kullanılmış ve daha iyi bir performans sergilemiştir [13]. Bu algoritmaların parametreleri, ormandaki yüz ağaç sayısı ve maksimum derinliğin üç ayarlanması ile karakterize edilmektedir. Minimum örnek bölmesi ikidir ve bu iç düğümü bölmek için gereken minimum örnek sayısını göstermektedir. Minimum örnek yaprak, her sağ dalda eğitim örneklerini temsil eder ve minimum örnek yaprak değerleri bir olarak ayarlanmıştır. Maksimum özellikler değeri 'auto' olarak ayarlanmıştır, bu en iyi bölünmeyi ararken dikkate alınacak özellik sayısını temsil etmektedir.

2.5.4. SVM Yöntemi

Bu yöntem, kümelenmiş verileri sınıflandırmak ve regrese etmek için istatistiksel öğrenme teorisinden geliştirilmiş denetimli bir makine öğrenimi

tekniğidir. İki sınıflı doğrusal sınıflandırma durumunda olmak üzere, şekil 2 de görüldüğü gibi giriş vektörlerinin kümesini ve in sınıf etiketini temsil eden gözlemin bulunduğu bir eğitim veri kümesiyle, hiperdüzlem iki sınıfı marjinal bir mesafe ile ayıran düz bir çizgidir . Bu yöntemin amacı, marjin olarak adlandırılan ve hiperdüzlem ile marjinal çizgi boyunca yer alan en yakın noktalar arasındaki mesafe olarak tanımlanan bir marj kullanarak bir hiperdüzlem oluşturmaktır[14].



Şekil 2- Hiper düzlem grafiği

$$D(x) = w^T.x + b = c \qquad \text{-1 < c < +1 için} \tag{9}$$

Hiperdüzlem denklem (9) ile tanımlanabilir. Bu denklemte;
x, hiperdüzlem içindeki noktaları temsil eder,
w, hiperdüzlemin yönünü belirleyen ağırlıktır,
b, hiperdüzlemin sapması veya yerdeğiştirmesidir.

SVM, w'yi en aza indirerek veri ayırma marjını en üst düzeye çıkarmayı amaçlamaktadır. Bu optimizasyon problemi şu şekilde verilen ikinci dereceden programlama problemi olarak elde edilebilmektedir. Burada w Öklid normudur.

$$min\ \frac{w^2}{2}\ st\ y_i\left(w^T.x_i + b\right) \geq 1 \quad i = 1,2,\dots\dots,n \tag{10}$$

Bu çalışmada SVM algoritmasının hiper parametreleri, bir ceza parametresi olan C=100'ü belirlemek için lineer kernel fonksiyonunu ve bir ızgara aramasını kullandı. Kullanılan çoklu sınıf stratejisi bire birdir.

2.5.5.Navie Bayes Yöntemi

Naive Bayes yöntemi, nitelikler arasında bağımsızlığı varsayan Bayes teoremine dayanan olasılıksal bir sınıflandırma yöntemi olan bir dizi ML algoritmasıdır. Sınıf etiketlerinin bazı sonlu kümelerden çizildiği, nitelik değerlerinin vektörleri olarak temsil edilen problem örneklerine sınıf etiketleri atayan modellerle sınıflandırıcılar oluşturmak için basit bir teknik olarak kabul edilmektedir. Naive Bayes sınıflandırıcıları birçok gerçek durumda çok iyi çalışır ve istenen parametreleri tahmin etmek için az miktarda eğitim verisi gerektirmektedir. Bu çalışmada kullanılan Naive Bayes sınıfı, [15] sıralama için Naive Gaussian Bayes algoritmasını uygulayan Gauss dağılımıdır.

$$P(x_i \backslash y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y{}^2}} \exp(-\frac{(x_i-\mu_y)^2}{2\sigma_y{}^2}) \quad (11)$$

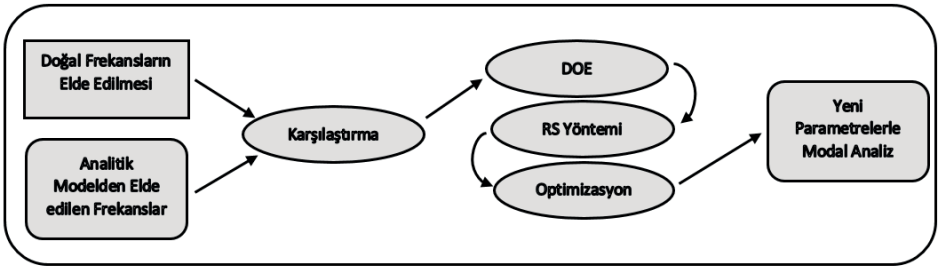
Burada σ_y ve μ_y maksimum olabilirlik kullanılarak tahmin edilmektedir. Naive Bayes sınıflandırıcıları oldukça ölçeklenebilirdir ve bir öğrenme problemine uygulandığında değişkenlerin fonksiyonunda birkaç lineer parametre gerektirir. 'Maximum-likelihood', closed-form'daki bir ifadenin değerlendirilmesiyle yapılabilmektedir [16].

3. Uygulama Olarak Seçilen Tarihi Yığma Minarede Hasar Tespiti

Makine öğrenimi algoritmalarını besleyecek güvenilir bir veri kümesi üretimi bir sorunun doğru bir şekilde tanımlanması ile başlamaktadır. Bu çalışmada tarihi yığma bir minareden deneysel ve analitik metodlarla elde edilen frekanslar kullanılmıştır. Şekil 3'teki akış şemasında görüldüğü gibi deneysel ve analitik metodlarla elde edilen frekans değerleri kıyaslanmış ve üç aşamadan oluşan optimizasyon işlemi uygulanmıştır. Bu aşamalardan ilki (DOE) doğal frekanslara yaklaşmayı hedefleyen yaklaşık 600 örnek grubu içermektedir. İkinci adım, minareyi optimize etmekte kullanılan on bölüme ait elastisite modüllerinden oluşan girdi parametrelerinin çıktı parametrelerine olan etkilerinin incelendiği aşamadır. Üçüncü adımda ise doğal frekanslara yakın en uygun değerlerden üç adet aday noktanın önerildiği aşama yer alır. Bu aşamada en uygun çıktı sonuçları veren girdi parametreleri belirlenmiş olmaktadır. Optimizasyon aşamasında elde edilen girdi parametreleri ANSYS Workbench'te yeniden modal analize tabi tutularak minarenin sağlıklı haline ait analitik frekans değerleri elde edilmiş olmaktadır. Bu frekans değerleri referans alınarak, DOE aşamasında elde edilen örneklerin frekans değerleri hasar indekslerine dönüştürülerek çalışmada kullanılan veriler elde edilmiştir.

3.1. Hasar İndeksine Dayalı Veri Setlerinin Elde Edilmesi

Bir yapıda meydana gelen yapısal bir hasar, yapının dinamik ve mekanik özelliklerinde değişikliklere sebep olur. Bu çalışmada inşa edildiği günden beri birçok iç ve dış etkiye maruz kalmış bir tarihi yığma minarenin hasar tespiti üzerine çalışılmıştır. Minare yaklaşık 36 m boyunda olup geometrisi ve yüksekliği farklı birçok bölümün bir araya gelmesiyle oluşturulmuştur. Bu kadar yüksek bir yapının inşa edildiği günden beri farklı hasar durumları da biriktirmesi olağandır. Örneğin, minarede gerilme yığılmalarının oluştuğu bölgelerde sıklıkla taş düşmesi veya bağlayıcı malzemenin boşaldığı gözlemlenirken, rutubete bağlı olarak minare duvarlarında kullanılan malzemenin fiziksel ve kimyasal yapısında bozulmalar oluşabilir. Ayrıca tarihi yığma yapılarda görülen çiçeklenme gibi durumlarda hasar durumlarına verilebilecek birçok örnekten biridir.



Şekil 3- Akış şeması

Bu çalışmada ANSYS Workbench ile elde edilen veri grubundan yaklaşık 600 örnek şekil 1 gösterildiği gibi her bir parametre minarenin bir hasar bölgesini gösterecek şekilde seçilmiştir. Veri grubundaki örnekler girdi parametrelerinin elastisite modülü değerlerine karşılık, dört frekans değerini çıktı olarak sunmaktadır. parametrelerinde elastisite modülleri sağlıklı modelin değerlerine kıyasla belli oranlarda değişerek o bölgelerde meydana gelen hasar miktarını temsil etmektedir. Tüm bölümlerdeki hasar miktarlarının toplamı minaredeki hasar oranının elde edilmesini sağlamıştır. 600 adet örnekten tekrar eden hasar oranları seçilip hasar gruplar oluşturulmuştur. Böylece 3.28%, 6.71%, 7.91%, 13.37% ve 29.08% olmak üzere 5 farklı hasar grubu ve toplam 272 adet örnek elde edilerek hasar indeksine dayalı veri seti tablo 3 te gösterildiği gibi elde edilmiştir.

Bu çalışmada hasar indeksi hesaplanırken çok küçük sayılar kullanmaktan kaçınmak için hasar indeksi değeri birden çıkarılmıştır (Denklem 12). Böylece sağlıklı durumu '1' değerindeki hasar indeksi temsil ederken, hasar indeksinin '0' a yaklaşması hasar şiddetinin arttığını göstermektedir.

$$DI = 1 - \frac{f_i^u - f_i^d}{f_i^u} \tag{12}$$

3.2. Hasar Değerlendirmesi

Bu çalışmada denklem (12), yapının hasarlı durumuna ait frekanslarla (f_i^d) hasarsız duruma ait frekanslarını (f_i^u) karşılaştırır. Veri seti, birinci, üçüncü, beşinci ve altıncı modlara ait frekans değerleriyle hasarsız durum için f_1= 0.77726 Hz, f_3 = 3.2647 Hz,f_5 = 8.7464 Hz ve f_6 =10.018 Hz olan dört frekansı kullanılarak oluşturulmuştur. Veri seti 5 farklı hasar şiddeti için toplam 272 örnekten oluşmaktadır. Bu veriler ML algoritmalarını eğitmek ve test etmek için HI değerlerini kullanmıştır. Tablo 3 kullanılarak hasar indeksleri HI 1- 3, HI 1- 5, HI 1- 6 şeklinde ikili gruplar halinde düzenlenerek kendi arasında kıyaslanmıştır. Bu gruplara ait grafikler Şekil 4'te gösterilmiştir.

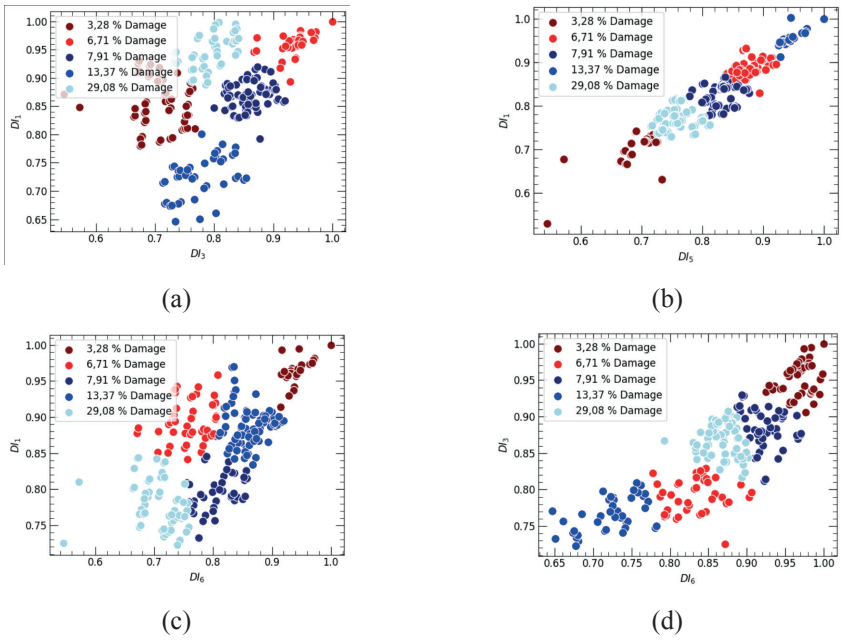
Tablo 3- Hasar indeksine dayalı veri seti

Parametre Değişimi	HI-1	HI-3	HI-5	HI-6	Hasar Grubu	Toplam
3.28%	1.000	1.000	1.000	1.000	3,28 Hasar	
3.28%	0.945	0.984	1.000	0.995	3,28 Hasar	**51**
…	**…**	**…**	**…**	**…**	**…**	
6.71%	0.946	0.976	0.956	0.969	6,71 Hasar	
6.71%	0.907	0.861	0.890	0.888	6,71 Hasar	**73**
…	**…**	**…**	**…**	**…**	**…**	
7.91%	0.925	0.953	0.940	0.955	7,91 Hasar	
7.91%	0.925	0.954	0.940	0.955	7,91 Hasar	**49**
…	**…**	**…**	**…**	**…**	**…**	
13.37%	0.836	0.996	0.848	0.951	13,37 Hasar	
13.37%	0.783	0.921	0.790	0.860	13,37 Hasar	**48**
…	**…**	**…**	**…**	**…**	**…**	

29.08%	0.684	0.841	0.688	0.767	29,08 Hasar	**51**
29.08%	0.677	0.796	0.667	0.773	29,08 Hasar	
…	…	…	…	…	…	
					Toplam	**272**

Şekil 4'teki grafikler birinci, üçüncü, beşinci ve altıncı frekans değerlerine ait hasar indekslerinin kıyaslanmasını göstermektedir. Şekil 4(a) da birinci ve üçüncü frekanslara ait hasar indekslerinin karşılaştırması görülmektedir. Şekil 4(b) de birinci ve beşinci frekanslara ait hasar indeksleri, Şekil 4(c) de birinci ve altıncı frekanslara ait hasar indeksleri, Şekil 4(d) ise üçüncü ve altıncı frekanslara ait hasar indeksleri kıyaslanmıştır. Farklı frekanslara ait hasar indekslerinin kıyaslanmasındaki amaç farklı hasar indeksi değerlerine sahip olan indekslerin aynı hasar grubunda toplandığını göstermektir.

HI hasar indeksi yapının sağlıklı kabul edilen durumuna ait modal frekansların kullanılmasıyla elde edilen hasar indekslerini içermektedir. Hasar grupları 3.28%, 6.71%, 7.91%, 13.37% ve 29.08% olmak üzere beş tanedir. Bu çalışmada kullanılan denetimli



Şekil 4-Hasar indekslerinin kıyaslanması

Tablo 4- Denetimli ML algoritmalarının değerlendirme metrikleri

Performans	Metrikler	SVM	KNN	NB	RF	DT
Doğruluk	HI-1-3	0.98	0.98	0.96	0.96	0.93
	HI-1-5	0.95	0.96	0.98	0.98	0.96
	HI-1-6	0.95	0.91	0.93	0.96	0.95
	HI-3-6	0.96	0.96	0.96	0.98	0.98
Hassasiyet	HI-1-3	0.98	0.98	0.96	0.96	0.93
	HI-1-5	0.95	0.96	0.98	0.98	0.96
	HI-1-6	0.95	0.91	0.93	0.96	0.95
	HI-3-6	0.96	0.96	0.96	0.98	0.98
Geri Çağırma	HI-1-3	0.98	0.98	0.96	0.96	0.93
	HI-1-5	0.95	0.96	0.98	0.98	0.96
	HI-1-6	0.95	0.91	0.93	0.96	0.95
	HI-3-6	0.96	0.96	0.96	0.98	0.98
*F*1 puanı	HI-1-3	0.98	0.98	0.96	0.96	0.93
	HI-1-5	0.95	0.96	0.98	0.98	0.96
	HI-1-6	0.95	0.91	0.93	0.96	0.95
	HI-3-6	0.96	0.96	0.96	0.98	0.98

makine öğrenmesi yöntemlerinin Tablo 4'te görüldüğü gibi Doğruluk, Hassasiyet, Geri Çağırma ve F 1 puanı metrik kriterlerine göre değerlendirme sonuçları görülmektedir. Doğruluk, modelin tüm pozitif sınıf sınıflandırmalarını ne kadar doğru tahmin ettiğini gösterir. Geri çağırma, veri kümesindeki tüm olumlu örneklerden yapılan olumlu sınıf tahminlerinin sayısını temsil eder ve F1 puanı, kesinlik ile geri çağırma arasındaki ortalamadır. Hasar tespiti tahmin doğruluğu karşılaştırması, dört HI kıyas grubunun dört frekans (f1, f3, f5 ve f6) için ML algoritmaları arasında % 93 ile 98 arasında değişmektedir.

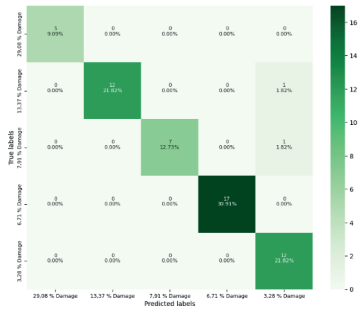
Tüm algoritmalar da kabul edilebilir hasar tahmini değerleri elde edilmiştir. Ancak tüm metriklerde en iyi sonucu veren algoritma Rastgele orman algoritmasıdır. RF algoritması, %96 ile 98% arasında değişen en yüksek ölçü m performansına sahiptir. Bu algoritmanın HI-1-3, HI-1-5, HI-1-6, HI-3-6 hasar indeksine ait kıyaslamaları 'Confusion' matris formatında Şekil 5'te verilmiştir. Matrisler incelendiğinde hasar tahminin doğru bir şekilde yapıldığı köşegen elemanlarda toplanan eleman sayılarından anlaşılmaktadır. Köşegen dışında



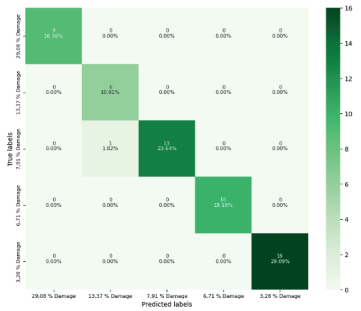
HI-1-3



HI-1-5



HI-1-6

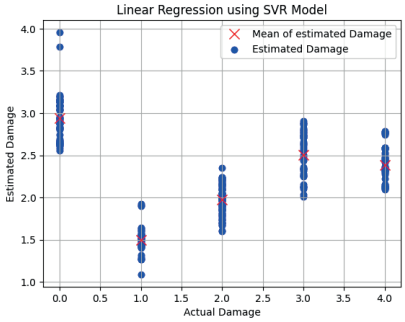


HI-3-6

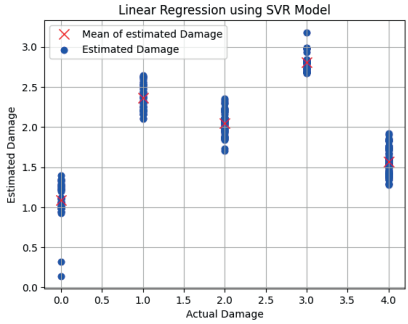
Şekil 5- RF algoritmasına ait matris değerleri

bulunan elemanlar ölçüm performansındaki kayıpların sebepleridir. İncelenen örneklerden HI-1-3, HI-1-5, HI-3-6 da köşegen dışında kalan 1'er örneğin 98% 'lik performans değerine sebep olduğu görülürken, HI-1-6 da köşegen dışında kalan 2 örneğin 96%' lık hasar tespiti performansına sebep olduğu tespit edilmiştir.

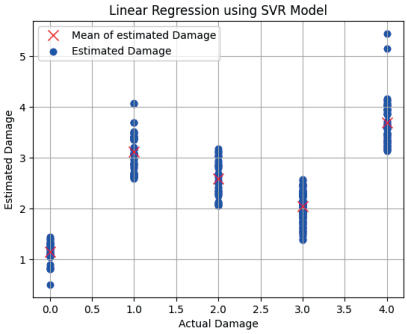
Çalışmada lineer regresyon sonucu elde edilen hasar tahmin istatistiklerine ait grafikler, dört kıyaslamayı içerecek biçimde Şekil 6'da gösterilmiştir. Lineer regresyon modeli olarak SVR modeli seçilmiştir. SVR modeli, lineer bir fonksiyonla veri noktaları arasındaki ilişkiyi modellemeye çalışır. Model, veri noktalarının lineer bir regresyon hattına en iyi şekilde uydurulmasıyla elde edilir. Bu model kullanılarak oluşturulan grafiklere göre gerçek hasar durumları ile tahmin edilen hasar durumlarının tutarlı olduğu tespit edilmiştir.



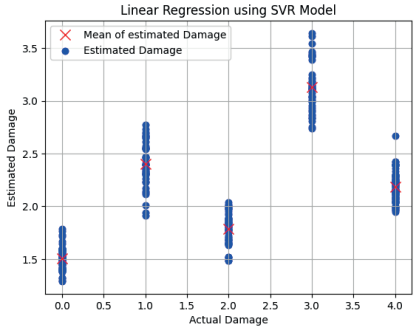
HI-1-3



HI-1-5



HI-1-6



HI-3-6

Şekil 6- Gerçek hasar ve tahmin edilen hasar durumları

4. Sonuçlar

Tarihi yığma minareler yüzyıllar boyunca birçok iç ve dış etkene maruz kalırlar ve hasar biriktirirler. Minareler gibi fazla yüksekliğe sahip yığma yapılarda hasar oluşumu yapının belli başlı bölgeleriyle sınırlandırılamaz, yapı geneline farklı biçimlerde dağılmıştır. Bu durum bu yapıların yapı sağlığını takip etmeyi zorlaştırmaktadır. Son yıllarda yapay zeka ürünlerinin özellikle teknoloji ve mühendislik alanlarındaki kullanımı bu alandaki gelişmeleri hızlandırmıştır.

Bu çalışma deneysel ve analitik yöntemlerin yanı sıra makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak hasar tespiti çalışmaları yapılmıştır. Çalışmanın ilk adımında minarenin sonlu elemanlar modeliyle elde edilen frekans değerleri, deneysel yöntemlerle elde edilen frekans değerleriyle kıyaslanmıştır. Analitik yöntemle elde edilen frekans değerlerini deneysel metodla elde edilen frekans değerlerine uyumlu hale getirmek için optimizasyon işlemi

yapılmıştır. Bu işlem sırasında makine öğrenmesi için gereken veri grupları da sağlanmıştır. Elde edilen veriler makine öğrenmesinde kullanıma uygun hale getirilip, dört farklı denetimli ML algoritması kullanılarak analizler yapılmıştır. Kullanılan algoritmalar kNN, SVM, DT ve RF'dir. Bu algoritmalar ile elde edilen sonuçlar değerlendirme metriklerine göre kıyaslanmış ve 93-98% aralığında başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu algoritmalar arasında en yüksek başarıyı 96-98% oranıyla 'Random Forest' algoritması göstermiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 1001-Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından desteklenen tarafından desteklenen "Tarihi Yığma Minarelerin Video Kamera Tabanlı Yapı Sağlığının İzlenmesi ve Derin Öğrenme Yöntemine Dayalı Uzun Dönemli Karar Verme Modeli Geliştirilmesi (Proje No: 222M140)" başlıklı araştırma projesinin bir ürünüdür.

Desteklerinden dolayı Vakıflar Genel ve Bölge Müdürlüğüne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

[1] Çalık, İ, Tarihi cami ve minarelerin deneysel dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ve restorasyon etkilerinin değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2017.

[2] Alpaslan, E, Hacıefendioğlu, K, Yılmaz, MF, Demir, G, Mostofi, F, Toğan, V, Structural Modal Calibration of Historical Masonry Arch Bridge by Using a Novel Deep Neural Network Approach, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 48.1, 329-352, 2024.

[3] Zhang, GQ, Wang, B, Li, J, Xu, LY, The application of deep learning in bridge health monitoring: a literature review, Advances in Bridge Engineering, 3.1, 22, 2022.

[4] Zalaghi, S, Aziminejad, A, Rahami, H, Moghadam, AS, Hosseini, MH, Damage Identification in Steel Girders of Highway Bridges Utilizing Vibration Based Methods and Convolution Neural Network in the Presence of Noise, Journal of Nondestructive Evaluation, 43.2, 1-24, 2024.

[5] Civera, M, Calamai, G, Fragonara, LZ, System identification via fast relaxed vector fitting for the structural health monitoring of masonry bridges, Structures, Elsevier, 30, 2021.

[6] Alpaslan, E, Tarihi yığma köprü hasarlarının analitik model ve deneysel yöntemlerle belirlenmesi, Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2019.

[7] de Sousa, AASR, da Silva Coelho, J, Machado, MR, Dutkiewicz, M, Multiclass supervised machine learning algorithms applied to damage and assessment using beam dynamic Response, Journal of Vibration Engineering & Technologies, 11.6, 2709-2731, 2023.

[8] Machado, MR, Dos Santos, JMC, Reliability analysis of damaged beam spectral element with parameter uncertainties, Shock and Vibration, 2015.

[9] Barreto, LS, Machado, MR, Santos, JC, Moura, BB, Khalij, L, Damage indices evaluation for one-dimensional guided wave-based structural health monitoring, Latin American Journal of Solids and Structures, 18, e354, 2021.

[10] Sinou, JJ, A review of damage detection and health monitoring of mechanical systems from changes in the measurement of linear and non-linear vibrations, Mechanical vibrations: measurement, effects and control, 643-702, 2009.

[11] Pedregosa, F, Grisel, O, Blondel, M, Prettenhofer, P, Scikit-learn: Machine learning in Python, the Journal of machine Learning research,12, 2825-2830, 2011.

[12] Malekloo, A, Ozer, E, AlHamaydeh, M, Girolami, M, Machine learning and structural health monitoring overview with emerging technology and high-dimensional data source highlights, Structural Health Monitoring, 21.4, 1906-1955, 2022.

[13] Zhou, Q, Ning, Y, Zhou, Q, Luo, L, Lei, J, Structural damage detection method based on random forests and data fusion, Structural Health Monitoring, 12.1, 48-58, 2013.

[14] Otchere, DA, Ganat, TOA, Gholami, R, Ridha, S, Application of supervised machine learning paradigms in the prediction of petroleum reservoir properties: Comparative analysis of ANN and SVM models, Journal of Petroleum Science and Engineering, 200, 108182, 2021.

[15] Flach, PA, Lachiche, N, Naive Bayesian classification of structured data, Machine learning, 57, 233-269, 2004.

[16] Russell, SJ, Norvig, P, Artificial intelligence: a modern approach, Pearson, 2016.

MARDİN'İN ERYERİ MAHALLESİNDE BULUNAN GELENEKSEL EVLERİN YAPISAL KORUMA SORUNLARI

Yasemin ERCAN GÜNDÜZ[1], Mine TURAN [2], Engin AKTAŞ[3]

[1]Y. Mimar, Design 04 Office, mimaryaseminercan@gmail.com
[2]Prof. Dr., İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, mineturan@iyte.edu.tr
[3]Prof. Dr., İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, enginaktas@iyte.edu.tr

Özet

Mardin evleri, geleneksel yapım sistemleri ve yerel malzeme kullanımı ile Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nin geleneksel ev tipolojisinin önemli bir parçasıdır. Zaman içerisinde kullanıcıları tarafından değişime uğrayan yapılar, yapısal hasarların onarımı aşamasında ve kullanım alanlarının kontrolsüz genişletilmesi sırasında istenmeyen müdahalelere maruz kalmaktadır. Bu tür müdahaleler yapısal koruma sorunlarına neden olmaktadır. Bu çalışma kapsamında Mardin ili Artuklu ilçesine bağlı Eryeri mahallesinde bulunan ve geleneksel yapım tekniklerini barındıran konutlar yapısal koruma sorunları çerçevesinde incelenmiştir. Alanda seçilen sekiz yığma taş yapının yapım sistemleri, malzeme kullanımları ve mevcut yapısal hasarları, yapıların geçirdiği değişim aşamaları ile belgelemiştir. Mardin ili ve çevresinde bulunan benzer yapım tekniklerini barındıran tarihi yapılar ve köyler de bu kapsamda incelenmiş, karşılaştırma çalışması yapılmıştır. Yapısal elemanların kayıpları ile sonuçlanan yıkımlar, bakımsızlık ve yapılara eklenen betonarme ekler en yaygın yapısal koruma sorunları olarak belirlenmiştir. Koruma planlaması kapsamında betonarme eklerin önlenmesi, fazla yüke sebep olan eklerin kaldırılması hususu önemlidir.

Anahtar Sözcükler: Geleneksel evler, Yapısal hasarlar, Yapım sistemleri, Mardin Evleri, Belgeleme, Tonoz

Abstract

Mardin houses are a significant part of the traditional house typology of the Southeastern Anatolia with their traditional construction systems and use of local materials. Buildings that have been changed by their users over time are exposed to undesirable interventions during the repair phase of structural failures and the expansion of their usage areas. These intervetions cause structural preservation problems. Within the scope of this study, houses located in Eryeri neighborhood of Artuklu district of Mardin province and containing traditional construction techniques were examined within the framework of structural conservation problems. The construction systems, material usage and structural failures of eight stone masonry buildings selected in the area were documented, along with the stages of change that the structures have gone through. Historical buildings and villages with similar construction techniques in Mardin province and its surroundings were also examined in this context and a comparison study was made. Demolitions resulting in loss of the structural elements, neglect, and reinforced concrete annexes addes to the buildings are the most crucial structural conservation problems. Within the scope of conservation planning, it is important to prevent reinforced concrete additions and remove that additions that cause overload.

Keywords: Traditional houses, Structural failures, Construction systems, Mardin houses, Documentation, Vault

1. Giriş

Türkiye'de son 20 yıldır tartışılan, kırsal mirasın tescili ve koruma amaçlı imar planlarının hazırlanması sürecinin doğru ve planlı bir şekilde yürütülmesi üzerinde durulması gerekilen önemli konulardan birisidir. Kırsal mimarinin kent mimarisi kadar ön planda olmaması, genellikle belirli bir plan veya program olmadan inşa edilmesi ve sürekli müdahalelere maruz kalması gerek yetkililer gerekse maliklerce yeterli desteğin verilmemesi gibi çeşitli nedenler kırsal mirası korumanın önünde engel oluşturmaktadır [1].

Tarihi kiliseler, manastırlar, camiler, medreseler, hanlar, hamamlar, çarşılar, çeşmeler ve geleneksel evler gibi ekonominin gelişimini ve refah düzeyini gösteren mimari eserlerin yoğun bir şekilde bulunduğu Mardin, Güneydoğu Anadolu bölgesinde Gaziantep, Şanlıurfa ve Diyarbakır'ın yanı sıra kendine özgü kentsel ve kırsal mimarisiyle öne çıkıyor [2]. Özgün konut dokusunun günümüze kadar korunabildiği nadir kentlerden biri olan Mardin'de görülen eğimli yerleşim sistemi kırsal alanlarda da karşımıza çıkmaktadır [3].

Mardin'in Artuklu ilçesine bağlı Eryeri mahallesinde yer alan evler, geleneksel Mardin evlerinin yapım sistemlerinden, malzeme kullanımlarından, yörenin kültüründen ve tipolojisinden etkilenerek şekillenmiştir. Ölçek bakımından Mardin evlerine kıyasla daha küçük olmaları sebebiyle mekan çeşitliliğinde ve taş işçiliğinde geleneksel Mardin evlerinin izleri nadir olarak görülse de bölgede incelenmek üzere seçilen tüm evler Mardin evleri ile aynı yapım tekniği ve malzeme ile inşa edilmiştir [4]. Bölgede oluşturulan ortak mimari kültür zaman içerisinde değişime uğramıştır ve uğramaya devam etmektedir. Yapısal hasarların incelendiği evler günümüze ulaşmış olsada istenmeyen müdahaleler sonucunda yapılar bütünlüğünü ve özgünlüğünü kaybetmiştir. Özellikle betonarme ilaveler ile yapıların taşıyabileceği yük miktarının arttığı görülmektedir. Kırsal alanlarda koruma sorunlarına bir örnek olan Eryeri, yok olmakta olan bir kültür mirasının korunması ve yaşatılması adına önem teşkil etmektedir.

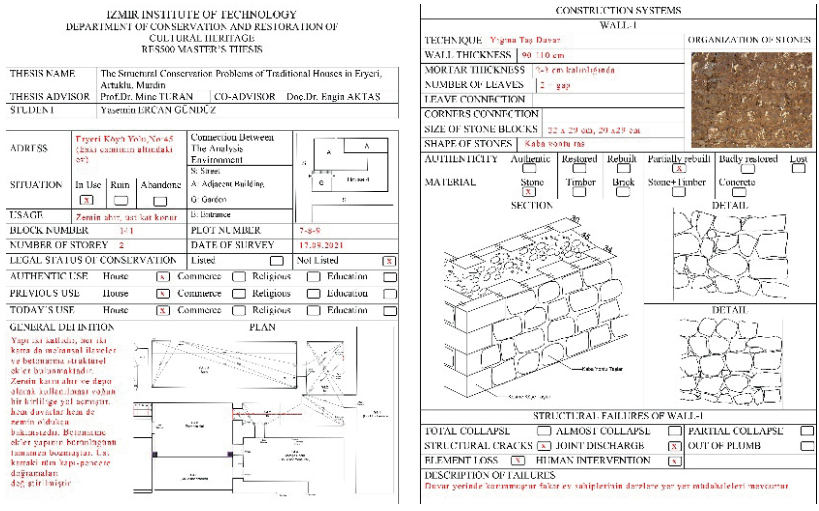
2. Evlerin İncelenmesi

Eryeri, Mardin şehir merkezine 7 km uzaklıkta yer alan yakın bir köydür. Günümüze kadar Mardin'in mimari mirası ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen Eryeri ile ilgili bilimsel bir çalışma bulunmamak-

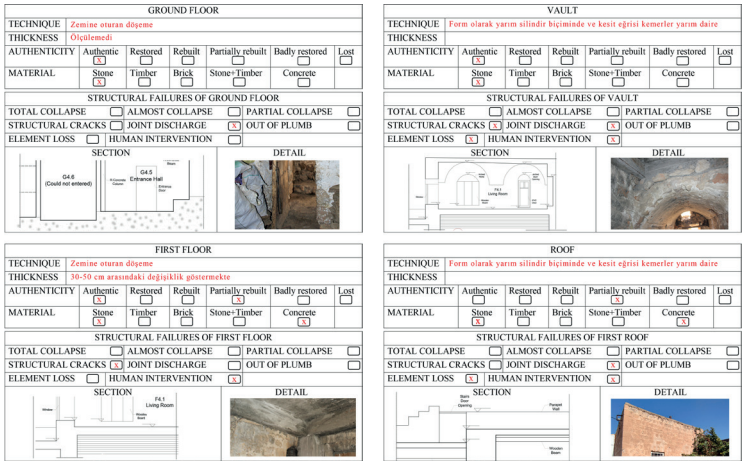
tadır. Geleneksel Mardin Evleri'nin izlerini taşıyan Eryeri'nde daha önce herhangi bir restorasyon çalışması yapılmamıştır. Kendi haline bırakılmış bu köyün evleri niteliksiz betonarme ilavelerle sarmalanmıştır. Bu gibi koruma sorunları sebebiyle evlerin özgünlükleri ve bütünlükleri tehdit altındadır.

Geleneksel Eryeri Evleri özelinde hazırlanan çalışmada koruma sorunları strüktürel bağlamda incelenip, temel sebepler yapılan karşılaştırmalı çalışmalar ile belirlenmiştir. Bu kapsamda yapılan ilk koruma çalışması olması sebebiyle çalışma Mardin ve çevre köyler için önemlidir.

Çalışma kapsamında kütle kompozisyonları, yapısal elemanlar, yapısal değişiklikler, yapım aşamaları ve yapısal hasarları içeren envanter fişleri hazırlanmıştır. Şekil 1 ve Şekil 2'de 3 numaralı ve 4 numaralı evlerin incelenmesi sırasında tamamlanan envanter fişleri yer almaktadır. Envanter fişlerinin yanı sıra yapılan malzeme ve yapım tekniği analizleri sırasında kullanılmak üzere üç boyutlu görselleştirme çalışmaları hazırlanmıştır. Yapıların tüm detayları incelenmiştir, belirli aralıklarla gerçekleştirilen arazi çalışmaları sonuçları değerlendirilmiştir. Çalışma sonunda seçilen yapılar hem kendi aralarında hem de çevre köylerde tespit edilen benzer yapılar ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 1. Envanter fişinin birinci ve ikinci sayfaları



Şekil 2. Envanter fişinin üçüncü ve dördüncü sayfaları

Şekil 3'te işaretlendiği üzere, çalışma kapsamında incelenmiş sekiz evden altısı su kanalının doğusunda ve diğer ikisi su kanalının batısında yer almaktadır.



Şekil 3. Çalışma alanı ve evlerin konumlanışı

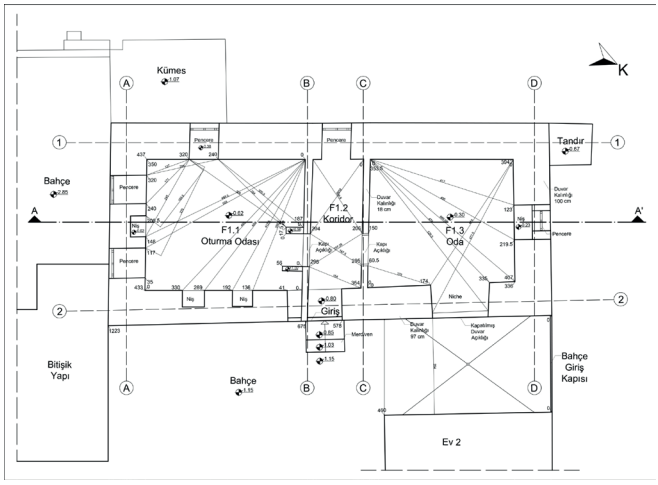
2.1. 1 Numaralı Ev

1 numaralı ev iki katlı yığma taş bir yapıdır ve katların birbirinden bağımsız girişleri vardır: Zemin katın girişi güneydoğuda, birinci katın girişi ise kuzeydoğudadır. Arazinin oldukça eğimli olmasından kaynaklı olarak Şekil 4'te görüldüğü üzere güney ve batı cephesinden bakıldığında iki katlı, kuzeyden ve doğudan bakıldığında ise tek katlı olarak görülmektedir.



Şekil 4. 1 numaralı ev

Şekil 5'te birinci kat planı yer verilen 1 numaralı ev, zemin katta bir oda ve birinci katta üç odadan oluşur: G1.1, F1.1, F1.2 ve F1.3. G1.1 çatı örtüsü beşik tonozdur. F1.1, evin ana yaşam alanıdır ve Şekil 6'da F1.1'in çatısının tamamen çöktüğü görülmektedir. Birinci katın duvarının zemin katın dış yüzeyinden geriye doğru çekilmiş olması evin iki katının farklı yapım evrelerine işaret eder. Zemin katta beşik tonoz ve birinci katta ahşap tavan örtü olmak üzere iki farklı üst örtü bulunduğu görülmektedir. Yapının taşıyıcı duvarları 90-100 cm kalınlığındadır. Duvarlar kaba yontma taşlar ve harçlı moloz bir çekirdekten oluşmaktadır. Tüm taşlar 2-3 cm kalınlığında harçla birleştirilmiş ve dış duvarlar sıvasızdır.



Şekil 5. 1 numaralı evin birinci kat planı



Şekil 6. 1 numaralı evin F1.1 odası ve çöken çatısı

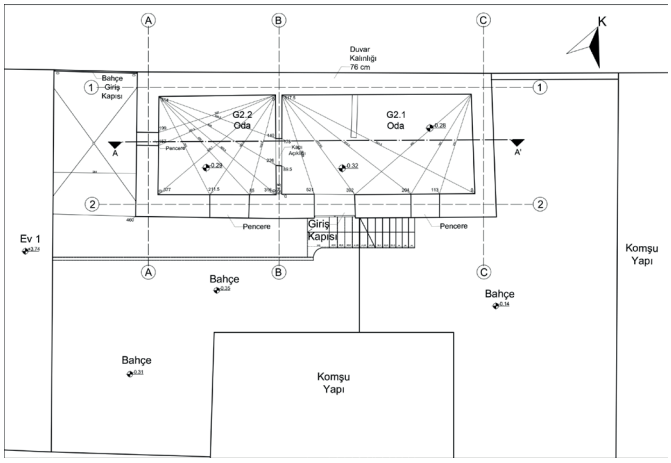
1 numaralı ev üç farklı yapım dönemi sunar: Birinci dönem otantik kütlenin zemin kat olarak inşa edilmesidir. Birinci katın, zemin kattaki duvarlara benzer yapım teknikleriyle ancak ahşap tavan üst örtü gibi farklı taşıyıcı elemanlarla ilavesi ikinci dönemde yapılmıştır. Üçüncü ve son dönem ise, yapıya bitişik olarak inşa edilen tandır ve kümes gibi bölümlerin ve birinci kattaki bölme duvarların ilavelerini kapsar.

Yapısal koruma sorunları açısından detaylı olarak incelendiğinde; 1 numaralı evde acil müdahale gerektiren ciddi yapısal problemler var. İlk hasar F1.1'deki çatının tamamen çökmesidir. Bu oda tüm hava koşullarına açıktır ve bu durum daha fazla yapısal hasara sebep olacaktır. Öte yandan, zemin kat ile aynı dönemde inşa edilmediği anlaşılan birinci katın sonraki dönemlerde yapıya ilavesi, zemin katın özgün beşik tonoz örtüsüne ekstra yük binmesine sebep olmaktadır. Herhangi bir mühendislik hesaplaması yapılmadan yapılan bu ilaveler beşik tonoz örtüde veya bu örtüyü taşıyan yığma duvarlarda yapısal çatlaklar gibi olası hasarlara yol açabilir.

2.2. 2 Numaralı Ev

2 numaralı ev iki katlı yığma taş bir yapıdır. Şekil 7'de yer alan giriş kat planında yer aldığı üzere 1 numaralı ev ile ortak L şeklinde büyük bir bahçesi vardır. Şekil 8'de görülen sivri kemerle taçlandırılmış kapı bu bahçenin ana giriş kapısıdır. Giriş kapısından girildiğinde 1 numaralı ev doğuda, 2 numaralı ev batıda yer alır. Evin iki katı bağımsız girişlere sahiptir. Zemin

katın girişi güney cephesinde olup, aynı cephenin doğu tarafında birinci kata ulaşmak için bir merdiven bulunmaktadır.



Şekil 7. 2 numaralı evin giriş kat planı



Şekil 8. 2 numaralı ev ve bahçe giriş kapısı

2 numaralı evin düşey yapı elemanları ağırlıklı olarak 70-75 cm kalınlığındaki taşıyıcı duvarlardır. 1. Tip duvar olarak sınıflandırılan bu duvarlar, dış yüzeyde çeşitli küçük moloz taşlardan ve harçlı moloz çekirdekten oluşmaktadır. Tüm taşlar harçla birleştirilir ve harç kalınlığı 2 cm civarındadır. Evin zemin katının iç duvarlarındaki sıva ve boya tabakaları, duvarlardaki bozulmalar sayesinde gözle görülmektedir. Şekil 9'da görüldüğü üzere sıvanın kalınlığı 3 cm civarındadır. Duvarların dış yüzeyleri sıvasızdır ve cephede yapılan harç onarım tadilatları sırasında harç taşların üzerine bilinçsizce yayılmıştır.



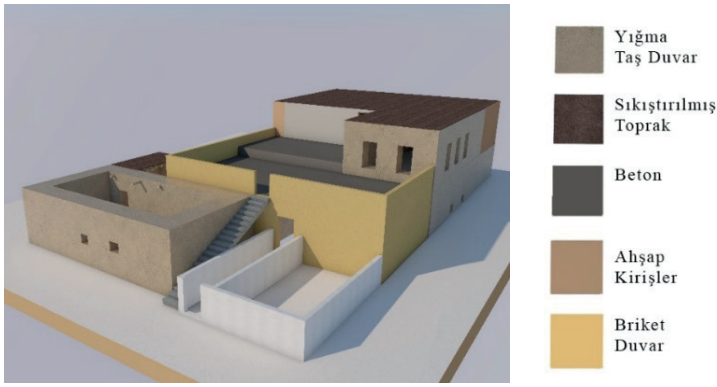
Şekil 9. 2 numaralı evin duvar katmanları

İki farklı yapım dönemi görülür. İlk dönem, otantik kütlenin yığma taş duvarlar ve çapraz tonoz ile örtülü zemin kat ve ahşap tavan ile örtülü birinci kat olarak inşa edilmesini içerir. Birinci katın ahşap üst yapısının özgünlüğü tartışılır. Taşıyıcı elemanlar patinalıdır ancak yapım tekniği özgün görünmemektedir. Birinci kata erişim için kullanılan merdiven de özgün değildir. Bu iki belirsiz durum sebebiyle birinci katın sonradan ilave edilmiş olma olasılığı yüksektir. Zemin katta ve birinci katta yer alan tuğla yığma duvar şeklinde inşa edilen bölme duvarların ilavesi ikinci dönemde yapılmıştır.

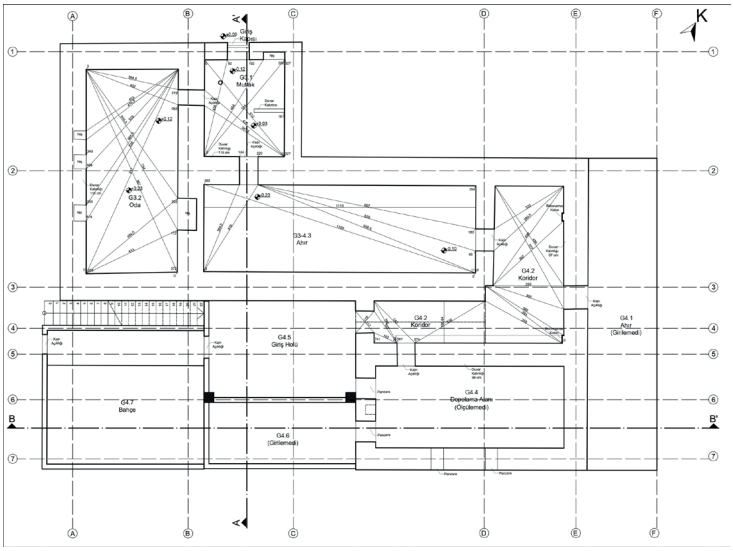
Yapısal koruma sorunları açısından detaylı olarak incelendiğinde acil müdahale gerektiren yapısal hasarlar görülmektedir. Özellikle giriş kat duvarlarında harçlarının boşaldığı ve tonoz örtünün yapısal çatlakları görülmektedir.

2.3. 3 Numaralı ve 4 Numaralı Evler

Şekil 10'da yer alan üç boyutlu görselleştirme çalışmasında 3 numaralı ve 4 numaralı evler yer almaktadır. Sol kısımda yer alan tek katlı ve üst örtüsü olmayan yapı 3 numaralı evdir. Sağ kısımda yer alan ve birbirinden bağımsız iki farklı kat girişleri bulunan yapı ise 4 numaralı evdir. Bu evler bitişik nizamlıdır ve Şekil 11'de yer alan giriş kat planında G3-4.3 olarak adlandırılan ortak bir mekana sahiptirler.



Şekil 10. 3 ve 4 numaralı evlerin üç boyutlu malzeme görselleştirme çalışması



Şekil 11. 3 ve 4 numaralı evlerin giriş kat planı

3 numaralı ev iç ve dış yüzeyleri sıvalı yığma taş duvarlar ile inşa edilmiştir. Duvar kalınlıkları yaklaşık 100 cm'dir. Evin girişi kütlenin kuzey kısmındadır ve üç odadan oluşmaktadır. Şekil 12'de boyutları yaklaşık 8,34 m x 3,72 m olan ve yaşam alanı olarak kullanılan oda görülmektedir. Bu evde mutfak veya tuvalet için ıslak hacim mevcut değildir.

4 numaralı ev içeride sıvalı, dış cephelerde sıvasız olacak şekilde kalınlıkları 80-95 cm aralığında olan yığma taş duvarlardan oluşmaktadır. Duvarların kalınlıklarının birbirinden farklı olması, bu iki bitişik nizam evin inşa dönemlerinin farklı olmasına dair bir ipucu verebilir.



Şekil 12. 3 numaralı ev ve yıkılan üst örtüsü

3 ve 4 numaralı evler dönemsel eklere sahiptir. Özelikle 4 numaralı ev kütle kompozisyonunu değiştiren üst kat ilavesi, beton kolon ve kirişler gibi yapısal elemanların ve mimari elemanların eklenmesi gibi değişikliklere sahiptirler. 3 numaralı ev uzun yıllar önce terkedilmiştir. Sahipleri bu evi terk ettikten sonra bazen depo bazen de hayvanlar için ahır olarak kullanmıştır. Kullanım süresince duvar ilaveleri yapılmıştır fakat günümüze sadece yıkıntıları ulaşmıştır. Yapının üst örtüsü 1 ve 2 numaralı odalarda tamamen çökmüştür ve her türlü hava koşuluna açıktır.

4 numaralı evin yapısal aşamaları, kullanılan malzemelerin farklı olması ile çok net bir şekilde okunmaktadır. Şekil 13'te yer alan güney cephesi kütle kompozisyonu olarak üç ana evreye sahiptir. Birincisi yığma taş duvarlı, tonoz örtüşü, kemerli pencereli, iki katlı otantik kütledir. İkinci dönem ilavesi olarak betonarme taşıyıcı sistem ile ilave edilen ön kısımdır. Son dönem de ise üst kata erişimi sağlayan merdivenin değişimi, ön kısma bahçe duvarı örülmesi gibi ilaveler görülür.



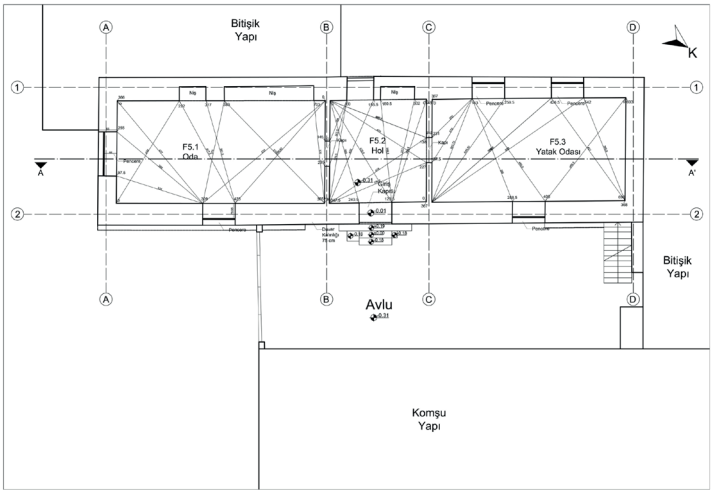
Şekil 13. 4 numaralı yapının güney cephesi

Yapısal koruma sorunları açısından detaylı olarak incelendiğinde; 3 numaralı yapının iki odasının da çatısı çökmüştür. Bu alan, çatı kaplamalarının kaybı nedeniyle tüm olumsuz hava koşullarına maruz kalmıştır. Yığma taş duvarlarda şakulden kayma görülmüştür. 4 numaralı evde yalnızca küçük çatlaklar görülmektedir. Bunlar dışında gözle görülür yapısal hasar mevcut değildir fakat otantik yapıya gelen ekstra yükler önemli yapısal sorunlara sebep olabilir.

2.4. 5 Numaralı Ev

5 numaralı ev iki katlı yığma taş bir yapıdır. Kuzeydoğusunda geniş bir avlusu vardır (Şekil 14). Zemin katın girişi güneydoğuda, birinci katın girişi kuzeydoğudadır. Birinci katta, ana kapının hemen karşısında bir giriş kapısı daha bulunmaktadır. Şekil 15'te arazinin eğimli yapısı görülmektedir. Yapı zemin katta bir oda ve birinci katta üç odadan oluşur.

Yapıdaki düşey yapı elemanlar zemin kattaki 90-100 cm kalınlığındaki taşıyıcı duvarlardır. Dış yüzlerde çeşitli boyutlarda kaba yontma taşlardan ve harçlı moloz çekirdekten oluşmaktadır. Tüm taşlar harçla birleştirilmiştir ve harç kalınlığı 2-3 cm civarında olup duvarların dış yüzeyleri sıvasızdır.



Şekil 14. 5 numaralı evin birinci kat planı



Şekil 15. 5 numaralı evin kuzeydoğu cephesi

5 numaralı yapı birinci katın eklenmesi ile ikinci bir yapım dönemine işaret eder. Bu değişime işaret eden iki iz vardır. İlk iz iki katın duvar kalınlık farklarıdır. Zemin katta 90-100 cm kalınlığında olan duvarlar ve birinci katta 76 cm kalınlığındadır. İkinci iz, Şekil 16'da yer alan taşıyıcı elemanlarındaki farklılıktır. Zemin kat beşik tonoz ile örtülürken, birinci kat betonarme örtü sistemine sahiptir. Bu verilere ek olarak zemin kat ile birinci kat arasında bir düşey sirkülasyon elemanı bulunmamaktadır. Her iki bölümün giriş kapıları ayrıdır.

5 numaralı ev üç farklı aşama sunar: İlk aşama, otantik kütlenin yığma taş duvarlar ve beşik tonoz örtü ile tek katlı olarak inşa edilmesidir. İkinci aşama, üç odadan oluşan birinci katın eklenmesidir. Bu katta bulunan duvarlar zemin kattakine benzer şekilde yığma taş duvarlar ile örülmüştür fakat betonarme taşıyıcı elemanlarının bulunması açısından farklılaşmaktadır. Üçüncü ve son aşama, beton merdiven yapılması, teras çatıdaki korkuluk duvarlarının, bahçe duvarlarının ve metal bahçe kapısının eklenmesini kapsar. Bu aşamada yapısal ilaveler yapılmamıştır.



Şekil 16. Birinci katın ek çizgisi ve betonarme üst örtüsü

Yapısal koruma sorunları açısından detaylı olarak incelendiğinde acil müdahale gerektiren ciddi yapısal hasarlar yoktur. Birinci katın betonarme ilaveleri, zemin katın otantik beşik tonoz ve yığma duvarlarına ekstra yük getirmiştir. Herhangi bir mühendislik hesabı yapılmadan yapılan bu ilaveler, gelecekte beşik tonoz veya yığma duvarlarda yapısal hasarlara yol açabilir.

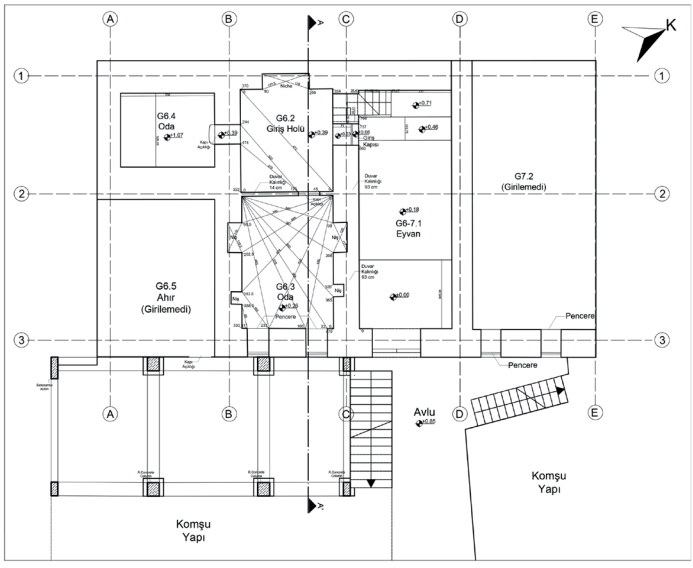
2.5. 6 Numaralı ve 7 Numaralı Evler

6 ve 7 numaralı evler ortak bir eyvanın güneyinde ve kuzeyinde konumlanmıştır. Şekil 17'de görülen ana giriş kapısından ulaşılan eyvanın üzeri beşik tonoz ile örtülüdür. 6 numaralı ev tek katlı ve 7 numaralı ev iki katlıdır.



Şekil 17. Güneydoğu cephesi ve eyvanın giriş kapısı

Şekil 18'de kat planı verilen 6 numaralı ev dört bölümden oluşur. İki bölüm beşik tonoz ile örtülüdür. Düşey yapısal elemanları, esas olarak 90-110 cm kalınlıklarındaki taşıyıcı duvarlardır. Duvarlar dış yüzeylerinde çeşitli boyutlarda kaba kesme taşlar ve harçlı moloz çekirdekten oluşmaktadır. Tüm taşlar 2-3 cm kalınlığında harçla birleştirilmiştir. Duvarların iç yüzeylerine kireç sıva uygulanmıştır. Dış yüzeylerinde ise yer yer onarımlarda kullanılan kireç sıva izleri görülmektedir.



Şekil 18. 6 ve 7 numaralı evlerin giriş kat planı

7 numaralı ev, sahipleri tarafından uzun zamandır kullanıma kapatıldığı için detaylı inceleme yapılamadı. Birbirinden bağımsız iki kattan oluşan evde girişler yapının batı cephesinde yer alır. Zemin kat iki odadan oluşurken yapıya sonradan ilave edilen birinci katta üç oda bulunmaktadır. 12 basamaktan oluşan bir taş merdiven, 6 numaralı evin damına ve 7 numaralı evin birinci katına çıkar. Dönem eki olan birinci kat, briket yığma duvarlara sahiptir. Zemin katın üst örtüsü beşik tonoz, birinci katın üst örtüsü ise ahşap tavan döşemedir. Yapının düşey yapısal elemanları yığma taş duvarlardır. Zemin katın doğu duvarının kalınlığı 103 cm'dir. Pencere açıklığından görüldüğü kadarıyla içeride başka duvarlar vardır fakat ölçülememiştir. Bazı bölümlerde iç duvarlarda kireç sıva ve boya görülmektedir. Duvarlarının dış yüzeyleri sıvasızdır.

6 numaralı evdeki ana değişiklik, güneyde iki odanın eklenmesidir. Bu iki odalı eklenti, Şekil 19'da görüldüğü gibi tavan yükseklik farkından çok net olarak anlaşılmaktadır.



Şekil 19. 6 numaralı evin ek kısımları

7 numaralı evdeki en büyük değişiklik, birinci katın eklenmesidir. Taşıyıcı duvarlar zemin katta taş yığma, birinci katta briket yığmadır. Zemin kat beşik tonoz ile örtülüyken, birinci kat ahşap tavan ile örtülüdür. Zemin katın genişliği 5,21 metre civarında iken birinci katın genişliği yaklaşık 3,7 metredir. Bu farklılık kat ilavesi sebebiyle zemin katın tonoz üst örtüsünün beklenmeyen bir yük ile karşılaşması gibi başka bir yapısal sorunu tartışmaya açmaktadır. Bir diğer önemli konu, 6 numaralı ve 7 numaralı evlerin ortak alanı olan evyanın üst örtüsü olan tonozun bir bölümünün üst kata erişmek amacıyla eklenen merdiven sebebiyle yapısal müdahaleye uğramasıdır. Şekil 20'de görüldüğü gibi hem merdiven tavan yüksekliğinin standart boyut-

lardan oldukça kısa olması hem de düzensiz bir biçimde inşa edilmesi gibi ipuçları merdivenin yapıya sonradan ilave edildiğini kanıtlayabilir. Merdiven açıklığı için gerekli alanın özgün tonoz yapısını deforme ederek sağlanması hem malzeme eksikliğine hem de yapısal hasarına neden olmuştur.



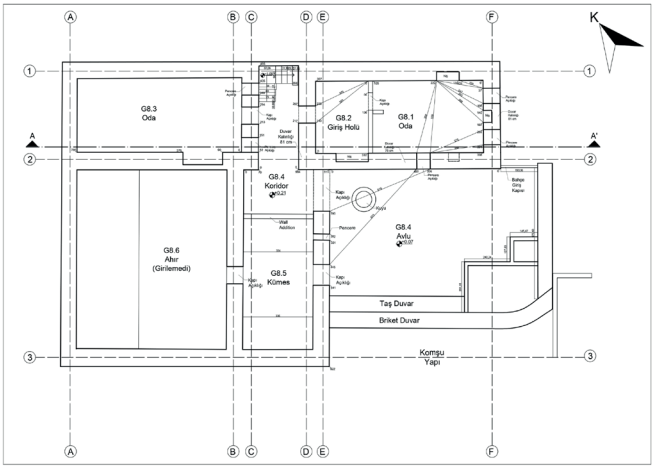
Şekil 20. Merdivenin damdan ve eyvandan görünüşü

Yapısal koruma sorunları açısından detaylı olarak incelendiğinde 6 numaralı yapının ilave kısımları olan G6.4 ve G6.5'in çatısı kısmen çökmüştür. Çatının çökmesinin ana nedeni çatının uygun yapısal elemanlarla desteklenmemiş olmasıdır. Bir diğer önemli neden ise bakımsızlık ve sismik faaliyetlerin yaratabileceği hasarlar olabilir. Yapının otantik bölümleri yığma taş duvarların alt kotlarında oluşan derz boşlukları dışında iyi durumdadır. Derz boşalmalarının olası nedeni, yapıların doğu cephesi olan ön cephesine eklenen beton döşeme nedeniyle artan rutubettir.

7 numaralı evin yapısal sorunları beşik tonozun merkezine uygulanan kütle ilavesinin yükü nedeniyle ilerleyen yıllarda ortaya çıkabilir. Binaya gelen bu fazladan yük, çökme, yapısal çatlaklar gibi önemli yapısal sorunları çıkarabilir. Birinci katta bulunan iki odanın çatısı tamamen çökmüştür. Yapı, tahribatlar ve derin çatlaklar nedeniyle zayıf olarak değerlendirilmektedir.

2.6. 8 Numaralı Ev

8 numaralı ev Şekil 21'de yer alan giriş kat planında görüldüğü üzere büyük bir avlu ve iki farklı bölümden oluşan iki katlı bir kompleks yapıdır. Avlunun kuzeybatısında ahır ve kümes alanını ve kuzeydoğusunda beşik tonoz ile örtülü yaşam alanları bulunmaktadır (Şekil 22).



Şekil 21. 8 numaralı evin giriş kat planı



Şekil 22. 8 numaralı ev ve avlusu

Yapının zemin katındaki düşey yapı elemanları 70-80 kalınlığındaki taşıyıcı duvarlardır. Dış yüzeyde çeşitli büyüklükteki taşlardan ve harçlı moloz çekirdekten oluşmaktadır. Taşlar arasında 1-2 cm kalınlığında harç görülmektedir. Duvarların dış yüzeyleri sıvasızdır.

Yapının ana değişikliği, merdivenleri ile birinci katın ve takibinde ikinci katın eklenmesidir. Ek bölümlerin duvarları briket yığma duvar olarak yapılmıştır. Birinci katın batı cephesinin dış duvarı zemin kat duvarıyla aynı eksende değildir. Bu durum duvar yüklerinin duvarlara değil tonoza aktarılmasına neden olur. Parapetin taş cinsi zemin kattan farklıdır ve bu farklılık evin yapısal bütünlüğünü bozmaktadır.

8 numaralı ev taş duvarlar ve beşik tonozlarla oluşan zemin katın otantik inşasını içeren ilk dönem ve briket yığma duvarlar ile birinci katın eklenmesini içeren ikinci dönemin izlerini taşır. Zemin kattaki bölme duvarlarının ilaveleri birinci katın yapımı ile aynı zamanda olabilir ancak bu konuda somut bir bilgi yoktur. Avlu üzerine tuvalet eklenmesi de aynı evrede değerlendirilebilir ancak bu somut bir kanıtla desteklenmemektedir.

3. Evlerin Karşılaştırılması

Bu çalışma kapsamında incelenen sekiz evin tüm yapısal özelliklerinin karşılaştırılması ve yapıların sınıflandırılması aşamasında veri olarak kullanılmak üzere alanda doldurulan envanter fiş verilerinin genel değerlendirmesi Tablo 1'de özetlenmiştir. Evlerin kütle kompozisyonları, yapısal elemanları, yapısal değişimleri ve mevcut korunma durumları, yapısal hasarları karşılaştırılarak yapısal sorunlar ve nedenleri değerlendirilmiştir.

Tablo 1. Sekiz evin yapısal özelliklerinin karşılaştırılması

		İncelenen Yapılar	Ev 1	Ev 2	Ev 3	Ev 4	Ev 5	Ev 6	Ev 7	Ev 8
	Kat Sayısı	Özgün	1	2	1	2	1	1	1	1
		Dönem Eki	1	-	-	-	1	-	1	1
		Mevcut	2	2	1	2	2	1	2	2
		Zemin Döşemesi	Zemine Oturan Döşeme (Taş)							
Zemin Kat	Üst Örtü	Eleman	Taş Tonoz	Taş Tonoz	Ahşap Tavan	Taş Tonoz	Taş Tonoz	Taş Tonoz	Taş Tonoz	Taş Tonoz
		Kalınlık	Gözlemlenemedi							
		Mevcut Durumu	Korunmuş Özgün	Korunmuş Özgün	Kısmen Çökmüş	Korunmuş Özgün	Korunmuş Özgün	Korunmuş Özgün	Korunmuş Özgün	Korunmuş Özgün
	Duvarlar	Yığma Taş	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Kalınlık (cm)	90-100	70-75	100-110	80-95	90-100	90-110	95-105	70-80
		Yığma Briket	✓	✓	-	✓	✓	-	✓	✓
		Kalınlık (cm)	17-19	19-20	-	19-20	19-20	-	19-20	19-20
Birinci Kat	Üst Örtü	Eleman	Ahşap Tavan	Ahşap Tavan	-	Taş Tonoz	Beto-narme	-	Ahşap Tavan	Beton-arme
		Mevcut Durumu	Kısmen Çökmüş	Hasarlı Özgün	-	Korunmuş Özgün	Hasar Yok	-	Kısmen Çökmüş	Hasar Yok
	Duvarlar	Yığma Taş	✓	✓	-	✓	✓	-	-	-
		Kalınlık (cm)	90-100	70-75	-	80-95	75-85	-	-	-
		Yığma Briket	✓	✓	-	✓	✓	-	✓	✓
		Kalınlık (cm)	17-19	19-20	-	19-20	17-20	-	19-20	19-20
		Çatı Kaplaması	Sıkıştırılmış Toprak	Şap	Sıkıştırılmış Toprak	Şap	Beton	Sıkıştırılmış Toprak	Şap	Beton

Yapısal koruma nedenlerine odaklanıldığında evlerde ortak olarak izlenen 4 farklı strüktürel problem listelenmiştir.

● Birinci Tip: Tonozlara dönem ilaveleri

Ev 1, 2, 5, 7, 8; 1. kat eklentileri mevcuttur. Bu birinci katlardaki duvar düzenleri, orijinal zemin kat planını takip etmemektedir, ancak bir taraftan girintilidir. Birinci katın uzunlamasına duvarlarından biri ise zemin katın üzerindeki özgün tonozun üzerine oturmaktadır (Şekil 23).



Şekil 23. Özgün tonoz üzerine binen yüklerin gösterimi

● İkinci Tip: Şekil 24'te örnekleri görülen taşıyıcı duvarların yanına kolon, kiriş, döşeme gibi beton yapı elemanlarının eklenmesi.

3 ve 7 numaralı evler hariç sekiz evin altısında bu tip bir yapısal sorun görülmektedir. Bunlar, mekanların genişletilmesi veya mekan sayısının arttırılması gibi maliklerin ihtiyaçlarına göre eklenmiştir. Bu eklemeler genellikle taş yığma taşıyıcı elemanlara temas etmektedir. Bu eklemeler, deprem gibi sismik hareketler sırasında sorunlara yol açabilir.



Şekil 24. Yapılara eklenen betonarme elemanlar

● Üçüncü Tip: Evlerin çatılarının tamamen veya kısmen çökmesidir

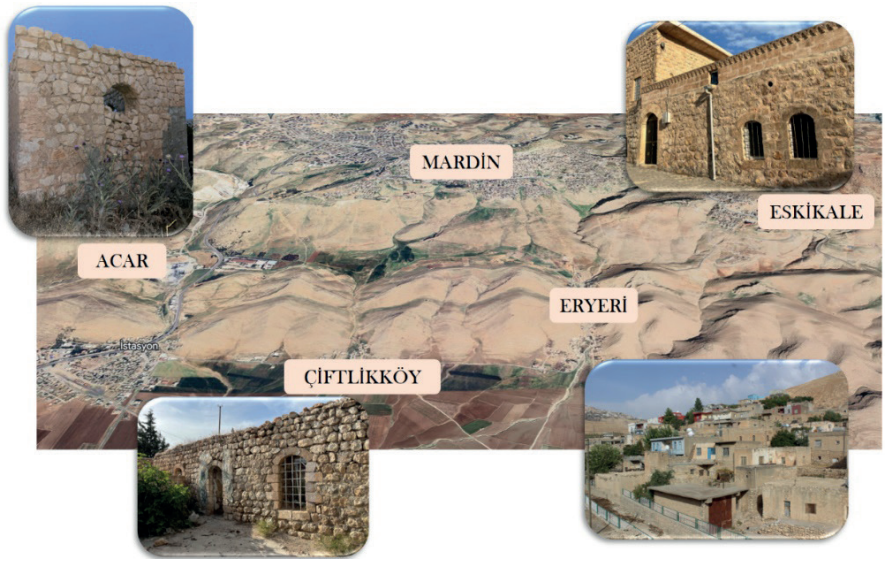
Bu tip yapısal sorun sekiz evden dördünde görülmektedir: Ev 1, 3, 6 ve 7. Çöken çatıların tamamı ahşaptır. Hiçbir otantik tonoz örtü çökmemiştir. Bu yapıların hiçbirinde koruyucu örtü yoktur: Hava şartlarına tamamen açıktırlar. Duvarların üst kısımlarında ise çökmenin olduğu yerlerde yağmur suyuna maruz kalmasından dolayı derz boşalması görülmektedir. Öte yandan duvarların üst kısımlarında sıva dökülen kısım fazla nem gösterir.

● Dördüncü Tip: Taşıyıcı duvar ve üst örtülerde yapısal çatlaklar

Bu tip yapısal sorun sekiz evin tamamında görülmektedir. Bu çatlaklardan bazıları oldukça geniştir. Çatlaklar genişliklerine göre 2 cm'den dar ve 2 cm'den geniş olmak üzere iki grupta incelenmiştir. Bu çatlakların olası nedenleri sismik kuvvetler, doğal yaşlanma, beklenmeyen yükler ve bakım eksikliğidir.

Çalışma kapsamında incelenen sekiz yapı Şekil 25'te işaretlenen ve en yakın kırsal alanlar olan Eryeri, Eskikale, Çiftlikköy, Acar mahalleleri ve Mardin il merkezindeki benzer yapılarla da karşılaştırılmıştır [4]. Benzer yapım tekniklerini ve koruma sorunlarını görüntülenmiştir. Yığma taş duvarlar, beşik ve çapraz tonoz kullanımı, kemerli kapı ve pencereler Eryeri evleri ile başlıca benzerliklerdir. Eskikale ve Mardin'de ise taş işçiliği Eryeri evlerine göre daha süslüdür.

Eryeri'nde gözlenen yapısal hasarlar bu alanlarda da görülmektedir: zemin katın tonozlarına kat ilaveleri, taşıyıcı duvarlara kolon, kiriş, döşeme gibi betonarme yapı elemanları ilavesi, çatıların tamamen veya kısmen çökmesi ve taşıyıcı duvarlar ve üst örtülerdeki yapısal çatlaklar vb.



Şekil 25. Karşılaştırma yapılan köylerin Mardin'e ve Eryeri'ne göre konumları

4. Sonuç

Eryeri, kısmen korunmuş evleri ile geleneksel Mardin evlerinin yapısal özelliklerini göstermektedir: yamaç yerleşimleri, bir veya iki katlı olmaları, zemin katların kayalık arazinin oyulması ile tamamlanması gibi. Arazi ile bütünleşen yığma taş duvarlar üç farklı profile sahiptir: moloz taş çekirdekli ve kaba kesme taş yüzlü, üç katmanlı veya iki katmanlı duvar profili ve kaba kesme taş yüzlü. Üst yapılar beşik tonoz, çapraz tonoz veya ahşap döşemedir. Teras çatılar sıkıştırılmış toprakla tamamlanmıştır ve dam adı verilir. Genellikle bir veya iki kattan oluşan evlerde, kütle düzeni düşey yönde genişletilerek kat ilaveleri yapılması sıkça görülür.

Yapısal koruma sorunlarına neden olan insan müdahaleleri tüm yapılarda görülmektedir. Ancak bir kısmı özgünlük açısından iyi korunmuş olarak de-

ğerlendirilebilirken, bir kısmı ise yapılan müdahaleler nedeniyle tüm orijinalliğini ve yapım kalitesini kaybetmiştir. Ancak yerel bir mimari geleneğin bölgesel ölçekte devamlılığı açısından bunların bir bütün olarak korunması önemlidir. Eryeri evleri, benzer kırsal yerleşimler arasında geleneksel yapım teknikleri, geleneksel malzeme kullanımı, eyvan, avlu, revak gibi geleneksel mimari formlara sahip olması ile Mardin ve coğrafyası için bu bütünlüğe katkı sağlamaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma 2022IYTE-1-0028 numaralı İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Bilimsel Araştırma Projesi tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

[1] Eres, Z., *Türkiye'de Planlı Kırsal Yerleşmelerin Tarihsel Gelişimi ve Erken*

Cumhuriyet Dönemi Planlı Kırsal Mimarisinin Korunması Sorunu, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.

[2] Halifeoğlu, F. M., Dalkılıç, N., Mardin-Savur Geleneksel Kent Dokusu ve Evleri, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt (Vol. 11, Issue 1), 2006.

[3] Tunçer, M., Mardin'in Korunması ve UNESCO Dünya Miras Listesi'ne Girmesi, İdeal Kent, Sayı 9, syf: 94-113, 2013.

[4] Alioğlu, F., Mardin Şehir Dokusu ve Evler, Tarih Vakfı, İstanbul, 2000.

[5] Soyukaya, N., Özgür, M., Kaya, F., Han, Z., Savaş, B., Alpay, E., Mardin Kültür

Envanteri, Mardin Valiliği İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, 2013

[6] Beyazıt, D., Mardin Ortaçağ İslam Mimarisi, Albert Gabriel, 2006.

DİYARBAKIR ON GÖZLÜ KÖPRÜ'NÜN DEĞİŞEN ÇEVRESİ VE DİJİTAL MODELLEME YAKLAŞIMI

İzzettin KUTLU[1], Deryanur ŞİMŞEK[2]

[1]Arş. Gör. Dr., Mardin Artuklu Üniversitesi, izzettinkutlu@artuklu.edu.tr
[2]Arş.Gör., Mardin Artuklu Üniversitesi, deryanursimsek@artuklu.edu.tr

Özet

Tarihi yapıların dijital ortamlarda belgelenmesi, sahip olduğu değerlerin gelecek nesillere aktarılması ve kültürel mirasın korunması açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışma, Diyarbakır'daki Tarihi On Gözlü Köprü'nün (Dicle Köprüsü) dijital belgelenmesini ve yakın çevresiyle birlikte gelişiminin incelenmesini amaçlamaktadır. Gerçekleştirilen saha çalışmaları ile birlikte uydu görüntülerinden köprünün yakın çevresinin gelişimi tespit edilmiştir. Ayrıca köprünün metrik ölçülü bir üç boyutlu (3D) dijital modeli oluşturulmuştur. Model, köprünün mevcut durumunun ayrıntılı bir şekilde arşivlenmesini sağlamaktadır. Ayrıca, bu veriler ışığında köprünün korunması, restorasyon çalışmaları ve gelecekteki araştırmalar için öneriler sunulmaktadır. Böylece, ele alınan kültürel varlığın nesiller arası etkileşimini arttırmak hedeflenmektedir.

Anahtar Sözcükler: Tarihi köprü, Belgeleme, Kültürel miras, Dijital modelleme.

Abstract

Documentation of historical buildings in digital platforms is crucial in terms of passing on their values to future generations and preserving cultural heritage. This study aims to digitally document the historical On Gözlü Köprü (Ten-Eyed Bridge/Tigris Bridge) in Diyarbakır and to analyse its development together with its immediate surroundings. The development of the immediate surroundings of the bridge was determined from satellite images and field studies. Furthermore, a metric-scale three-dimensional (3D) digital model of the bridge was created. The model provides a detailed archive of the current condition of the bridge. In the light of these data, recommendations for the conservation of the bridge, restoration studies and future research are also provided. Thus, it is expected to contribute to the preservation of this important cultural asset for future generations.

Keywords: Historical bridge, Documentation, Cultural heritage, Digital modelling,

1. Giriş

Kültürel miras alanlarının korunması ve gelecek nesiller ile etkileşimi, sürdürülebilir kalkınma, toplumsal bellek ve kimlik oluşumu açısından kritik öneme sahiptir [1,2]. Özellikle binlerce yıllık tarihe sahip bölgelerde, bu tür varlıklar, içinde bulundukları coğrafyanın kültürel değerlerini, geleneklerini ve yaşam biçimlerini yansıtmaktadır [3,4]. Geçmiş yüzyılların toplumsal, ekonomik ve siyasi dinamiklerinin izlerini taşıyan kültürel miras alanları, bir yandan içinde bulundukları bölgelerin somut kimlik unsurları olurken, diğer yandan da insanlık tarihinin önemli parçalarını geleceğe aktaran belgeler niteliğindedir [5,6]. Bu bağlamda, tarihi yapıların belgelenmesi ve dijital ortamlarda saklanması, hem mevcut durumlarının ayrıntılı bir şekilde kayıt altına alınması hem de gelecekteki restorasyon, koruma ve değerlendirme çalışmaları için önemli bir rol oynamaktadır [7-9].

Son yıllarda, tarihi yapıların belgelenmesi ve dijital ortamlarda saklanması konusu, koruma-restorasyon çalışmaları ile bütünleşik bir şekilde ele alınmaktadır [10,11]. Fotogrametri, lazer tarama, hava/uydu görüntüleri gibi çeşitli teknikler kullanılarak oluşturulan 3 boyutlu modeller, yapıların mevcut durumlarının ayrıntılı bir şekilde kayıt altına alınmasını sağlamaktadır [12,13]. Böylece, gelecekteki müdahaleler için bilimsel veriler üretilirken, aynı zamanda bu değerli kültürel miras öğelerinin sanal ortamlarda erişilebilir hale getirilmesi de mümkün olmaktadır [14,15]. Ölçülü dijital modellerin oluşturulması, sadece güncel durumun belgelenmesinde değil, aynı zamanda geleneksel yöntemlerle alınan rölöve çalışmalarına da destek sağlamaktadır. Yapıların mimari özelliklerinin, malzeme bileşimlerinin ve bozulma durumlarının dijital ortamlarda detaylı olarak incelenmesi, restorasyon projelerinin ve uygulama kararlarının alınmasına yardımcı olmaktadır [16,17].

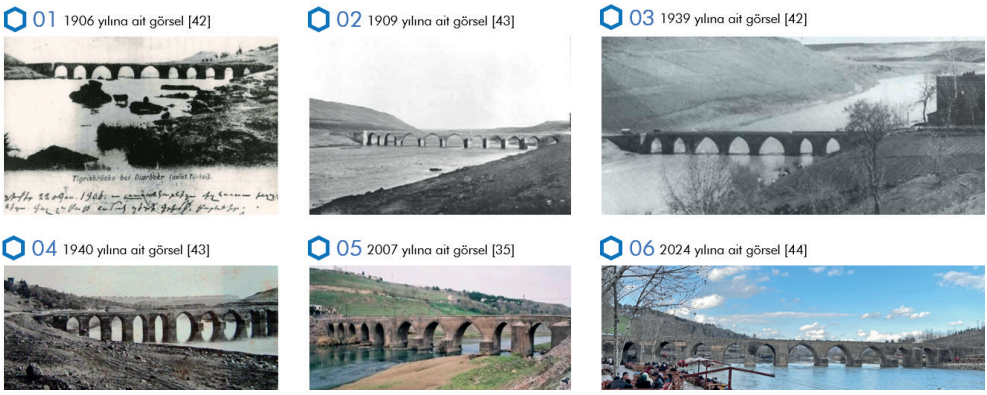
Tarihi köprüler, geçmişten günümüze önemli ulaşım ve bağlantı noktaları olarak işlev görmüş, kentlerin gelişiminde ve halklarının sosyo-ekonomik hayatlarında merkezi bir role sahip olmuşlardır [18-21]. Özellikle Anadolu gibi çok sayıda tarihi köprünün bulunduğu ve stratejik konumlarıyla öne çıkan coğrafyalarda, köprüler sadece fiziksel erişim sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda kültürel kimlik, bellek ve mirasın da somut birer göstergesi haline gelmiştir [22,23]. Bu kapsamda, Anadolu'daki tarihi köprüler üzerine birçok önemli çalışma gerçekleştirilmiştir. Yeşilbaş [24], Silifke Köprüsü'nün rölöve ve restorasyon projelerini hazırlarken, Özmen ve Sayın [25], tarihi bir yığma köprünün mühendislik özellikleri ve deprem davranışını

incelemişlerdir. Benzer şekilde, Ceylan [26] Gediz Havzasında yer alan tarihi köprülerin fonksiyonel özelliklerine ve kültürel miras etkileşimindeki rollerine değinmiştir. Karaton vd. [27], Malabadi köprüsünün farklı deprem yükleri etkisi altındaki davranışlarını belirlemiştir. Bayraktar vd. [28], tarihi yığma köprülerin davranışlarının analizine yönelik çalışma gerçekleştirmiştir. Tüm bu çalışmalar, Anadolu'nun köklü tarihsel geçmişi içerisinde köprülerin sahip olduğu önemli konumu ve korunması gerekliliğini gözler önüne sermektedir.

Anadolu'da birçok tarihi köprünün bulunduğu önemli kentlerden biri olan Diyarbakır, Mezopotamya havzasında yer almaktadır. Kent, geçmişten günümüze pek çok medeniyete ev sahipliği yapmış, önemli ticari ve kültürel merkezlerden biri olmuştur [29-33]. Bu durum bölgede çok sayıda kültürel miras varlıklarının inşa edilmesinde etkili olmuştur. Kültürel miras varlıklarını oluşturan yapıların en önemlilerinden biri de Dicle Nehri üzerinde yer alan Tarihi On Gözlü Köprü'dür. Uzun bir geçmişe sahip olan bu köprü, bölgenin kültürel ve ekonomik gelişiminde önemli bir rol oynamıştır. Ancak, zamanla maruz kaldığı doğal ve beşerî etkenler, köprünün korunması ve geleceğe aktarılması konusunda endişeler doğurmaktadır. Köprü ile ilgili mevcut çalışmalar, yakın çevresinin durum analizi [34,35] ve klasik yöntemler ile koruma çalışmalarının gerçekleştirilmesine yönelik araştırmaları [36-40] içermektedir. Yapının dijital modelinin oluşturulduğu ve bu sürecin nasıl gerçekleştirilebileceğine dair bir araştırmanın olmaması, bu çalışmanın özgün değerini oluşturmaktadır. Oluşturulan dijital model ile Diyarbakır On Gözlü Köprü'nün ölçülü-metrik bir 3D modeli elde edilerek gelecekte bu alanda yapılacak olan çalışmalar için bir altlık sunmak hedeflenmektedir.

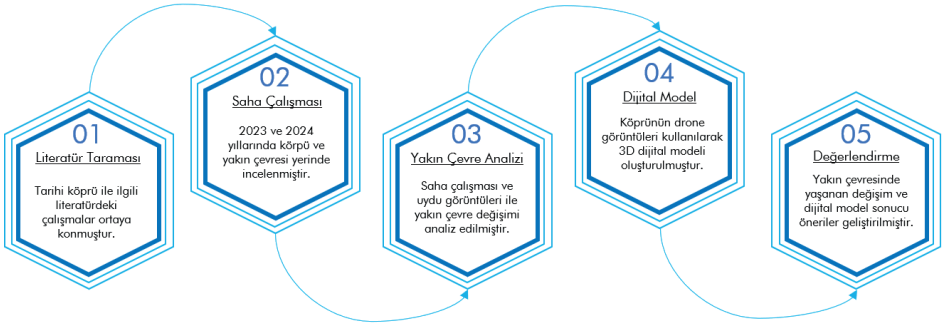
2. Materyal ve Metot

Diyarbakır'da bulunan Tarihi On Gözlü Köprü, çalışmanın ana materyalini oluşturmaktadır. Köprü, Dicle Nehri üzerinde yer alan ve kent için oldukça önemli bir kültürel miras varlığıdır. Zaman içerisinde kısmen veya tamamen yıkılıp yeniden inşa edildiği düşünülen köprünün, yapım yılı olarak en yakın ve doğru tarihin, köprünün üzerindeki kitabeden Hicri 457 (Miladi 1065) olduğu anlaşılmaktadır [41]. İnşa edildiği dönemden itibaren Diyarbakır'ın gelişiminde ve ekonomisinde merkezi bir rol oynamış ve günümüzde halen kullanıma açıktır (Şekil 1). Uzun yıllar maruz kaldığı doğal ve beşerî etkilerle bozulma sürecine girme ihtimaline karşın, dönemsel olarak koruma ve belgeleme çalışmalarına ihtiyaç ortaya çıkmaktadır.



Şekil 1- On Gözlü Köprü'nün yıllara göre değişimi

Tarihi köprünün yakın çevresinin değişiminin değerlendirildiği ve dijital modelinin oluşturulduğu çalışma, 5 aşamalı gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2- Çalışmanın aşamalarını gösteren temsil

Çalışmada öncelikle köprü ile ilgili yapılan çalışmaların belirlenmesi ve mevcut çalışmalarda yer alan bilgilerin tekrarlanmaması amacıyla literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Bu sayede özellikle yakın çevresi ile ilgili yapılan çalışmalarda yer alan bilgi ve belgelerden farklı olarak uydu görüntüleri üzerinden yaşanan değişim ortaya konmuş ve değerlendirilmiştir. Bu aşama ile eş zamanlı olarak yapıda ve yakın çevresinde 2023 ve 2024 yılları itibariyle saha çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Saha çalışmaları, yapının mevcut durumunun belgelenmesi ve yapının sahip olduğu kültürel etkinin anlaşılması için kritik bir adımdır. Üçüncü aşamada, saha çalışmalarından elde edilen görüntüler ve yakın çevresinin uydu görüntüleri ile birlikte son yıllarda yaşanan değişim gözler önüne serilmiştir. Bu aşamada Google Earth

üzerinde yer alan veriler kullanılmıştır. Geçmişe yönelik ilk yüksek çözünürlüklü hava fotoğrafının 2002 yılında olduğu ve son fotoğrafın ise 2024 yılında çekildiği görülmüştür. Dördüncü aşama, saha çalışmalarından elde edilen veriler ile birlikte yapının insansız hava araçları (drone) ile çekilmiş fotoğrafları üzerinden 3D dijital modelinin oluşturulması sürecini içermektedir. Fotoğraflar, derinlik algılama algoritmaları sayesinde ölçülü bir dijital model imkânı sunan fotogrametri programına yüklenmiştir. Bu aşamayla birlikte çalışmanın son aşamasında, yapının yakın çevresinde yaşanan değişim ile ortaya çıkan dijital modelin değerlendirilmesine yer verilmiş ve bu veriler ışığında köprünün korunması, restorasyon çalışmaları ve gelecekteki araştırmalar için öneriler sunulmuştur.

3. Bulgular

Çalışmanın bu bölümünde Diyarbakır On Gözlü köprünün yıllara göre yakın çevresinde yaşanan değişimler ele alınmıştır. Ayrıca bu denli önemli değerlere sahip köprünün ölçülü-metrik bir dijital modeli oluşturulmuş ve sürecin işleyişine dair bilgiler detaylandırılmıştır.

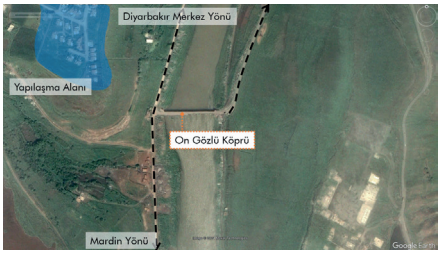
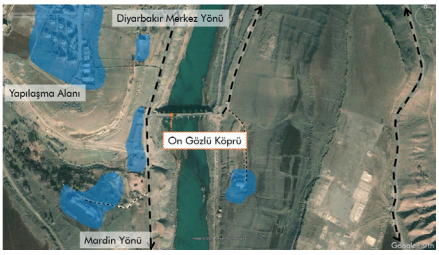
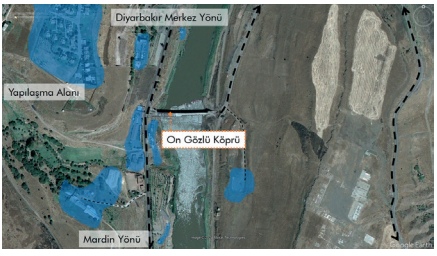
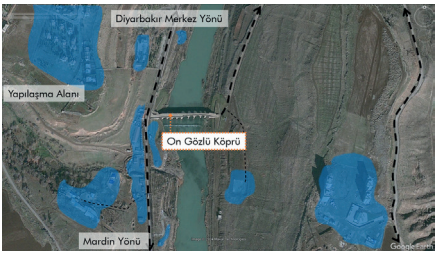
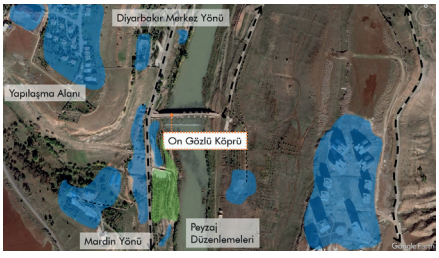
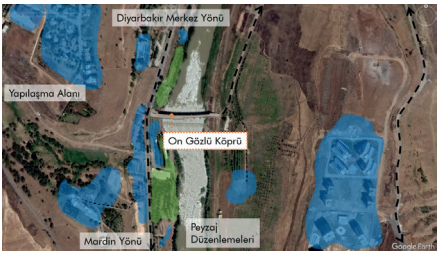
3.1. Diyarbakır On Gözlü Köprü'nün Yakın Çevresinde Yaşanan Değişimler

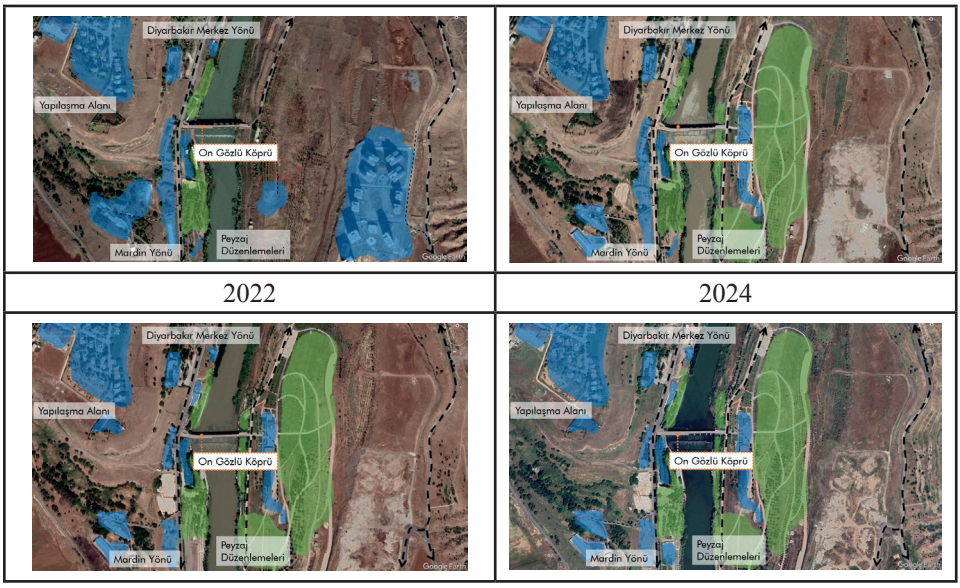
Diyarbakır'ın tarihi yapılarından biri olan On Gözlü Köprü, restorasyonu ve çevresindeki değişimlerle dikkat çekmektedir. Bu köprü, Diyarbakır-Mardin yolu üzerinde, Kırklar Dağı eteklerinde yer almakta ve Dicle Nehri üzerinde bulunmaktadır. Tarihi kaynaklarda köprü, on açıklıklı olması nedeniyle On Gözlü Köprü, Dicle Köprüsü ve Silvan Köprüsü olarak anılmaktadır [45]. 2008 yılında tamamlanan restorasyon çalışmaları, köprünün yapısal performansını arttırmaya yönelik şekillenmiş ve köprü, anıtsal mimari özellikleriyle birçok turistin ilgisini çekmeye başlamıştır [46]. Restorasyon sonrasında köprü ve çevresi, sosyal ve kültürel etkinlikler için yoğun bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır [35].

Restorasyon çalışmalarının ardından, köprünün yakın çevresi önemli değişiklikler geçirmiştir. Sıcak yaz günlerinde, nehir kenarındaki restoran ve çay bahçelerinin yoğun bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Yerel halk köprü üzerinde ve etrafında, müzik eşliğinde halk oyunları oynamakta, Hıdırellez ve dini bayramlarda köprüyü ziyaret etmekte ve çiftler burada fotoğraf çektirmektedir. Ancak bu yoğun kullanım, beraberinde bazı problemleri de

getirmiştir [47]. Köprünün bir etkinlik alanına dönüşmesi, koruma planında belirtilen mesire alanı sınırlarına rağmen hızlı bir yapılaşmayı tetiklemiştir [35]. Çay bahçeleri, oturma düzenleri ve betonarme yapılar hızla köprünün çevresini sarmış ve bu durum, köprünün tarihi ve kültürel dokusunu tehdit eder hale gelmiştir. Köprü ve yakın çevresindeki değişimlerin son 20 yılda yoğun bir şekilde yaşandığına dair uydu görüntüleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1- On Gözlü Köprünün kronolojik olarak uydu görüntülerinin karşılaştırılması

2002	2006
	
2009	**2012**
	
2014	**2016**
	
2017	**2018**



Köprünün 2002 yılı görüntüleri ele alındığında, yakın çevresinde neredeyse hiç yapılaşmanın veya herhangi bir peyzaj düzenlemesinin olmadığı; ancak, 2009 yılı itibariyle çevresinde küçük ölçekte yapılaşmaların başlandığı ve fabrikaların inşa edildiği görülmektedir. 2012 yılı ile çevresinde yüksek katlı betonarme yapıların oluşmaya başladığı gözlenebilmektedir. Uydu görüntüleri arasında en büyük farklardan birinin de 2017 ile 2018 yılları arasında yaşandığı açıkça görülebilmektedir. Özellikle o yıllarda köprünün doğu yönünde peyzaj düzenlemelerinin ve yolların yapıldığı belirlenmiştir. Erişim sağladığı dağın tepesinde bulunan ve o dönem Kırklar Dağı Konutları diye adlandırılan yüksek katlı betonarme yapıların da yetkililer tarafından yıkım kararı alınarak yıkıldığı görülmektedir [48,49]. Bu durum, yakın çevresinde yaşanan ve tarihi köprünün görünümüne etki eden en önemli gelişmelerden biri olmuştur (Şekil 3). Batı yönünde de mevcut düzenlemelere ek olarak kafe-restoran işletmelerinin sayısının artmaya başlandığı görülmektedir. 2018 yılından günümüze ise tekrar ticari işletmelerin sayısının ve yapılaşmalarının arttığı hem gerçekleştirilen saha çalışmalarından hem de uydu görüntülerinden de anlaşılabilmektedir.



Şekil 3- Köprünün yakın çevresinde yer alan betonarme blokların yıkılması

Köprü çevresindeki yapılaşma, yerel yönetimler ve ilgili kurumlar tarafından alınan koruma kararlarına rağmen devam etmektedir (Şekil 4). Köprü restorasyonundan hemen sonra yapılan koruma planında, köprünün etrafındaki alanın mesire alanı olarak planlandığı belirtilmiştir. Ancak bu plan, köprü çevresinde hızla artan yapılaşma ile birlikte yetersiz kalmıştır. Çay bahçeleri, restoranlar ve diğer ticari yapılar, köprünün etrafındaki alanı doldurmuş ve köprünün tarihi dokusuna zarar verme riski taşımaktadır. Yerel halkın ve turistlerin ilgisi, bu alanın ticari potansiyelini artırmış ve bu durum, köprünün çevresindeki yapılaşmanın hızlanmasına neden olmuştur.



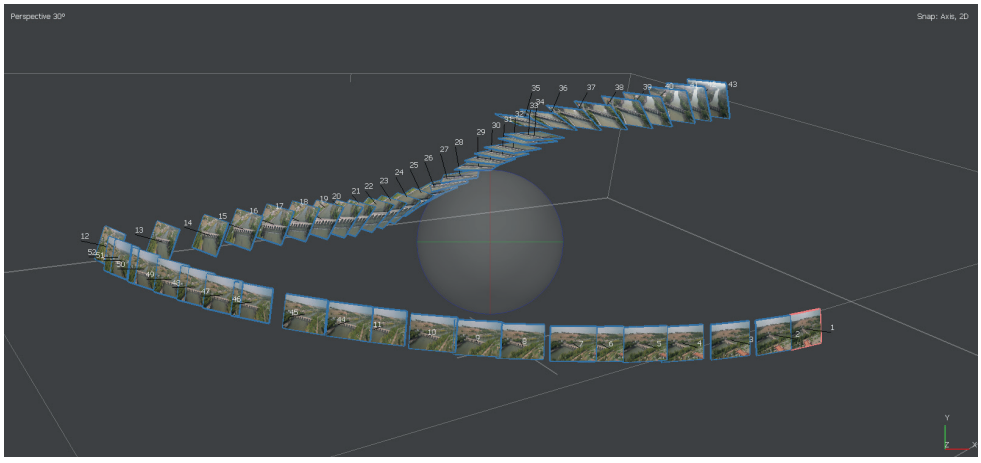
Şekil 4- Köprünün 2024 yılı itibariyle yakın çevresi

Sonuç olarak, Diyarbakır On Gözlü Köprüsü'nün restorasyonu ve çevresindeki değişimler, köprünün tarihi ve kültürel değerine zarar verme riski taşımaktadır. Köprünün çevresindeki yapılaşma ve sosyal aktivitelerin artması, koruma planında belirtilen mesire alanı sınırlarına rağmen devam etmekte ve bu durum, köprünün tarihi dokusunu tehdit eder hale gelmektedir.

3.2. Diyarbakır On Gözlü Köprü'nün Dijital Modeli

Tarihi On Gözlü Köprünün gerçekçi dijital modelinin oluşturulması için yapıya dair detaylı fotoğraf çekimlerinin yapılması gerekmektedir; fakat, hem köprünün on gözlü olacak düzeyde uzun bir açıklığının olması hem de üzerinde bulunduğu Dicle Nehri bu süreci karadan gerçekleştirmeyi imkânsız hale getirmektedir. Günümüz gelişen teknolojisi ile bu zorluklara karşın geliştirilen araçların sayısı hızla artmaktadır. Son dönemlerde birçok alanda kullanımı artan insansız hava araçlarından biri olan dronelar da bu araçlardan biridir ve On Gözlü Köprünün dijital modelinin üretimi sürecinde de dronelardan elde edilen fotoğraflar kullanılmıştır.

Tarihi On Gözlü Köprü'nün dijital model oluşumunda dronelar ile video kaydı alınmış ve bu kayıttan toplam 52 adet fotoğraf elde edilerek dijital model oluşturma programına eklenmiştir (Şekil 5). Model oluşturma sürecinde Metashape (geliştiricisi Agisoft) [52] programından faydalanılmıştır.

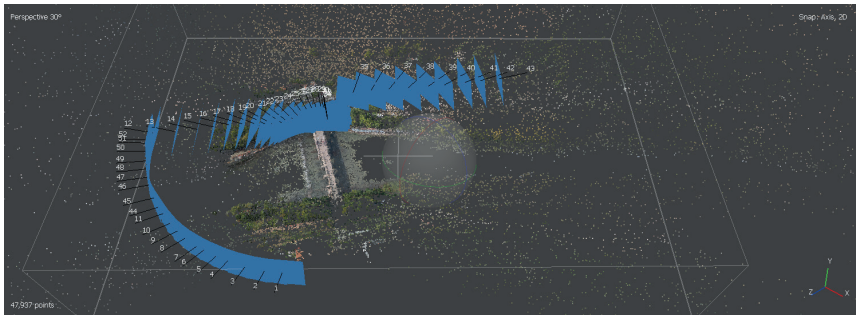
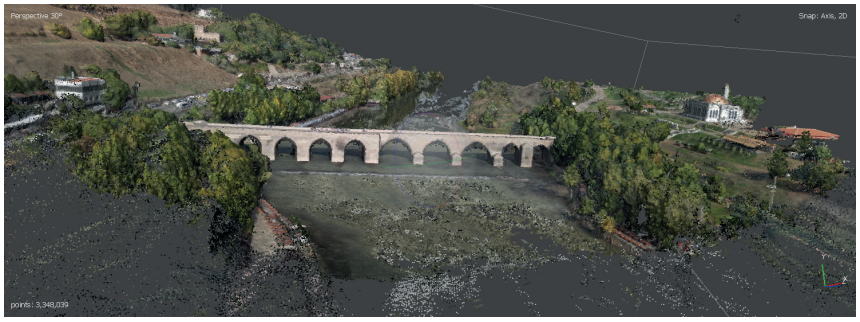
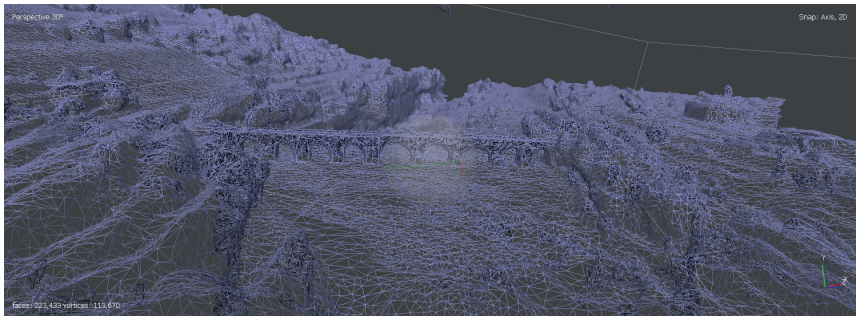


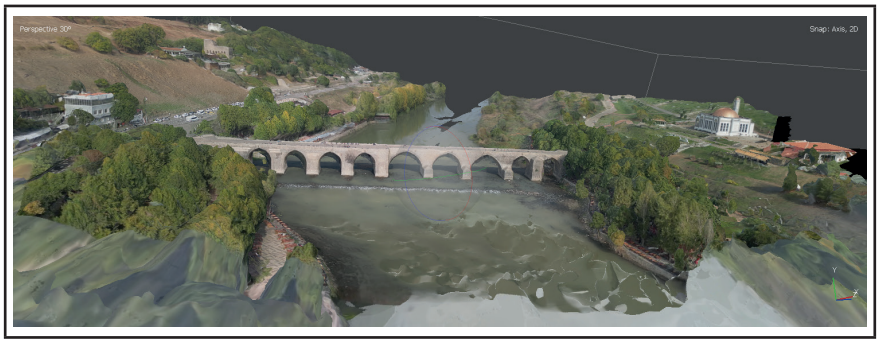
Şekil 5- Metashape programına aktarılan fotoğraflar

52 adet fotoğrafın tamamı program tarafından hizalanmıştır ve ilk aşamada kamera açılarını gösteren mavi kareler ile nokta bulutlarından oluşan bir model elde edilmiştir. Beraberinde programın sahip olduğu otomatik "yoğun nokta bulutu" oluşturma komutu ile nokta bulutları, yoğun nokta bulutlarından oluşan model haline getirilmiştir. Nokta bulutunda 47.937,00 olan

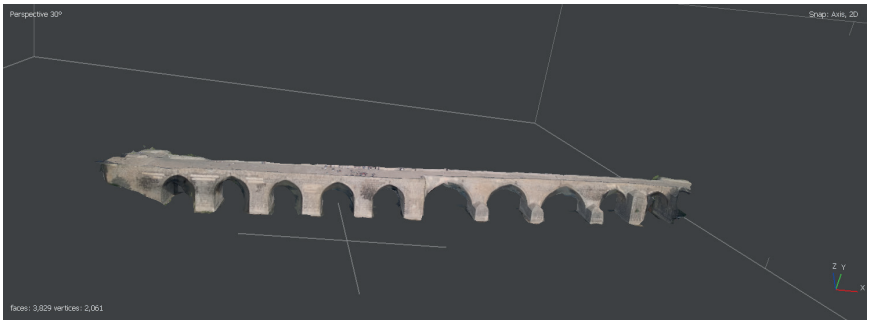
nokta sayısı; yoğun nokta bulutu modelinde 3.351.648,00 nokta sayısına ulaşmıştır. Bununla birlikte yoğun nokta bulutu üzerinde yer alan noktaların birbirine bağlanması ile Tarihi On Gözlü Köprü'nün ağ modeli elde edilmiştir. Ağ modeline, programa eklenen fotoğraflardan elde edilen dokuların tanımlanması ile dijital model oluşturma süreci tamamlanmıştır. Dijital model sürecine dair aşamaların yer aldığı görseller Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2- On Gözlü Köprünün dijital model oluşturma aşamaları

Nokta Bulutu Modeli ve Kamera Açıları

Yoğun Nokta Bulutu Modeli

Ağ Modeli

Dokulu-Ölçülü Dijital Model



Oluşan dijital model üzerinde, ihtiyaç duyulmayan veriler temizlenebilmektedir. On Gözlü Köprü modelinde sadece köprünün yer aldığı kısım, yaklaşık 5 dakika gibi kısa bir süre içerisinde program üzerinden temizlenmiştir ve Şekil 6'da yer alan model elde edilmiştir.



Şekil 6- Temizleme işleminin ardından On Gözlü Köprü modeli

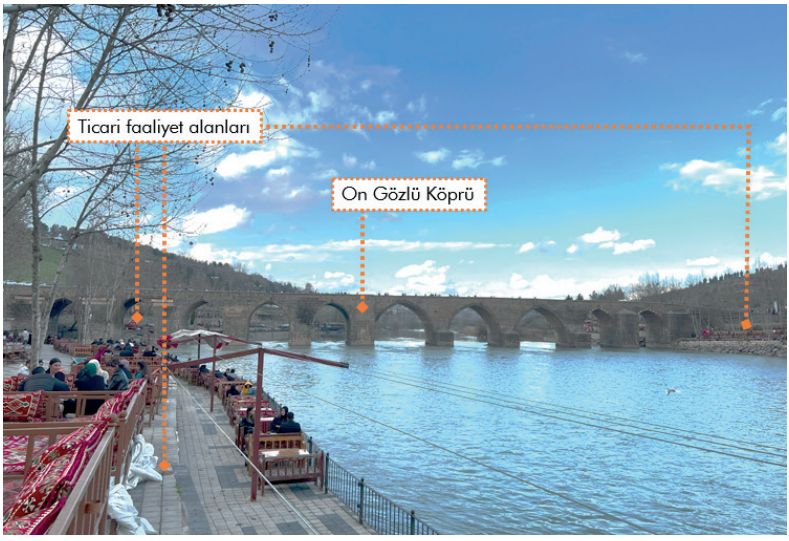
Model, oluşturma sürecinde fotoğrafların birbirine tanıyacak şekilde bindirme (overlap) tekniği ile fotoğraf çekilmesi durumunda, programın fotoğrafları tanımlayacağı unutulmamalıdır.

4. Değerlendirme

On Gözlü Köprü, Diyarbakır'ın tarihi mirasının köklü bir sembolü olarak, bölgenin kültürel kimliğini yansıtmaktadır. Ancak, köprünün çevresinde yaşanan hızlı kentsel dönüşüm, tarihi yapının korunmasını zorlaştıran bir dizi sorunu beraberinde getirmiştir. Yerel halkın köprü etrafında düzenlediği sosyal ve kültürel etkinlikler, bu alanı dinamik bir yaşam alanı haline getirirken, aşırı yapılaşma ve artan ticari faaliyetler, köprünün tarihi dokusunu tehdit eden unsurlar arasında yer almaktadır (Şekil 7). Bu bağlamda, köprünün çevresinde dikkatli bir planlama ve koruma stratejisi geliştirilmesi ve

bu stratejilerin sürdürülebilir bir hale getirilmesi gerekmektedir. On Gözlü Köprü'nün gelecekte hem kültürel bir merkez olarak işlevini sürdürmesi hem de tarihi değerinin korunması için sürdürülebilir bir yaklaşım benimsemek, yerel yönetimlerin ve toplumun ortak sorumluluğu olmalıdır.

On Gözlü Köprü'nün çevresindeki yapılaşma süreci, tarihi mirasın korunması ve modern kentsel gelişim arasındaki çatışmayı gözler önüne sermektedir. Zamanla artan yapılaşma, köprünün estetik değerini ve tarihi kimliğini tehdit ederken, aynı zamanda sosyal ve ticari etkinliklerin de artmasına yol açmıştır. 21. yüzyılın başlarında köprünün çevresinde neredeyse hiç yapılaşmanın olmadığı, doğal peyzajın hakim olduğu bilinmektedir. Günümüzde ise köprünün çevresinde belirgin bir değişim yaşandığı uydu görüntüleri ve yakın çevresine ait çekilmiş görsellerden açıkça okunabilmektedir. Bu durum, köprünün çevresinin bir cazibe merkezi haline gelmesini sağlasa da, tarihi yapının görünümünü olumsuz etkileyen bir baskı yaratmaktadır. Geçmişte yapılan düzenlemeler ve yıkımlar, koruma çabalarının varlığını gösterse de, artan ticari faaliyetler ve yapılaşma, köprünün çevresinde sürdürülebilir bir denge kurulması gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 7- 2024 yılı On Gözlü Köprü ve çevresindeki ticari faaliyet alanları [44]

Tarihi yapıların dijital belgelenmesi, kültürel mirasın korunması ve gelecek nesillere aktarılması açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle köprüler gibi karmaşık ve erişilmesi zor mimari yapıların belgelenmesi oldukça güç bir süreçtir. Geleneksel yöntemlerle gerçekleştirilen ölçüm ve belgele-

me çalışmaları, bu tür yapıların detaylı bir şekilde kayıt altına alınmasında kimi zaman yetersiz kalmaktadır. Ancak son yıllarda gelişen fotogrametri teknolojisi, tarihi köprülerin dijital olarak modellenebilmesine olanak sağlamaktadır.

Agisoft Metashape yazılımı, dijital modelleme tekniklerinden biri olan fotogrametrik modelleme ilkelerini kullanarak Tarihi On Gözlü Köprü'nün detaylı 3 boyutlu dijital modelini oluşturma imkânı sunmuştur. Yüksek çözünürlüklü hava ve yer fotoğraflarının işlenmesi sayesinde, köprünün mimari özellikleri, boyutları, malzeme dokuları gibi pek çok veri dijital ortama aktarılabilmektedir. Ayrıca, oluşturulan model farklı dosya formatlarında (OBJ, FBX, COLLADA, vb.) dışa aktarılabilmektedir. Bu özellik, modelin mimarlık, mühendislik, arkeoloji, sanat tarihi gibi çeşitli disiplinlerde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Mimari analizler, statik hesaplamalar, rekonstrüksiyon çalışmaları gibi alanlarda, dijital modelden yararlanılabilmektedir. Bununla birlikte, müzecilik ve sergileme faaliyetlerinde de bu modelin kullanımı mümkündür. Dolayısıyla, disiplinler arası kullanım olanakları sayesinde, tarihi köprülerin daha kapsamlı bir şekilde incelenmesi, belgelenmesi ve korunması sağlanabilmektedir. Karmaşık geometrilere sahip tarihi köprülerin belgelenmesinde, fotogrametri temelli dijital modelleme yöntemleri, geleneksel ölçüm tekniklerine göre süreç etkin sonuçlar üretebilmektedir.

Bununla birlikte, dijital modelleme sürecinde, bazı sınırlılıklar da dikkat çekmektedir. Modellemede kullanılan fotoğrafların yüksek çözünürlüklü olması, detay kalitesini artırırken, düşük çözünürlüklü fotoğraflar modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini azaltabilmektedir. Ayrıca, insan müdahalesine ihtiyaç duyan bazı veriler (renk, doku, vb.), dijital modele tam olarak yansıtılamayabilir. Dolayısıyla, fotogrametri tabanlı dijital belgeleme çalışmalarında, doğru ölçüm, uygun görüntüleme ve işleme teknikleri kullanmak oldukça önemlidir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, oluşturulan 3D dijital model, daha da gelişen arttırılmış gerçeklik (AR) ve sanal gerçeklik (VR) teknolojileri ile entegre edilebilir. Bu entegrasyon, köprünün sanal ortamlarda gezilmesini, incelenmesini ve etkili bir şekilde tanıtılmasını sağlayacaktır. Örneğin, AR teknolojisi aracılığıyla, köprüde yapılacak restorasyon ve konservasyon müdahaleleri öncesinde, uygulamanın dijital model üzerinde simüle edilmesi ve değerlendirilmesi mümkün hale gelebilir. Diğer yandan, VR teknolojisi

ile, erişimi sınırlı olan kişilerin de tarihi köprüyü sanal ortamda deneyimlemeleri sağlanabilir. Böylece, kültürel mirasın korunması ve toplumla etkileşiminin güçlendirilmesi için yeni ve yenilikçi yöntemler geliştirilebilir. Sonuç olarak, fotogrametri temelli 3D dijital modelleme yöntemleri, karmaşık tarihi yapıların belgelenmesi ve analizi için etkili bir araç sunmaktadır. Oluşturulan modelin çeşitli disiplinlerde kullanılabilir olması ve gelecekte AR/VR gibi teknolojilerle entegrasyonu, kültürel mirasın korunması ve tanıtılması için yeni olanaklar yaratmaktadır.

5. Sonuç

Tarihi yapıların dijital belgeleme süreçleri, kültürel mirasın korunması ve gelecek nesillere aktarılması açısından önem taşımaktadır. Özellikle köprüler gibi tarihsel öneme sahip mimari yapıların 3D dijital modellerinin oluşturulması, bu yapıların detaylı bir şekilde kayıt altına alınmasını ve çeşitli disiplinlerde kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Elde edilen dijital modeller, restorasyondan bilimsel araştırmalara, eğitimden tanıtım faaliyetlerine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu bağlamda, Diyarbakır'daki On Gözlü (Dicle) Köprü'nün 3D dijital modeli, köprünün mimari özelliklerinin kapsamlı bir şekilde belgelenmesine ve analizine imkân vermektedir. Modelin geliştirilmesi, köprünün mevcut durumunun dijital ortamda kayıt altına alınması, geçmişten günümüze yaşadığı değişikliklerin incelenmesi ve geleceğe yönelik koruma stratejilerinin oluşturulması açısından son derece önemlidir. Oluşturulan 3D dijital modelin arttırılmış ve sanal gerçeklik teknolojileriyle entegrasyonu, kültürel mirasın daha etkili bir şekilde sunulması ve anlaşılmasını sağlayacaktır. Ziyaretçiler, köprünün tarihsel ve mimari özelliklerine dair detaylı bilgilere erişebilecek, hatta sanal ortamda köprü ve yakın çevresini içeren etkileşimli model içerisinde gezinti yapabileceklerdir. Bu sayede, kültürel mirasın korunması ve gelecek nesillere aktarılması hedefine yönelik önemli katkılar sağlanacaktır.

Sonuç olarak, tarihi köprülerin ve diğer yapıların dijital belgeleme çalışmalarının yaygınlaştırılması, kültürel mirasın sürdürülebilir bir şekilde korunması, yorumlanması ve topluma sunulması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu tür çalışmalar hem bilimsel hem de toplumsal fayda sağlayarak, tarihi yapıların geleceğe aktarılmasına yönelik değerli çözümler sunmaktadır.

Kaynaklar

[1] Jokilehto, J., A history of architectural conservation, Routledge, 2017.

[2] Faro Sözleşmesi. Avrupa Konseyi "Faro Sözleşmesi", 2005.

https://rm.coe.int/CoERMPublicCommonSearchServices/DisplayDCTMContent?documentId=0900001680083746

[3] Schafer, J., Preserving the World's Great Cities: The Destruction and Renewal of the Historic Metropolis. Library Journal, 126(14), 176-176, 2001

[4] Ulvi, A., Importance of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the documentation of cultural heritage. Turkish Journal of Engineering, 4(3), 104-112, 2020.

[5] Lowenthal, D., The past is a foreign country-revisited. Cambridge University Press, 2015.

[6] Akyıldız, N. A., Olğun, T. N., Somut olmayan kültürel mirasın Anadolu'da tarihi yerleşimlerin korunması ve sürdürülebilirliği bağlamında değerlendirilmesi. Milli Folklor, 16(128), 234-243, 2020.

[7] El-Omari, S., Moselhi, O., Integrating 3D laser scanning and photogrammetry for progress measurement of construction work. Automation in construction, 18(1), 1-9, 2008.

[8] Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F. C., Scaioni, M., Sarazzi, D., UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling: Current status and future perspectives. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), **Zürih, İsviçre,** 2011.

[9] Rönnholm, P., Honkavaara, E., Litkey, P., Hyyppä, H., Hyyppä, J., Integration of laser scanning and photogrammetry. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(3/W52), 355-362, 2007.

[10] Logothetis, S., Delinasiou, A., Stylianidis, E., Building information modelling for cultural heritage: a review. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2, 177-183, 2015.

[11] Koutsoudis, A., Vidmar, B., Ioannakis, G., Arnaoutoglou, F., Pavlidis, G., Chamzas, C., Multi-image 3D reconstruction data evaluation. Journal of cultural heritage, 15(1), 73-79, 2014.

[12] Remondino, F., El□Hakim, S., Image□based 3D modelling: a review. The photogrammetric record, 21(115), 269-291, 2006.

[13] Grussenmeyer, P., Landes, T., Voegtle, T., Ringle, K., Comparison methods

of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37(B5), 213-218, 2008.

[14] **Şimşek, D., Kutlu, İ.,** Kentsel Kültürel Mirasın Belgelenmesinde ve Korunmasında Dijital Araçların Rolü: Ani Arkeolojik Alanı. Dünya Şehircilik Günü 47. Kolokyumu: "Yeni Yüzyılda Planlama", Ankara, 2023.

[15] Pietroni, E., Ferdani, D., Virtual restoration and virtual reconstruction in cultural heritage: Terminology, methodologies, visual representation techniques and cognitive models. Information, 12(4), 167, 2021.

[16] Galeazzi, F. Documenting archaeological stratigraphy using high-resolution 3D models: Towards an integrated approach. In Mixed Reality and Gamification for Cultural Heritage (pp. 111-127). Springer, Cham, 2016.

[17] **Şimşek, D., Kutlu, İ.**, Digital Approach to Documenting Cultural Heritage Dynamics in Hasankeyf. III. International Architectural Sciences and Applications Symposium, Napoli, 2023.

[18] Giglitto, D., Ciolfi, L., Bosswick, W., Building a bridge: opportunities and challenges for intangible cultural heritage at the intersection of institutions, civic society, and migrant communities. International Journal of Heritage Studies, 28(1), 74-91, 2022.

[19] Tanrıverdi, M., Gürel, M. A., Geçmişten Günümüze Kemer Köprüler. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 4(3), 156-167, 2019.

[20] Maraş, E. E., Hacıefendioğlu, K., Birinci, F., Uslu, G., Tarihi Köprülerin Dokümantasyonu İçin Dijital Fotogrametri ile 3B Modellerinin Oluşturulması ve Dinamik Analizlerinin Yapılması (Tarihi Kurt Köprüsü Örneği). Harita Dergisi, 155, 2016.

[21] Akın, E. S., Sezer, S., Tarihi Köprülerin Kullanımları: Yozgat Örneği, Türkiye. Online Journal of Art & Design, 11(1), 2023.

[22] DeLony, E., Klein, T. H., Rehabilitation of historic bridges. Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice, 131(3), 178-186, 2005.

[23] Hong, N. K., Koh, H. M., Hong, S. G., Bae, B. S., Yoon, W. K., Toward a balanced heritage management plan for old stone bridges considering the embedded cultural significance. International Journal of Architectural Heritage, 3(3), 195-211, 2009.

[24] Yeşilbaş, E., Silifke Taş Köprünün Rölöve Tespitleri ve Tarihi Dönem Analizi. Akdeniz Sanat, 9(19), 2016.

[25] **Özmen, A., Sayın, E.**, Tarihi Yığma Bir Köprünün Deprem Davranışının Değerlendirilmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(2), 956-965, 2020.

[26] Ceylan, M. A., Gediz Havzasında Tarihi Köprüler Ve Fonksiyonel Özellikleri. Doğu Coğrafya Dergisi, 16(25), 103-132, 2011.

[27] Karaton, M., Aksoy, H. S., Sayın, E., Calayır, Y., Nonlinear seismic performance of a 12th century historical masonry bridge under different earthquake levels. Engineering Failure Analysis, 79, 408-421, 2017.

[28] Bayraktar, A., Türker, T., Altunişik, A. C., Experimental frequencies and damping ratios for historical masonry arch bridges. Construction and Building Materials, 75, 234-241, 2015.

[29] Koç, Ü. C., Kejanlı, T. Yerli Turistin Kültürel Turizm Algısı: Diyarbakır Suriçi Örneği. Online Journal of Art & Design, 10(3), 2022.

[30] **Çatalbaş, F**., Suriçi bölgesi kentsel dönüşüm projesi ve Diyarbakır turizmine katkısı. Bozok Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Dergisi, 1(1), 47-65, 2012.

[31] Yıldırım, M., Kültürel turizm ve kültürel mirası koruma: Diyarbakır Hasan Paşa Hanı örneği. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 8(2), 335-344, 2017.

[32] Yeşilbaş, E., Diyarbakır Çifte Han'ın Koruma ve Yeniden Kullanım Önerileri. Mukaddime, 5(1), 65-88, 2015.

[33] Serçek, S., Hassan, A., Turizmde destinasyon markalaşması ve Diyarbakır örneği. Seyahat ve otel işletmeciliği dergisi, 13(1), 6-27, 2016.

[34] Güneroğlu, N., Oğuztürk, G. E., Tarihi On Gözlü Köprü ve Yakın Çevresinin Kıyısal Peyzaj Değeri Açısından Araştırılması. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 23(3), 754-766, 2021.

[35] Biçen, A., Tarihi Köprüde Yakın Çevre Sorunları: Diyarbakır Silvan (On Gözlü Köprü) Köprüsü. Uluslararası Akademik Birikim Dergisi, 6(Özel Sayı), 152-167, 2023.

[36] Demir, H., Dicle (On Gözlü) Köprüsü'nün Somut Ve Somut Olmayan Miras Olarak Korunması. Milli Folklor, 17(132), 226-249, 2021.

[37] Karasin, I. B., Isik, E., Protection of Ten-Eyed Bridge in Diyarbakır. Budownictwo i Architektura, 15(1), 87-94, 2016.

[38] Demir, O., Tarihi Diyarbakır Dicle (on gözlü) köprüsünün sonlu eleman yöntemiyle analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzincan Binali Yıl-

dırım Üniversitesi, Erzincan, 2019.

[39] Halifeoğlu, F. M., Toprak, Z. F., Kavak, O., Tarihi Diyarbakır Köprülerinin Mimari, Hidrolojik ve Jeolojik Açıdan Değerlendirilmesi. II. Su Yapıları Sempozyumu, Diyarbakır, 2011.

[40] Dalkılıç, N., Halfeoğlu, F. M., Diyarbakır Merkez ve İlçelerinde Yer Alan tarihi Köprüler. I. Uluslararası Nebiler, Sahabiler, Azizler ve Krallar Kenti Diyarbakır Sempozyumu, Diyarbakır, 2009.

[41] **İlter, F., Osmanlılara Kadar Anadolu Türk Köprüleri**, Karayolları Genel Müdürlüğü Yayını, Ankara, 1978.

[42] Tekin, A., Anadolu Tarihinin Taşlara Yazıldığı Kent. Basımevi İşletme Müdürlüğü Yayını, Diyarbakır, 1997.

[43] Bell, G., Gertrude Bell Archive. www.gerty.ncl.ac.uk. Erişim Tarihi: 20.06.2024.

[44] İzzettin Kutlu fotoğraf arşivi, 2024.

[45] Halifeoğlu, F.M., Dalkılıç, N., Sert, H., Halifeoğlu, Z., Diyarbakır Dicle (On Gözlü) Köprüsünün rölöve, restitüsyon ve restorasyon projelerinin yapımı. Uluslararası Katılımlı Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 2, 649-666, 2009.

[46] Genç, A. F., Tarihi köprülerin yapısal davranışa restorasyon çalışmalarının etkisi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2015.

[47] Halifeoğlu, F. M., Toprak Z. F., Kavak, O., Architectural and hydrological features of the historical basalt bridges in Diyarbakır Turkey. 16. International Multidisciplinary Scientific GeoConference 3, 51-62, 2016.

[48] https://www.evrensel.net/haber/341422/tarihi-kirklar-dagindaki-konutlarin-yikim-ihalesi-yapildi, Erişim Tarihi: 22 Haziran 2024.

[49] https://www.dierg.org/kirklar-dagi-konutlarinin-kentimize-ogrettikleri-ve-diergin-onerileri/, Erişim Tarihi: 22 Haziran 2024.

[50] Deryanur Şimşek fotoğraf arşivi, 2024.

[51] Yazarlar ortak fotoğraf arşivi, 2024.

[52] https://www.agisoft.com, Erişim Tarihi: 22 Haziran 2024.

TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI ANKARA ŞUBESİ
TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI DİYARBAKIR ŞUBESİ
ODEYA ENDAZYARÊN AVAHÎYÊ

VAN ERNİS KÖY ENSTİTÜSÜ TAŞ YIĞMA HAMAM YAPISININ DEPREM PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

Yaşar SUBAŞI DİREK[1], Fırat KUAS[2] Elif Su DİREK[3]

[1]Dr. Öğr. Üyesi, Van YYU, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, yasarsu@yyu.edu.tr
[2]İnş. Müh. Fırat KUAS, Van YYU, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, kuasfirat@gmail.com
[3]İnş. Müh. Öğrencisi Elif Su Direk, Van YYU, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, esudirek@yyu.edu.tr.

Özet

Köy Enstitüleri Cumhuriyet Döneminin en önemli eğitim kurumlarını oluşturur. Son açılan Van Ernis Köy Enstitüsü ile birlikte sayısı 21 olan bu eğitim kurumlarının en temel amacı, tarıma dayalı bir ekonomiye sahip ülkenin her bölgesinde, özellikle kırsal alanda eğitimi güçlendirmek, ekonomik kalkınmayı artırmaktı. Tarım eğitimi ile beraber bir çok mesleki ve kültürel dersin de verildiği bu kurumlarda, yatılı olması nedeniyle temizlik de oldukça önemseniyordu. Bu nedenle ilk yapılan yapıların başında hamamlar yer almaktaydı. Dönemin koşullarına göre bu kurumlardaki tüm yapılar gibi hamam yapıları da yakın çevrede bulunan yapı malzemeleriyle yapılırdı.

Bu çalışmanın konusu olan Van Ernis Köy Enstitüsü Hamamı, bulunduğu coğrafik ve jeolojik konum nedeniyle deprem, göl yükselmesi, vb afetlerin olduğu bölgede, Van Gölü kenarında yer almaktadır. Çalışma kapsamında önce genel anlamda Köy Enstitülerinin, sonra özelde Van Ernis Köy Enstitüsünün tarihçesi ve yapıları, ardından Van Ernis Köy Enstitüsü hamam yapısının mimari ve geometrik özellikleri, taşıyıcı sistem ve malzemeleri, yapının mevcut durumu incelenmiştir. Ardından SAP 2000 programı yardımıyla bu hamam yapısının deprem performansının belirlenmesine çalışılmıştır.

Sonuç olarak Ülkemizin Cumhuriyet tarihi açısından önemli bir değeri olan Köy Enstitülerinden Van Ernis Köy Enstitüsü yapılarından olan taş hamam yapısının olası bir depremde göstereceği davranışı ve oluşabilecek hasarlara ilişkin ön görüde bulunulmaya çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Van Ernis Köy Enstitüsü, Taş Hamam Yapısı, Deprem Performansı

Determınation of Earthquake Performance of Van Ernis Village Institute Stone Masonry Bath Structure

Abstract

Village institutes constitute the most important educational institutions of the Republic period. The main purpose of these educational institutions, which number 21 including the recently opened Van Ernis Village Institute, was to strengthen education and increase economic development in every region of the country with an agriculture-based economy, especially in rural areas. In these institutions, where many vocational and cultural courses were given along with agricultural education, cleanliness was also very important due to the boarding. For this reason, baths were among the first buildings built. According to the conditions of the period, the bath structures, like all structures in these institutions, were built with building materials found in the immediate surroundings.

The bath structure of Ernis Village Institute, which is the subject of this study, is located on the edge of Lake Van, in the region where disasters such as earthquakes, lake rises, etc. occur due to its geographical and geological location. Within the scope of the study, first the history and structures of the village institutes in general, then the Ernis village institute in particular, then the architectural and geometric features of the Ernis Village Institute bath structure, its carrier system and materials, and the current state of the building were examined. Then, an attempt was made to determine the earthquake performance of this bath structure with the help of SAP 2000 and st4cad programs. As a result, an attempt was made to make a prediction regarding the behavior of the stone bath structure, which is one of the structures of the Ernis Village Institute, which has an important place in the history of the republic of our country, in a possible earthquake and the damages that may occur.

Key Words: Van Ernis Village Institute, Stone bath structure, Earthquake performance

1. Giriş

Köy Enstitüleri, Cumhuriyetin kurulduğu ilk yıllarda, ulus-devlet inşa etmek, aynı zamanda nüfusun çoğunun köylerde yaşadığı ülkede, halkı kalkındırmak, bilinçlendirmek, sosyo-ekonomik olarak ilerlemelerini hedeflemiş, beraberinde köy çocuklarının eğitimini sağlamak amacıyla yapılmış kurumlardı.

Bu amaçla Türkiye genelinde neredeyse her bölgede, birkaç kentin birleşimi olan yerlerde bu enstitüler kuruldu. Bu enstitülerde öğrencilerin eğitimleriyle birlikte hem gerçek hayatta karşılaşacakları sorunları çözme yetisi kazandırmak, hem de bulundukları köylerin gelişmesini sağlamalarına katkıda bulunmak hedeflenmiş ve eğitim programı yerinde uygulayarak öğrenme şeklinde düzenlenmiş ve uygulanmıştı. Tüm ülke genelinde 21 adet açılan bu köy enstitüleri daha sonra dönemim siyasi yapısı kararıyla kapatıldı. Bir döneme damga vuran ve halen gündemde önemini koruyan bu enstitülerden biri de Van Ernis Köy Enstüsüdür. Van Ernis Köy Enstitüsü son açılan 21. Enstitüdür. Köy Enstitüleri genel olarak bir yerleşke şeklinde düzenlenmiş, içinde yatakhane, yemekhane, işlikler, derslikler, kütüphane, hamam ve idari birimler gibi birçok yapıyı kapsayan kurumlardı. Her bir yapının fonksiyonuna göre yerleşkelerde seçilen yerleri, yapıldıkları yerel malzemeler ve boyutları değişkenlik gösterirdi.

Köy enstitülerinin hamam yapıları da bu okullardaki kullanıcıları temizlik ve hijyen ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla inşa edilen binalardı. Hamamlar, öğrencilerin ve personelin temizlik ihtiyaçlarını karşılamak, hijyenik bir ortam sağlamak ve sağlık sorunlarını önlemek amacıyla kullanılırdı. Köy enstitülerinin hamam yapıları genellikle basit ve işlevsel bir tasarıma sahipti. Çoğunlukla taş veya tuğla yapılar olarak inşa edilirlerdi. Hamamlar genellikle bir soyunma odası (soğukluk) ve yıkanma (sıcaklık) odasından oluşurdu. Hamamlar, öğrencilerin ve personelin hijyen ihtiyaçlarını karşılamasının yanı sıra, sağlık eğitimi de vermek için kullanılırdı. Temizlik alışkanlıkları, vücut bakımı ve hijyen konuları hamamlarda öğretilirdi.

Ancak köy enstitüleri dönemi sona erdikten sonra birçok köy enstitüsü kapatılmış veya farklı amaçlar için kullanılmıştır. Dolayısıyla, günümüzde köy enstitüleri hamamları genellikle işlevsiz veya restore edilmemiş durumdadır.

1.1. Yöntem

Bu çalışma kapsamında Van Ernis Köy Enstitüsü hamam yapısının deprem performansının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma yöntemi olarak kare planlı ve kubbeli bir plana sahip, taş bir yapı olan Van Ernis Köy Enstitüsü Hamamı yıkanma (sıcaklık) bölümünün SAP 2000 programı kullanılarak, sistem elemanlarının ölü yükler ve deprem yükleri altında gerçek davranışının belirlenmesinin sağlanması amaçlanmaktadır. Yapı davranışının belirlenmesiyle, depremlerin sıklıkla yaşandığı ülkemizde, Cumhuriyet dönemi mimarisine güzel bir örnek olan bu yapının gelecekte görebileceği zararlara karşı önlem alınması da sağlanmış olacaktır.

Yapıların deprem performanslarıyla ilgili birçok çalışma yapıldığına literatürde rastlamak mümkündür.

Yapılan çalışmalardan biri, taş ve kubbeli bir yapı olan, Erzurum il merkezinde yer alan Lala Mustafa Paşa Camii örneği olup, Kocaman vd. [2017] tarafından yapının önce katı modeli oluşturulmuş; daha sonra elde edilen malzeme mekanik özellikleri kullanılarak ANSYS analiz ortamında makro modelleme yaklaşımı ile yapısal modeli oluşturulmuştur. Matematik model 'Operasyonel Modal Analiz' ile doğrulanmıştır [Kocaman vd, 2017]

Yapıların deprem performansıyla ilgili yapılmış diğer bir çalışma, Erken Cumhuriyet Dönemi (1923-1950) mimarlık eserlerinden eğitim yapılarından biri olan, İzmir Menemen Şehit Kemal Ortaokulu'nun korunma durumunu ele alan çalışmadır. [Gücü ve Taşcı, 2017]

Bitlis-Ahlat Yöresi taşı (ignimbrit) ile Diyarbakır Karacadag bazaltının fiziksel ve mekanik özellikleri karşılaştırılarak kullanım alanlarının incelendiği bir başka çalışmada, aynı zamanda bu iki taşın yapıdaki dayanımları da araştırılmıştır [Işık, 2007]

Yine taş ve kubbeli bir yapının deprem performansı için yapılmış başka bir çalışma, Ankara Kesikbaş türbesinin sayısal analiz yöntemiyle deprem davranışının belirlenmesidir [Kalak, 2020].

1.2. Van Ernis Köy Enstitüsü

Van Ernis Köy Enstitüsü 1948 yılında Köy Enstitüsü olarak kullanılmaya başlayan, ama aslında içindeki yapıların çok daha önceden yapıldığı ve kullanıldığı bir yerleşkedir. Yerleşke Van gölünün kuzey ucunda, Van'dan 80 km, Erciş ilçesine 18 km, Muradiye ilçesine 24 km uzakta, yaklaşık 150

dönümlük bir alanda bulunmaktadır. Üç tarafı Van Gölü ile çevrili yarımada içinde yer almaktadır.

İçinde 30-40 civarında irili ufaklı birçok yapının yer aldığı yerleşke, önceleri Rus tersanesi, ardından askeri kışla olarak kullanılmıştır. Yerleşkedeki yapıların mimar veya mühendislerine ilişkin herhangi bir bilgiye ulaşılmamıştır. Köy Enstitüsü olarak 1948 yılında, dönemin Millî Eğitim Bakanlığına bağlı olarak açılmış, çok kısa bir süre sonra Köy Öğretmen Okuluna, ardından sırasıyla Ernis İlk öğretmen Okulu, Alpaslan ilk öğretmen Okulu, Muradiye Alpaslan Anadolu Lisesi ve son olarak da Muradiye Alpaslan Fen Lisesine dönüştürülerek eğitim yerleşkesi olarak 2011 yılına kadar kullanılmıştır. Van ve çevresinde yaşana 2011 depremi sonrasında yerleşkedeki yapıların hasar görmesi, bazılarının yıkılması sonucu yerleşke terk edilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1: Van Ernis Köy Enstitüsü Yerleşkesi Genel durumu

Yerleşke yapılarının bir kısmı 1915 yılına kadar Ruslar tarafından tersane ve hizmet binaları şeklinde yapılmıştır. Daha sonra askeri kışla olarak kullanılmış ve bu süreçte de bazı koğuş ve hizmet binaları eklenmiştir. 1948'de Köy Enstitülerinin sonuncusu ve 21.si olarak açıldığında, Enstitü öğrencileri ilk olarak kendi imkanlarıyla fırın ve hamamı yapmışlardır. Yörenin yapı malzemesi olan Ahlat taşıyla yapılan bu hamam yapısı, hem halen neredeyse hasarsız bir şekilde ayakta kalan tek yapı olmasının yanında, enstitü öğrencilerinin kendi imkanları ile yaptıkları ilk yapılardan biri olması nedeniyle de ayrıca önemlidir (Şekil 2).

Yapıda kullanılan Ahlat taşı, bilimsel adıyla "ignimbrit" Bitlis'in Ahlat ilçesinde Nemrut Dağı eteklerinden çıkarılmaktadır. Ahlat taşı, volkanik bir kayaçtır. Dayanıklılığı, işleme kolaylığı ve yaygınlığı nedeniyle bölgede, başta tarihi eserler olmak üzere birçok yapıda kullanılmıştır. Genellikle beyaz, krem, gri, kahve gibi farklı renkleri olan Ahlat taşı, yörede yapılarda halen kullanılan bir yapı malzemesidir. Bu taşın yüzeyi pürüzlüdür ve yüksek dayanıklılığı ile bilinir. Ahlat taşı özgül kütle değerleri 2.6-2.64, basınç dayanımı max.14Mpa civarındadır [Işık, 2007].



Şekil 2: Van Ernis Köy Enstitüsü Yerleşkesinde Hamamın Konumu

1.3. Van Ernis Köy Enstitüsü Hamam Yapısı

Van Ernis Köy Enstitüsü Hamamı, 1948 yılında Köy Enstitüsü olarak kullanılmaya başlayan ve üç tarafı göl ile çevrili olan yarımada şeklindeki yerleşkenin kuzey batı bölümündedir. Köy Enstitülerinin 21. ve sonuncusu olan Ernis Köy Enstitüsünün öğrencilerinin kendi imkanlarıyla ve yine kendiler tarafından yapılan ilk yapılardan biri olması açısından önemlidir. Yine bölgede yaşanan son büyük depremde de ayakta kalmayı başarmış yapıların başında gelir. Diğer yapılar çok büyük hasar alıp çoğu yıkılırken, yığma sistemle ve yörenin malzemesi Ahlat taşıyla yapılmış hamam halen sağlam bir şekilde ayaktadır (Şekil 3). Volkanik taş olan Ahlat taşının farklı renklerini bu hamam üzerinde görmek mümkündür.

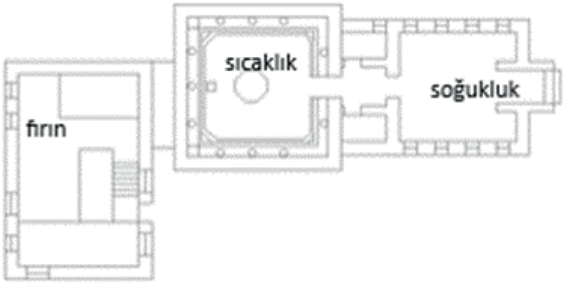
Van Ernis Köy Enstitüsü Hamam yapısı, iki bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm soyunma ve hazırlanma (soğukluk) bölümü olup, 5 m x7m boyutlarında temiz bir açıklığa sahip, iki tarafında dörder adet pencere olan ve güneydoğu

kısmının tam ortasındaki bir kapı ile mekâna girişi yapılan bir plana sahiptir. Hamam yapısının ikinci bölümü, bu çalışmanın da konusunu oluşturan yıkanma (sıcaklık) kısmıdır. Hamamın sıcaklık kısmı ile hazırlanma kısmı arasında iki kenarda tuvaletler yer almaktadır (Şekil 4).

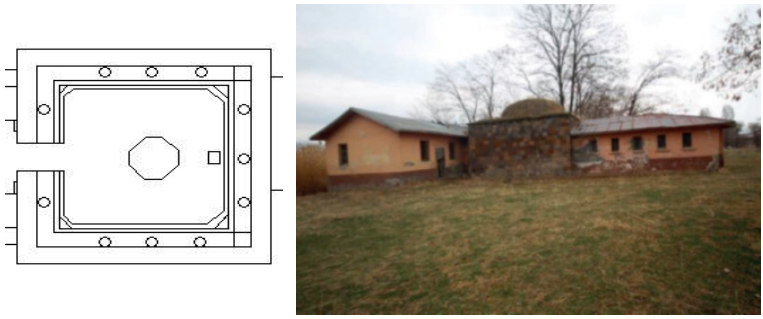
Üzeri kırma çatı ile geçilen soğukluktan, yine tam ortaya denk gelen kapı ile sıcaklık bölümüne geçilir. İç açıklığı 6.4mx6.4m olan kare sıcaklık bölümünün dört kenarında kemerler yer alır. Her kemer içinde de üç adet kurna bulunur (Şekil 5). Hamamın tam ortasında sekiz kenarlı göbek taşı ve üzerinde hamam genişliği kadar kubbe yer alır. Kubbe üzerinde iç mekânın aydınlanmasını sağlayan fil gözü denilen aydınlatma boşlukları bulunur. Son derece muntazam bir işçilikle yapılan hamamın ısıtılması için külhan denilen kısım, hamam ve fırın arasındaki bölgeye yapılmıştır. Fırın hamamın kuzey batı kısmında yer almıştır. Külhandaki ısının aynı zamanda fırın için de kullanıldığı düşünülmektedir.



Şekil 3: Van Ernis Köy Enstitüsü Hamamı



Şekil 4: Van Ernis Köy Enstitüsü Hamamı Genel Planı



Şekil 5: Van Ernis Köy Enstitüsü Hamamı Sıcaklık Kısmı Planı ve Görünüşü

SAP 2000 programında yapının irdelenmesi için yerinde ölçümler alınmış ve tespit için fotoğraflar çekilmiştir. Yapılan ölçümlerde ciddi bir hasar gözlenmese de yer yer bitki oluşumu, uzun zaman kullanılmadığından kaynaklı bakımsızlık ve giderek malzemelerde su-nem ve bakımsızlık nedeniyle oluşan bazı bozulmalar görülmektedir.

Yapıda kullanılan Ahlat taşının dayanımının düşük olması ve yumuşak süngersi özelliği nedeniyle aşınmasının fazla olması, dolayısıyla ısı farklılıklarının, don ve nemli ortamların bu durumu etkilediği, parçalanmalara kopmalara yol açtığı bilinmektedir. Özellikle soğuk dönemlerde çevrimsel olarak etkili olan donma çözülme, yöredeki yapı taşlarının bozulmasındaki en önemli etkenlerden bir tanesidir. Bu da hamam için bir risk oluşturmaktadır. Dolayısıyla hamam yapısının ana öğesi olan Ahlat taşının doğal süreçten dolayı zaman içerisinde özellik kaybı ve tahribatları yapının taşıyıcılık özelliğini etkileyebilecektir. Nitekim yerinde yapılan incelemelerde ve ölçümlerde ciddi bir hasar gözlenmese de yer yer bitki oluşumu, uzun zaman kullanılmadığından kaynaklı bakımsızlık ve giderek malzemelerde su-nem ve bakımsızlık nedeniyle oluşan bazı bozulmalar, bazı yerlerde taşlarda kütle kayıpları, aşınma ve kopma gözlemlenmiştir.

2. Sayısal Modelleme

Van Ernis Köy Enstitüsü Hamam Yapısının ölçüm ve yerinde tespitleri sonrası sayısal modellemeye geçilmiştir. Çağdaş yapıların taşıyıcı sistemlerinin modellenmesi için kullanılan yapı mekaniği prensipleri, yığma tarihi binalar için uygun değildir. Tarihi yapılar strüktür analizinde çoğunlukla sonlu elemanlar yöntemi tercih edilmektedir. Bu yöntem yapının tümü veya bir bölümünü kullanarak, işlem yapılması istenen kısmın sayısal modelini oluşturmakla başlamaktadır. Yapının geometrisi, boyut, şekil ve taşıyıcı sistemi

oluşturan elemanların birleşim noktaları, hareket dereceleri, bina üzerine etki eden yükler ve yapıyı oluşturan malzemelerin doğru tanımlanmasına matematiksel modelleme denilmektedir. Aşağıda yer alan şekillerde Van Ernis Köy Enstitüsü Hamamı'nın yüklere karşı dayanımını için hazırlanan sayısal modeller yer almaktadır.

Dört tarafı kalın taş duvar olan ve bu duvarlar üzerine oturan hamam kubbe ve duvarları genel kabuk elemanı "SHELL" ile modellenmiştir. Ayrıca yapıyı oluşturan taş malzemenin programa tanımlanması için, daha önce yapılmış yayınlar ve yürürlükteki deprem şartnamesindeki değerler göz önünde tutulmuştur. Yapının tümü taş malzemeden yapıldığından birim ağırlık ve elastisite modülleri tek malzeme olarak kabul edilmiştir.

Yapının kendi ağırlığı ve deprem yükleri düşünülerek iki ayrı yük sisteme tanıtılmıştır. Tanımlanan spektrumlar EQx, EQy yüklemeleri olarak iki farklı doğrultuda yapıya uygulanmıştır.

Elde edilen sonuçların yorumlanabilmesi için G+EQx (Ölü yük+x ekseni yönünde etki eden deprem yükü) ve G+EQy (Ölü yük+y ekseni yönünde etki eden deprem yükü) olmak üzere iki farklı yük kombinezonları tanımlanmıştır. [Can ve Ünay, 2012]

Tablo 1'de verilen, Hamam yapısını oluşturan Ahlat taşının mekanik özelliklerine ilişkin deney yapılamadığından, literatür araştırmalarındaki veriler alınmış ve analizlerde kullanılmıştır [Işık, 2007; Işık ve Antep, 2018].

Tablo 1: Van Ernis Köy Enstitüsü Binasında Kullanılan Malzeme Mekanik Değerleri

Malzeme	Birim Hacim Ağırlık (kN/m³)	Elastisite (kN/m²)	Özgül ağırlık (Kn/m³)	Poisson Oranı
Ahlat Taşı	24,5	5000000	24	0,2

Van Ernis Köy Enstitüsünün olduğu alan, Van ili Muradiye ilçesine bağlı olup, 5 bölgeye ayrılmış 2023 yılı "Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası" içinde 1.derece deprem bölgesinde yer almaktadır. Van İli, tektonik bakımdan Avrasya ile Arap levhalarının sıkışma bölgesinde, Kuzey Anadolu Fay Zonu ile Doğu Anadolu Fay Zonu'nun kesişme sahasında yer alması nedeniyle Doğu Anadolu'nun en önemli deprem yörelerinden birisi durumundadır. Son büyük iki deprem 2011 yılında yaşanmıştır.

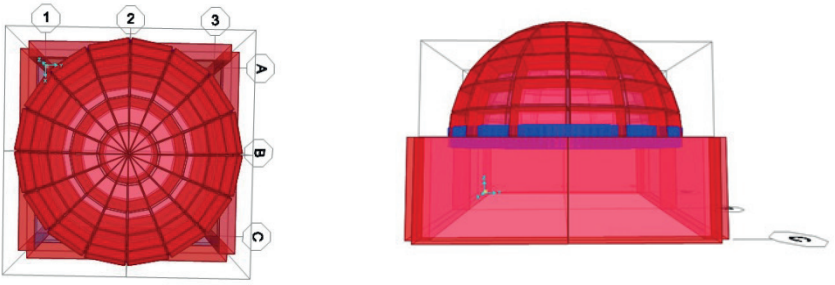
Alüvyon tabakaları üzerinde bulunan ve göl çevresinde olan Van şehrinde kumlu, çakıllı ve killi zemin tabakaları bulunmaktadır. Yer yer zemin yüzeyine 2 metre derinliğe kadar yaklaşan yeraltı suları nedeniyle bazı yapıların temellerinde oturmalar meydana gelmektedir. Hamam yapısı da böyle bir zemin üzerinde ve 1.derece deprem bölgesinde yer almaktadır.

Hamam yapısı hesabında kullanılan spektrum değerleri Şekil 6'de yer almaktadır. Spektrum hesabında 1. Derece deprem bölgesi ve Z4 yapı zemini dikkate alınmıştır. Sönüm oranı olarak 0.05 değeri seçilmiştir.

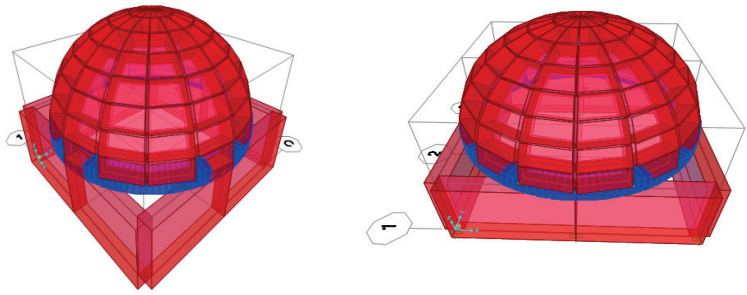


Şekil 6: Van Ernis Köy Enstitüsü Hamamının bulunduğu zeminin spektrum grafiği [URL-1]

Van Ernis Köy Enstitüsü Hamamının SAP2000 üzerinden sonlu elemanlar ile modellemesi Şekil 7 ve 8'de verilmiştir.



Şekil 7: Ernis Hamamı sonlu elemanlar modellemesi, üst ve yan görünüş



Şekil 8: Ernis Hamamı sonlu elemanlar modellemesi, perspektif görünüş

3. Van Ernis Köy Enstitüsü Hamamı Hesap Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Van Ernis Köy Enstitüsü Hamam yapısının hesaplamalarında biri ölü yükler, diğer üçü ise ölü yükler, deprem yükleri ve hareketli yükler olmak üzere dört yükleme kombinasyonu kullanılmıştır. Bunlar;

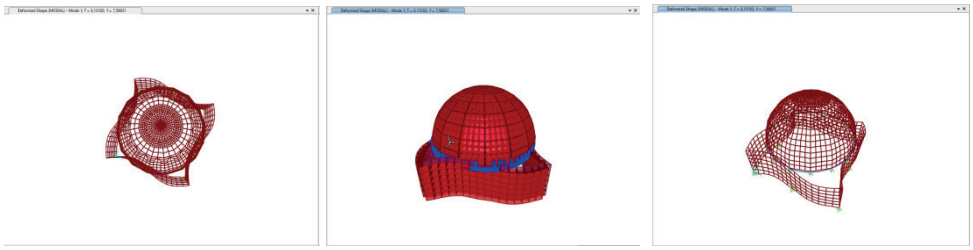
Kombinasyon1: G (ölü yük)

Kombinasyon2: G+Ex (ölü yük ve x yönündeki deprem yükü)

Kombinasyon3: G+Ey (ölü yük ve y yönündeki deprem yükü)

Kombinasyon4: G+Q (ölü yük ve hareketli yük)

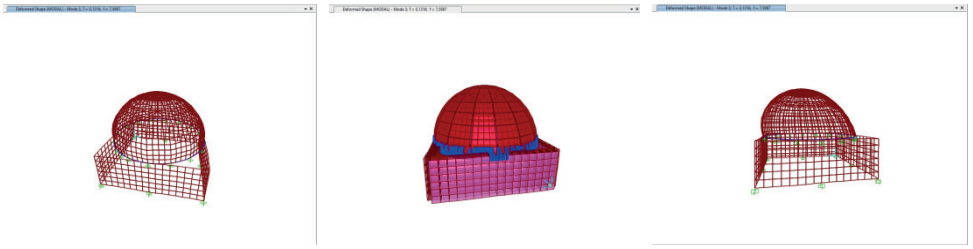
Van Ernis Köy Enstitüsü Hamamının yapısal hesabı yukarıda belirtilen yük kombinasyonları doğrultusunda, SAP 2000 programı ile yapılmıştır. Bütün düğüm noktaları ve taşıyıcı elemanlarda elde edilen kuvvetler, öteleme gerilmelerinin tamamının analiz edilmesi mümkün değildir. Bu nedenle hesap sonuçlarının değerlendirilmesi, SAP 2000 programının ürettiği model üzerinde, basınç, çekme, gerilme haritaları kullanılarak en elverişsiz değerler dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Hesap Analiz Sonuçları Mod 1, Mod 2 ve Mod 3 olarak Şekil 9,10 ve 11'de görülmektedir.



Şekil 9: Mod1- Periyot (T): 0,03109 altında Maksimum Öteleme: 79,28mm



Şekil 10: Mod2- Periyot (T): 0,02992 altında Maksimum Öteleme: 71,247mm

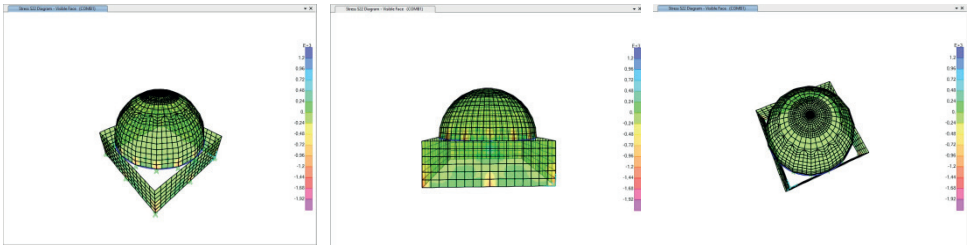


Şekil 11: Mod3 – Periyot (T): 0,1316 altında Maksimum Öteleme: 93mm

Van Ernis Köy Enstitüsü Hamamı yapısına etki eden deprem yükleri için toplam yer değiştirmeler, kombinasyon verileri Şekil 12 ile 15 arasında gösterilmiştir.

Kombinasyon1: s22 gerilmeleri dikkate alınarak Şekil 12'de verilmiştir.

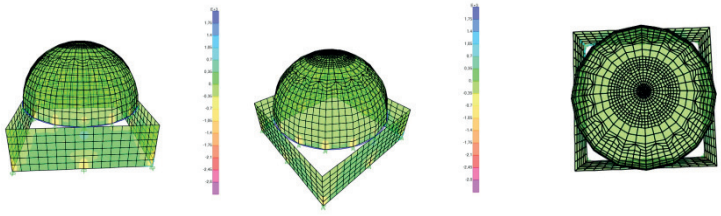
- Öteleme: 0,4mm
- Üst yüzey için; çekme: 1,346mPa, basınç: 2,1mPa
- Alt yüzey için; çekme: 1,346mPa, basınç: 2,1mPa



Şekil 12: Kombinasyon 1

Kombinasyon 2: s22 gerilmeleri dikkate alınarak; Şekil 13'de verilmiştir

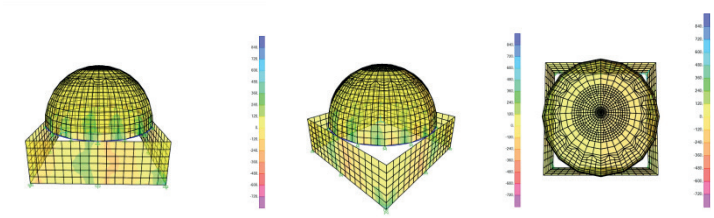
- Öteleme: 1,69mm
- Üst yüzey için; çekme: 1,36mPa, basınç: 3mPa
- Alt yüzey için; çekme: 2mPa, basınç: 2,18mPa



Şekil 13: Kombinasyon 2

Kombinasyon 3: s22 gerilmeleri dikkate alınarak; Şekil 14'de verilmiştir

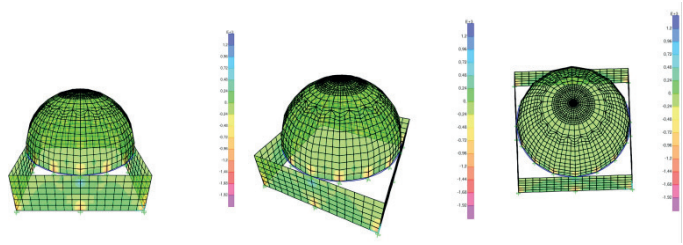
- Öteleme: 1,69mm
- Üst yüzey için; çekme: 2,02mPa, basınç: 3mPa
- Alt yüzey için; çekme: 1,365mPa, basınç: 2,34mPa



Şekil 14: Kombinasyon 3

Kombinasyon 4: s22 gerilmeleri dikkate alınarak; Şekil 15'de verilmiştir

- Öteleme: 0,41mm
- Üst yüzey için; çekme: 1,346mPa, basınç: 2,1mPa
- Alt yüzey için; çekme: 1,346mPa, basınç: 2,1mPa



Şekil 15: Kombinasyon 4

Yapılan analizler sonucunda basınçtan ve çekmeden kaynaklı gerilmelerde max değerin aşılmadığı görülmektedir. Bütün kombinasyonlardaki en büyük gerilmeler Tablo2'de görülmektedir.

Tablo 2: Yapılan Analizler Sonucu Van Ernis Köy Enstitüsü Hamamı Yapısına Ait Elde Edilen En Büyük Gerilmeler (Kayma Gerilmeleri)

Eleman Grubu			G Yüklemesi	G+Ex Yüklemesi	G+Ey Yüklemesi	G+Q Yüklemesi
Hamam	Üst Yüzey	Basınç	1,346	1,36	2,02	1,346
		Çekme	2,1	3	3	2,1
	Alt Yüzey	Basınç	1,346	2	1,365	1,346
		Çekme	2,1	2,18	2,34	2,1

4. Sonuçlar

Köy enstitüleri bulundukları yerlerde gerek köylerin gerekse kentlerin gelişimine katkı sağlayan modern ve toplumu uygarlık seviyesine taşımak için önemli unsurlardan biriydi. En son açılan ve ne yazık ki kısa ömürlü olan Van Ernis Köy Enstitüsü, kısa sürece rağmen bulunduğu çevreye son derece katkı sağlayan günümüz de de simgesel değeri yüksek olan Cumhuriyet Mimarlık Mirasını oluşturan yapılar topluluğunu kapsamaktadır. Bu kurumun ilk ek binası olarak öğrenciler tarafından Ahlat taşı ile yapılan hamam binası, Enstitüden günümüze kalan orijinal yapılardan biridir. Bu çalışma kapsamında 1.derece deprem bölgesinde ve alüvyon zeminde yer alan, yığma taş yapı olarak inşa edilmiş Van Ernis Köy Enstitüsü Hamam Yapısının deprem performansı SAP2000 programı ile belirlenmeye çalışılmıştır. Katı elemanlar kullanılarak sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Oluşturulan modelde, periyotlar, verilen yüklemeler altındaki en büyük ötelemeler ve basınç gerilmeleri elde edilmeye çalışılmıştır. Yapının taşıyıcı sistemi kubbe ve duvarlar

olmak üzere 2 ayrı kategoride, 4 farklı kombinasyonda S22 gerilmelerine göre incelenmiştir. Analizlerden elde edilen maksimum basınç, kayma ve çekme gerilmeleri farklı yük kombinasyonları dikkate alındığında en büyük basınç gerilme değerinin 2.02MPa, en büyük çekme gerilmesinin 3MPa olduğu belirlenmiştir

Hesaplamalar ve analizler doğrultusunda depremden dolayı oluşacak ötelemelerin ortalama ve mantıklı değerlerde çıktığı ve bu yapının deprem performansının iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak uzun zamandır kullanılmayan ve kaderine terk edilen yapının taşlarında, yer yer kütle kayıpları, aşınma ve kopmalar görülmektedir. Zaman içerisinde oluşan likenler özellikle kubbedeki taşlara ayrıca zarar vermeye başlamıştır. Yer yer su etkilerinden dolayı da hamam yapısının duvarlarında ve diğer bazı kısımlarında da rutubet etkileri oluşmuştur. Meydana gelen bu zararları düzeltebilme, yapının bundan sonraki süreçte fazla zarar görmemesi ve korunması ile ilgili çalışmaların yapılması ve bu işlemlerin süreklilik arz etmesi gerekmektedir. Hamam yapısının ana öğesi olan Ahlat taşının doğal süreçten dolayı zaman içerisinde özellik kaybı ve tahribatları yapının taşıyıcılık özelliğini etkileyebilecektir.

Van Ernis Köy Enstitüsü Hamam yapısı, Enstitü içindeki diğer binalar gibi 2011 yılına kadar kullanıldığından, özgünlüğünü korumuştur. Özellikle Cumhuriyet dönemi mimari mirası kapsamında sayılan Van Ernis Köy Enstitüsü Hamamında oluşan hasarlara, özgünlüğünü koruyacak şekilde yapılacak müdahaleler, bu yapıların bir sonraki nesillere aktarılması adına önemli olacaktır.

Kaynaklar

Can, H, Kubin,J, Ünay, A.İ (2012), "Tarihi Yapıların Deprem Davranışını Belirlemek İçin Sayısal Analiz Yöntemleri" *Journal of the Faculty of Engiinering and Architecture of Gazi University, Vol:27, No:1*

Gücü, İ ve Taşçı, B. (2017), "Özgün İşlevini Sürdüren Tarihi Eğitim Yapılarının Korunmasına Yönelik Bir Değerlendirme:Menemen Örneği, İzmir" Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu / 2-3-4 Kasım 2017

Işık, N. (2007), "Geleneksel Yapılarda Taş Malzemenin Fiziksel Kullanım Alanları ve Özelliklerinin Belirlenmesi;Ahlat taşı ve Diyarbakır Bazaltı Karşılaştırma Örneği"1.Uluslararası Dünden Bugüne Tatvan ve Çevresi Sempozyumu, Tatvan, 2007

Işık, E ve Antep, B. (2018), "Ahlat İlçesinde Yer Alan Tarihi Yığma Minarenin Yapısal Analizi", Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, c. 7, sy. 1, ss. 46–56, 2018, doi: 10.17798/bitlisfen.416050.

Kalak, M. (2020), "Kesikbaş Türbesi'nin Sayısal Analiz Yöntemiyle Deprem Davranışının Belirlemesi" Kitap Bölümü, Mimarlık Üzerine 1, Dr.Öğr.Üyesi Zuhal ÖZÇETİN, Editör, iksad publishing house, Ankara, ss.54-79, 2020

Kocaman, İ, Okuyucu, D. ve Kazaz, İ. (2017), "Tarihi Yığma Yapıların Dinamik Davranışlarının Hesabında Gerekli Malzeme Özelliklerinin Tayini: Lala Paşa Cami Örneği" Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu / 2-3-4 Kasım 2017

URL-1: https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/ozetRapor.xhtml(Van Ernis için Spektrum Değerleri: Erişim tarihi 10 Haziran 2024)

TARİHİ YAPILARDA SU ODAKLI TASARIM: KONYA İNCE MİNARELİ MEDRESE DONANIM KURULUŞU ÜZERİNDEN BİR BAKIŞ

Sevda Duygu KOLBAY

Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Gedik Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi,
duygu.kolbay@gedik.edu.tr

Özet

Tarih boyunca, uygarlıkların imar ve inşa faaliyetlerinde yönlendirici bir tasarım değeri olarak suyun etkisi ön plana çıkmaktadır. Yerleşim alanlarının seçiminde ve yapı kuruluşunda, suya dair gereksinimlerin karşılanış yolu ve suyun aşındırıcı etkilerinin denetimine yönelik kararlar uygarlıkların su kültürünü görünür kılar. Kentlerin kazandığı ayırt edici kimlik, kaynaklar, koşullar ve teknoloji etkileşimi sınırlarında gelişir. Çalışmanın amacı, Konya kent arkeolojisinde etkin, döneme has su yönetim altyapısını, bir yapı özelinde mekân kurgusu, yapı malzemesi seçimleri, donanım elemanlarının bağıntısı üzerinden yorumlamaktır. Bu hedefle, öncelikle Selçuklu Dönemi Konya Kenti morfolojik ve hidrolik potansiyelleri açılımında şehrin kaynakları ortaya koyulmuştur. Ardından, su yönetim işleyişi Konya İnce Minareli Medrese üzerinden incelenmiştir. Mekân organizasyonu, yapı elemanları kuruluşu ve yapı malzemeleri özellikleri tanımlanmıştır. Ardından, kanallar, galeriler, havuz, kuyu, sarnıç ve çeşmelerden oluşan kolektif donanım kuruluşu ele alınmıştır. Çalışmanın metodolojik safhasından elde edilen bulgular değerlendirilerek tarihi yapılarda su yönetim işleyişini imgesel ve işlevsel karşılıklarıyla kavramaya yönelik çıkarımlar oluşturulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Su temini, Su denetimi, Su-nem etkisi, Kâgir yığma yapılar

Abstract

Water has been a guiding design value in the construction and urbanization activities of civilizations. Water requirements and controlling the corrosive effects of water forms culture in building and urban development. The distinctive identity gained by cities develops within the boundaries of the interaction of resources, conditions, and technology. The aim of the study is to interpret the infrastructure specific to the urban archaeology of Konya through space organization, building material preferences, and relation of components of buildings. For this objective, primarily, the city's resources were analyzed in terms of the morphological and hydraulic potentials of Konya Province in the Seljuk Empire period. Subsequently, the process of organization was examined specifically on a building, the Slender Minaret Madrasa of Konya. For this purpose, the planning, the constitution of the building elements, and the hygroscopic features of building materials were identified. Collective operation of channels, galleries, pools, cisterns, and fountains are investigated. Through the findings, inferences for the appreciation of water culture in heritage buildings, along with their imaginative and functional considerations, were drawn.

Keywords: Supply of water, Control of water, Water-moisture effect, Masonry structures

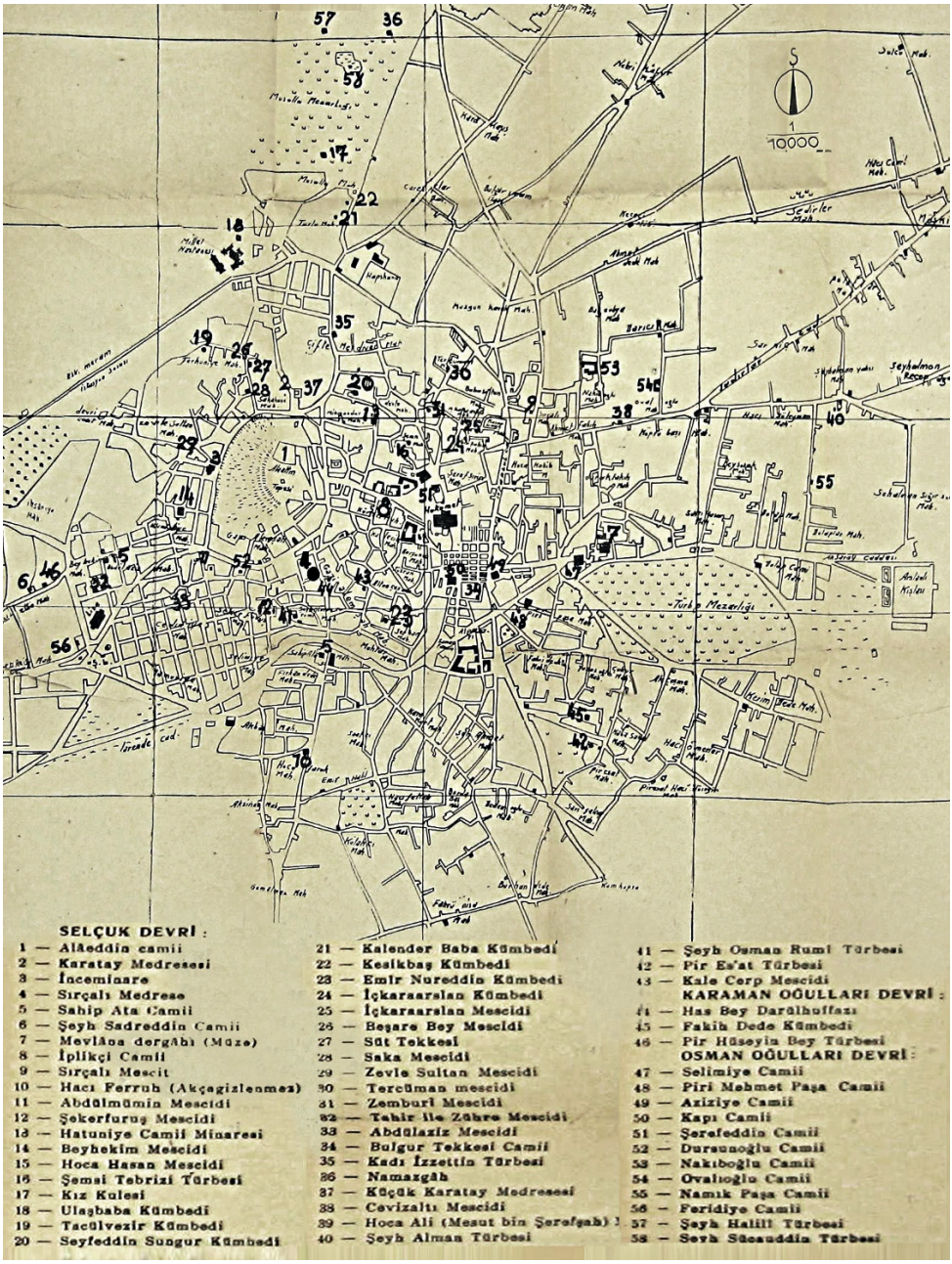
1. Giriş

Kentlerin devingen oluşumunda doğal peyzaj, kültürel peyzaja dönüşürken "su" kuralları belirler. Su, vazgeçilmez bir ihtiyaç, aynı zamanda aşındırıcı etkisine karşı önlem alınması gereken bir risk unsurudur. Yerin kaynaklarından faydalanma, yerin koşullarına uyum sağlama yolu uygarlıkların özgün yapı teknolojisini görünür kılmaktadır. Kent kimliği, kaynaklar, koşullar ve teknoloji etkileşiminin çizdiği sınırlar içinde gelişir. Bu bağlamda, Konya kent arkeolojisinde Anadolu Selçuklularının izleri okunaklıdır. Dönem yapılarında özgün donanım kurgusu, su kaynaklarının ve zemin koşullarının farkındalığıyla alınmış kararlara işaret eder. Konya, kuru ve çorak bir ovada yer almasına karşın yüzey suyu kaynağı ile beslenmiş bir su şehridir. Su yönetim altyapısı farklı işlevsel arayışlarla çeşitlenen donanım elemanları kuruluşuna dayalı olarak çözümlenmiştir. Söz konusu sınırlarda yerleşme ve yapı düzeyinde yüzey ve yeraltı sularının nasıl yönetildiği konusu çalışmanın çıkış noktasını oluşturmaktadır. Kentin su ile beslenmesini sağlayan isale ağının yanı sıra, yapıları su etkisine karşı korumada etkili, yeraltı suyu kaptajını[1] sağlayan altyapı donanımının araştırılması kaynaklar, koşullar ve Anadolu Selçukluları su kültürünü ilişkilendirmek açısından önemlidir. Çalışmanın amacı, su ile ilgili veriler üzerinden bir yapı özelinde mekân kurgusunu, yapı malzemesi seçimlerini, donanım elemanlarının bağıntısını kuramsal düzeyde yorumlamaktır. Bu hedefle, öncelikle Selçuklu Dönemi Konya Kentinin morfolojik ve hidrolik potansiyelleri açılımında şehrin kaynakları ortaya koyulmuştur. Ardından, su yönetim işleyişi bir yapı özelinde, Konya İnce Minareli Medrese üzerinden incelenmiştir. Yapının mekân organizasyonu, yapı elemanları kuruluşu ve yapı malzemeleri higroskopik özellikleri tanımlanmıştır. Ardından, kanallar, galeriler, havuz, kuyu, sarnıç ve çeşmelerden oluşan kolektif donanım kuruluşu ele alınmıştır. Çalışmanın metodolojik safhasından elde edilen bulgular değerlendirilerek Anadolu Selçuklu mimarisinde su yönetim işleyişini imgesel ve işlevsel karşılıklarıyla kavramaya yönelik çıkarımlar oluşturulmuştur.

1 DSİ Hidroloji Terimleri Sözlüğü'ne göre [48], kaptaj terimi kaynak suyunun boru ve kanallarda toplanması anlamını karşılamak amacıyla kullanılmaktadır.

2. Konya Kenti Fiziki Coğrafyası ve Su Kaynakları Yönetimi

Kentin mimari dokusu, suyun belirlediği ekonomik, politik ve coğrafi koşullar etkisinde biçimlenir. Kent, kaynaklar fışkıran tepelerin eteğinde bulunur. Su barış zamanı yaşamı canlandırmakta, kuşatmalar esnasında ise kent duvarlarını çevreleyen kanalları doldurarak kentin sınırlarının korunmasını sağlamaktaydı [1]. Anadolu Selçukluları kentin kuruluşunda, kaynaktan yayılan huzmeler halinde suyolları oluşturup, bu yollar üzerine hanlar, kervansaraylar gibi çeşitli işlevlerde yapılar kurmuş ve su bulunmayan yerlerde ise kuyular yaptırmıştır [2]. Konya, doğu-batı istikametinde uzanan sıra dağların iç kısmında, deniz seviyesinden 1000m yükseklikte bir yayla düzlüğü kenarında yer alır. Konya Ovası olarak bilinen bu alan dolmuş bir göl tabanı olup bazı kısımları bu dönemde henüz bataklık veya göl halindedir. Konya Ovası'nın en çukur yeri, şehrin kuzey-doğusunda yer alan Aslım Bataklığı'dır. 975m kotundaki bu bataklıktan yükselen eğim şehrin ortasında Alaeddin Tepesi'nde 1080m'ye ulaşır. Doğuda çevreleyen alçak tepecik silsileleri ve hemen batısından yer alan deniz seviyesinden 2010m'de Loras Dağı, 2319m'de Erenler Dağı iç bükey bir alan tanımlamaktadır [3]. Yazınsal kaynaklar, etrafı dağlar ile sınırlandırılmış olan bu havza içinde yüzey suyu mevcudiyetine değinmez. Bu noktada, kent morfolojisi ve litoloji suyun hareket limitlerini belirler. Kentin sınırları, yapıların dağılımı, su donanım ağı gelişimi üzerinden de okunaklıdır (Şekil 1).



Şekil 1- Selçuklu Dönemi yapılarının Konya Kent içerisindeki dağılımı [6]

Ancak, kentin etrafında akarsu ve göllerden oluşan kaynakların kanallar aracılığıyla merkeze taşındığı, satıh suyunun yine bu kaynaklara bağlanma yoluyla tahliye edildiği bilgisi ile karşılaşılmaktadır. Civarda bulunan su kaynakları; Tuz Gölü, Beyşehir, Suğla, Ilgın ve Akşehir Gölleri'nden ve Çarşamba Çayı, Meram Çayı, Melendiz Çayı'ndan, Neolitik Çağ'dan itibaren su yapıları oluşturularak faydalanılmıştır [4].

Su temininin yanı sıra zemin niteliğini etkilen yeraltı suyu ve satıh sularına bağlı doygun zemin profili yapı ve yerleşme ölçeğinde su yönetim gereksinimi sebebidir. Mevsimlik yağışlar etkisiyle oluşan sel ve taşkınlar kapalı havza konumundaki kentin tarihinde yönetilmesi gerekmiş su ile bağıntılı risk unsuru olarak kayıtlarda görünür. Selçuklu Sultanı I. Alaeddin Keykubat tarafından inşa edilmiş olan Kent surları sadece savunma amacıyla değil sel sularının toplandığı "yirmi gez[2]" derinlikte bir hendek ile kenti çevreleyen bir hat kurma arayışıyla da sınırları tanımlar. Bu hendekte toplanan su kuzeydoğudaki göle deşarj edilmiştir [5]. Kent duvarları ile sınırların tanımlandığı alanda suya doygun zeminlerin ıslah edilmesi, yeraltı suyunun depolanması ve yüzey sularının kent merkezine taşınması arayışına yönelik karşılıklar su yönetim altyapısında ön plana çıkar.

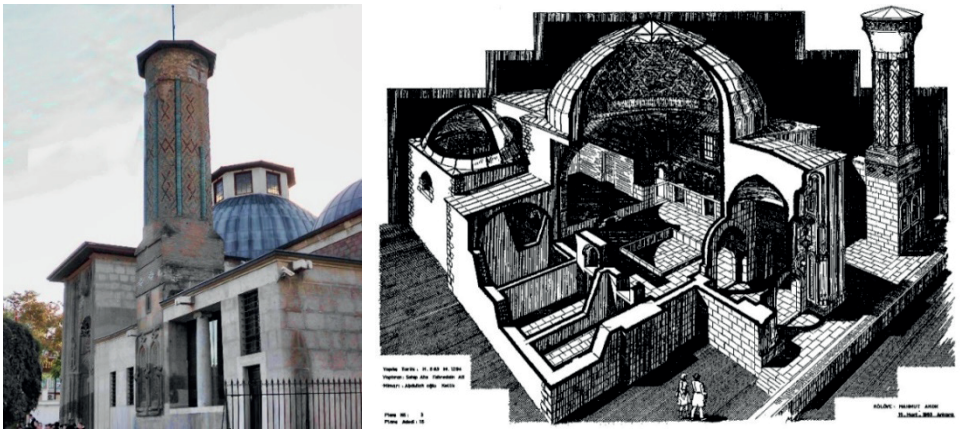
Ayrıca, su temini için döneme özgün altyapı mevcuttur. Suyun kıt ve kıymetli olduğu coğrafyalarda yaygın olarak kullanılmış olan sulama kanalı sistemine Anadolu Selçukluları mimarisinde de rastlanmaktadır. Kanat olarak adlandırılan kadim sulama sisteminin ilksel uygulaması İran'ın kuzeyinde bulunmakta ve yaklaşık 3.000 yıl öncesi ile tarihlenmektedir. Su toplamak ve taşımak üzere tasarlanmış şaftları birbirine bağlayan tünellerden oluşan teknoloji Mezopotamya'dan Akdeniz'e, Mısır'dan Orta Asya'ya geniş bir alan içinde yayılmıştır [7]. Kentte barınmış öncül medeniyetlerde suyun kanallar aracılığıyla şehir merkezine ulaştırıldığına dair izler bulunsa da yapılı çevre ile bütünleşen su sistemi ancak Selçuklular Dönemi'nde kurulmuştur. Selçuklular Konya'yı fethedince önce mevcut kanal sisteminden faydalanmış, ardından bu sisteme Selçuklu Veziri Sahip Ata Fahrettin Ali kendi adıyla "Sahip Su Cetvelleri" olarak anılan bir kanal eklemiş ve tüm sistemi belli bir esasa bağlamıştır [8]. Bu kanalları beslemiş olan su, şehrin batısındaki dağlardan gelmiştir. Meram Suyu ırmak üzerinden açıktan Konya Kalesi'nin batı kapısı tarafında bulunan Havzan olarak adlandırılan maksime gelip, buradan toplanarak künkler ile dağıtılmıştır. Yazın suyun şehre inmediği zamanlarda ise kuyular ve dolaplar aracılığıyla su sağlanmıştır [2].

2 "Gez" mesafe ve uzunluk belirtmek için kullanılan, "arşın" ile eşdeğer karşılık yakalayan Farsça kökenli bir ölçü birimidir. Bir gez 104 santimetreye eşittir [49].

Kentin fiziksel olanakları hidrolik potansiyeller açısından değerlendirildiğinde, isale hattının yapı ile nasıl bütünleştirildiği suyun teminine yönelik arayışların cevabını oluştururken, su ve nemin tahliyesinin nasıl sağlandığı suyun denetimine yönelik karşılıkları yansıtmaktadır. İşleyiş günümüze ulaşan tarihi yapılar üzerinden gözleme açıktır.

2. İnce Minerali Medrese Mimari Özellikleri

İnce Minareli Medrese, Alaaddin Tepesi'nin batı tarafında Sultan Kapısı yolu üzerinde Binari Mahallesi'ndedir. Sahip Ata olarak anılan, Selçuklu vezirleri Fahreddin Ali bin Hüseyin tarafından, Darül Hadis olarak yaptırılmıştır. Mimarı Kölüg bin Abdullah'tır [6]. Günümüzde Taş ve Ahşap Eserler Müzesi olarak işlevlendirilmiş olan yapı bir parçası olduğu külliyeden günümüze ulaşan tek birimdir. Kuruluşunda, medresenin kuzeyinde yıkılmış olan mescidin revakı minareye bitişiktir. 1901 yılında yıldırım düşerek üst kısmı yıkılan tuğla minare ise iki şerefelidir [9]. Yapıyı diğer uygulamalardan ayıran bir taç kapı ve ona bağlı bir giriş mekân çözümü bulunmaktadır. Böyle bir kompozisyon ile Selçuklu Dönemi'nde veya sonrasında karşılaşılmaz. Yanına mescit yerleştirilmiş bir başka medrese örneği de yoktur [11]. İnce Minareli Medrese'de bu bağlamda özgünleşen detayların yanı sıra gelenekselleşerek Anadolu Selçuklu yapı kültüründe yer edinmiş kararların mevcudiyeti dikkat çekicidir (Şekil 2).



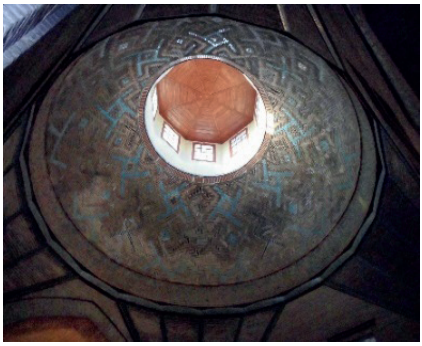
a **b**

Şekil 2- İnce Minareli Medrese. a-tac kapısı ve minaresi, b- aksonometrik perspektifi [10]

Yapı, kapı, dehliz, kubbeli mekân ve çevreleyen hücrelerden oluşur. Portalden ana hacme bir dehlizle girilir. Buradan tek bir kubbenin örttüğü mekâ-

na geçilir. Merkezdeki sırlanmış tuğla kubbe Karatay Medresesi ve Sahip Ata Hanikah'ındaki gibi ışıklıkla tamamlanır. 10.90x10.90m ebatlarındaki mekânın ortasında bir havuz vardır. Bu düzenek yapı kuruluşunda oluşturulmuş, Karatay Medresesi'nde olduğu gibi sonradan ilave edilmemiştir. Bu mekânın batısında beşik tonoz ile örtülen önü açık bir eyvan bulunur [2].

İnce Minareli Medrese'nin mekân kurgusunda merkez ve doğrultu arayışı ön plana çıkar. Kubbeli ve eyvanlı olarak gelişen Anadolu medreseleri esasları belirli bir plan şemasından hareketle mimari öğelerin kuruluşu açısından çeşitlilik oluşturulmuştur. Avlunun üzerinin kubbe ile örtülmesiyle kubbeli medrese planı ortaya çıkmıştır. Anadolu'da ilk medreseler kubbeli tiptedir. Bunların ilk örneği Bosra Gümüştekin Medresesi (1136) devamı olmayan tek örnek halinde kalmıştır. Ancak, sonrasında Anadolu'da başlayan kubbeli medrese kuruluşu devamlı bir gelişme göstererek toplu mekân çözümü için bir altlık oluşturmuştur [12]. Anadolu Selçukluları'nda kullanılmış ve geliştirilmiş olan kapalı ve açık avlulu medrese tipleri arasındaki en belirgin farklılık kapalı avlulu tipte söz konusu mekânın kubbeyle örtüldüğü için kare biçimli bir dörtgen plan düzeninde gelişimine, açık avlulu işleyiş kurgusunda ise avlunun çoğunlukla giriş aksı doğrultusunda dikdörtgen biçimli oluşuna dayalıdır [13]. Benzerlik ve tekrar içeren arayışların Selçuklu uygarlığının coğrafi sınırları içindeki mevcudiyeti ile dikkat çekicidir. İnce Minareli Medrese'nin kubbe ile merkezileşen tasarımı Tokat'ta ve Niksar'da 12. yüzyılda yapılmış olan ve Orta Asya konut yapıları izlerini taşıyan Yağıbasan Medreselerini, merkezi kubbesiyle çağrıştırırsa da bu yapıda kubbeli kapalı medrese planı ile açık medrese tipolojisinin kesiştiği bir başka deneme vardır. İnce Minareli ve Karatay Medreselerinde açık medreselerden ayrılan tek özellik avlunun yerine kubbeli hacmin geçmesidir [11]. Kubbe ile kurulan merkezi işleyiş ve izdüşümünde yer alan havuz su yönetiminin gelişimi açısından izlenebilecek yönlendirici bir işleyiş sunmaktadır (Şekil 3).



b



c



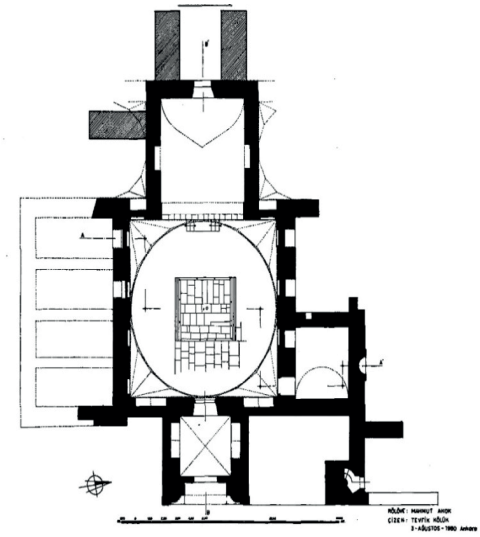
d



e



f



a

Şekil 3- İnce Minareli Medrese merkezi kubbe ve havuz kuruluşu. a-plan [10], b-kubbe, c- kubbe pandantifi, d-havuz ve destekleyen kanal, e-havuz, f-kubbeli mekan ve eyvan kesişimi

2. Yapı Malzemeleri Seçimi ve Su-Nem Etkisine Dayanımı

Anıtsal mimari oluşumda, suyun aşındırıcı etkisine karşı ürün seçimi ve detay çözümleri ile üstün dayanım kazanan tasarım yaklaşımı hâkimdir. Uzun süreli tecrübe ile geliştirilmiş olan geleneksel yapı teknikleri bu dönemde malzemenin zayıf ve güçlü özelliklerinin bilincinde olunan bir sürece işaret etmektedir. Su yapı malzemeleri içinde farklı oranlarda tutunur. Bu değer, malzemenin su emme kapasitesine, taneciklerin porozitesine[3], geometrik dağılımına göre değişkenlik göstermektedir. İnce Minareli Medrese taş yığma sistemde inşa edilmiştir. Kâgir malzemeler, gözenekli iç yapısı nedeniyle su etkisine karşı hassastır. Gözenekler, kılcal yollarla suyu depolar. Yapıda kullanılmış olan taş türü bu bağlamda porozitesi yüksek taş türü ile belgelenmektedir.

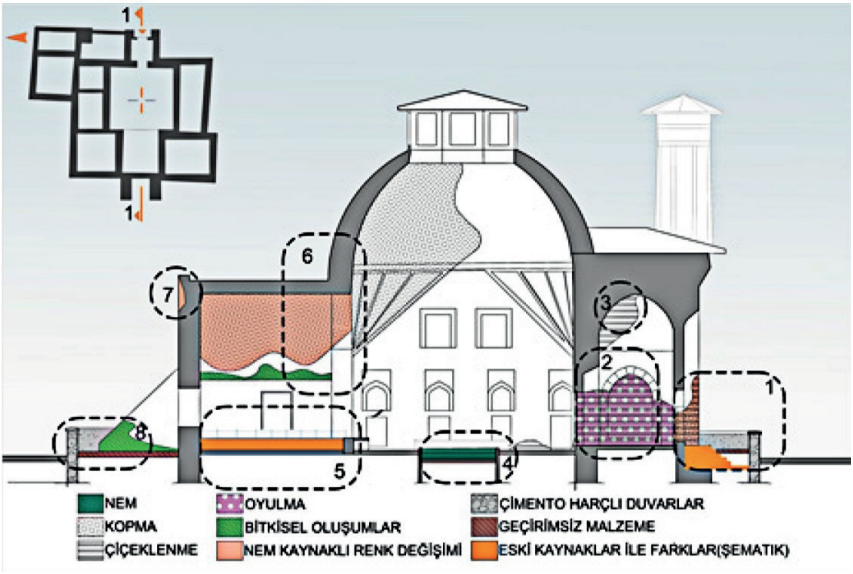
Antik çağdan beri çokça kullanılan sille taşı İnce Minareli Medrese'nin yanı sıra Konya mimari dokusundaki eserlerin birçoğunda kullanılmıştır [14]. Yöresel olarak sille taşı adını taşıyan, trakit genellikle gri renklidir, magmatik kökenli olup, içeriğindeki silis oranı %62-64'tür. Diğer magmatik taşlar gibi muhtelif doğrultularda çatlaklar içerir [15]. Yapıda kullanılmış olan Trakitin porozitesinin yüksek olduğu ve minerallerinin iğnemsi nitelik gösterdiği, mineral çaplarının 1μm'ye kadar düştüğü tespit edilmiştir. Kayacın bu fiziksel özellikleri suyun malzeme bünyesine kolay alınmasına ve fiziksel ve kimyasal bozulma süreçlerinin başlamasına neden olmaktadır [16]. Yapıda ağırlıklı olarak kullanılmış olan yapı malzemesinin suya ve neme karşı duyarlı olduğu görülmektedir. Selçuklu Devrinden günümüze taşınan yapının bu süreçte su ile bağlantılı hangi etkilere maruz kaldığı ve bu etkilerin ne şekilde yönetildiği tarihi yapıların üretiminde geçerli olmuş su yönetim bilincini özümsemek için bir yol oluşturmaktadır.

3. Su ve Nem Kaynaklı Bozulmalar

Konya ve çevresindeki anıt eserlerdeki su ile bağlantılı sorunlar yeraltı statik su dengesinin bozulması, tarihi su kuyularının kapatılmış olması, çevre drenajdan sızan sulara bağlı olarak ortaya çıkmaktadır [23]. Arşiv kayıtlarının belgelediği üzere İnce Minareli Medrese de bu sebepten çeşitli zamanlarda, birçok onarım görmüştür. Osmanlı Dönemi'nde 1876 ve 1899 yıllarında tamir ve takviyeler yapılmıştır [24]. Türkiye Cumhuriyeti Dönemi 1960-1974 yılları arasında yapılan müdahaleler Mahmut Akok [25] tarafından etraflıca ele alınmıştır. Dış cephede olduğu kadar iç mekanlarda giriş holü, eyvan

3 Porozite boşluklu gereçlerde birim hacme düşen boşluk miktarı, gözenekliliği ifade eder. Geçirimlilik bir gerecin gözenekliliği (porozitesi) ile yakından ilgilidir [50].

tonozu, kubbe ve havuzda da taş bozulmalarının olduğu görülmektedir. Yapı birçok basit onarım geçirmiştir; Aydınlık feneri, aydınlık feneri pencere ve ahşap kanatlarının yenilenmesi, çini panolarda oluşan boşlukların doldurulması, derz aralarının yeniden doldurulması, çürüyen taşların yenilenmesi, yer kaplamalarında yenilenmesi ve çevre düzenlenmesi ve temizliği sağlanmıştır [51]. Ancak, yapıda su ve nem etkisiyle bozulmalar döngüsel olarak belli periyotlarla tekrarlanmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4- İnce Minareli Medrese'de bozulmalar ve olası sorun kaynakları [52]

Su ve nem etkisiyle kagir yığma yapılarda oluşan bozulmalar farklı şekillerde gelişebilmektedir. Kılcallık yolu ile yükselen su bağlayıcının çözülmesine, yapı malzemelerinde kabarma/kavlanma etkisi ortaya çıkarabilmektedir [17]. İnce Minareli Medrese'de zeminden kapilarite yoluyla yükselen yağmur suları taç kapının ve minarenin kaidesinin alt kısmını bozmuştur. Bu bozulma her geçen gün kademe kademe yukarıya doğru yükselmektedir. Bu sorunun giderilebilmesi için yapının yağış sularından, su ve nem etkilerinden korunması gerekir. Restorasyon yapılırken sadece taç kapının görünümünden ziyade yapının temellerinde su ve nemin uzaklaştırılmasına yönelik tedbirlerin de alınması gerekir [53].

Malzemelerin ıslanma-kuruma döngüsünde sıcaklık farklılıkları ile don etkisi oluşabilmektedir. Donma-çözülme süreçlerinde malzeme gözenekleri arasına kristalleşme yoluyla giren tuzlar malzemenin aşınmasına neden ola-

bilmektedir [18]. Bozulmalar yüzeysel olabileceği gibi kesit derinliğine işleyerek "rölyef türü bozulma" olarak tanımlanan pul pul ayrılma, yapraklar halinde soyulmalar şeklinde etkiler ortaya çıkarabilmektedir [19]. Ayrıca, suyun taş bileşimindeki minerallerle kimyasal tepkimeler meydana getirmesi sonucu tuz kristalleri yüzeyde çiçeklenme oluşturur [20]. Tüm bu etkilerin yanı sıra, nemin bulunduğu ve gün ışığının etkimediği koşullarda gelişen mikroorganizmalar malzeme yüzeyinde sarı, yeşil, kahverengi, pembe, gri renkli likenik oluşumlara neden olabilir [21]. Nispi nem ve sıcaklık değerleri artarken havalandırmanın sağlanamaması durumunda ise küflenme oluşabilir [22]. İnce Minareli Medrese tonozlu geçiş alanında çiçeklenme, renk değişimi ile bu etki okunaklıdır (Şekil 5).



a b c

Şekil 5- İnce Minareli Medrese'de gözleme açık bozulmalar. a-dehliz duvarları üzerinde tuzlanma, b-giriş kaidesinde kılcal çatlaklar ve kavlanma, c-tac kapıda kapiler su etkisi

Yapının zemininden kaynaklı su ve nem sorunlarından ötürü 2001 yılında eyvan zemininde açmalar yapılmış, havuzu besleyen kanal mevcudiyeti ile karşılaşılmıştır [26]. Kanalın açığa çıkarıldığı dönemde içerisinde su gözlenmediği ve hale hazırda hasarlı olduğu tespit edildiği için işlev dışı kaldığı kabul edilip eyvanın zemini yükseltilerek sergilenmeye başlanmıştır. Ancak

değişen koşullar neticesinde su kanalında dönemsel / sürekli su akışı başlamış olma ihtimali medresenin nem probleminin kaynağının tespiti çalışmalarında göz önüne alınması gereken noktalardan biridir [52].

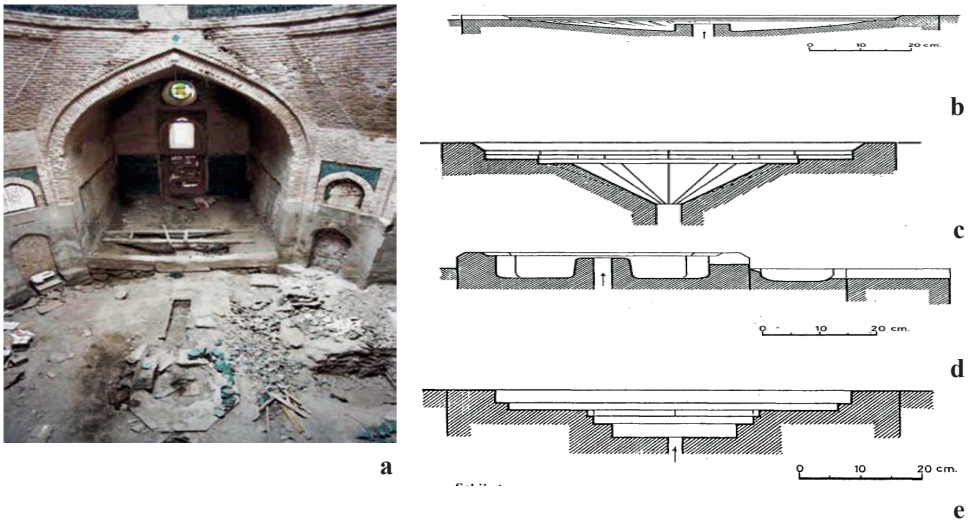
İnce Minare, Karatay ve Sırçalı Medreselerde 1975 sonrasındaki onarımlarda yapılan müdahalelerin yinelenen hasarlarla sonuçlanması su ve su yönetim sistemi ile bağıntılı olarak yoruma açıktır. Konya ve çevresindeki anıt eserleri tehdit eden kronik tahribatların duvarlarda görünen- zeminden kaynaklanan- aşırı rutubetlenmeye bağlı olarak meydana gelen bozulmalar değerlendirildiğinde, Sille taşı adı verilen andezit cinsi taş ile inşa edilmiş olan yapılarda rutubetlenmenin had safhaya ulaştığı bulgusu ortaya çıkmaktadır. Bu durum, mimariye ve taş işçiliğine hâkim dönem yapı ustalarının su ve nemi çekme özelliği fazla olan bu taşlarla inşa ettikleri yapılarda su ve nem tesirinin yönetilmesi için gerekli çözümler ürettikleri çıkarımını doğrular [23]. Bu noktada, suyu toplayıp, biriktirip, tahliyeye dayalı işleyiş ve havalandırma su tablası seviyesini düşürülmesi kültür mirasının günümüze taşınmasında etkilidir.

4. Özgün Donanım Bileşenleri ve Su Yönetimi

Tarihi yapılarda mevcut donanım elemanlarına fayda değerleri açısından bakıldığında, havuz, kuyu, kanallar, galeriler, sarnıçlar ve çeşmelerden oluşan işleyiş ile suyun bir kaynaktan yapıya taşınmasını, suyun toplanmasını, depolanmasını ve tahliyesini sağlayan su akış ağı kurgulandığı görülür. Su yönetim altyapısı gerek yapının günümüze ulaşmasında gerekse geleceğe güvenli taşınmasında etkin tasarım değeridir. Bu açılım, İnce Minareli Medrese'de ve Anadolu Selçukluları mimarisinde karşılığı yakalanan donanım bileşenleri aracılığıyla sınıflandırılabilmektedir. Altyapı kuruşunda su temini ve su-nem denetimi sağlayan iki ayrı donanım oluşumu okunaklıdır.

Havuz, kuyu gibi esas su yönetim elemanının merkezde olduğu işleyiş, yapı ağırlık merkezinde kurduğu dengeler açısından fonksiyonel bir karşılık yakalarken imgesel açıdan da bir geleneğin uzantısını yansıtır. Selçuklu uygarlığında etkin su kültürünü salt işlevsellik ile bağdaştırmak suyun varlığının mimariye kattığı sembolik karşılığı yok saymak olacaktır. Bu bağlamda, Anadolu Selçuklu medreselerinin plan kurgusuna hâkim olan merkezi yönelim eğilimi, avlu veya kubbe ile tanımlanan bu merkezin iz düşümüne gelen havuz veya kuyu gibi donanım elemanı ile güçlendirilir. Tek kubbeli mekânın bir merkez, eyvanın yönlendirici bir doğrultu oluşturduğu düzende suyun bir kült olarak etkisini imgelemdeki yansımaları bağlamında anlamlıdır.

Buna göre, orta mekânın gök-kubbe temsili, kubbe altında ve mekân merkezindeki havuz, gök, yer, su ana unsurlarını da birleştirmektedir [27]. Bu anlayış, eski kozmolojilerin 'evreni çevreleyen kozmik okyanus' imgesiyle uyumlu görülür. Aşağıda, yeryüzü ile veya yukarıda evrenin üst sınırlarındaki bilinmeyene ait bir boyut ile özdeşleştirilir [28]. Havuz bağlamsal açıdan mekânda bir odak noktası oluşturmaktadır. Kapalı avlunun merkezinde yer alan havuz ve besleyen donanım kuruluşu İnce Minareli Medrese'nin yanı sıra Karatay, Sahip Ata, Ali Gav Medreselerinde de bulunmaktadır. Kubbealtı havuz, Asya merkezi mekân geleneğinin bir ürünüdür. Afyon Çay, Isparta Atabey Ertokuş, Kırşehir Carabey Medreselerinde de benzer kubbe-havuz ilişkisi bulunması Anadolu Selçukluları'nın bu arayışını yansıtır [29] (Şekil 6).



Şekil 6- Fıskiyeli çeşme çanağı zemin döşemesine gömülmüş havuzlar; a-Sahip Ata Hankahı [30], b-Konya Karatay Medresesi, c-Amasya Gök Medrese, d-Konya Hasip Dede Köşkü, e-Ankara Hacı Bayram Çilehanesi Çeşmesi kesitleri [31]

4.1. Havuz

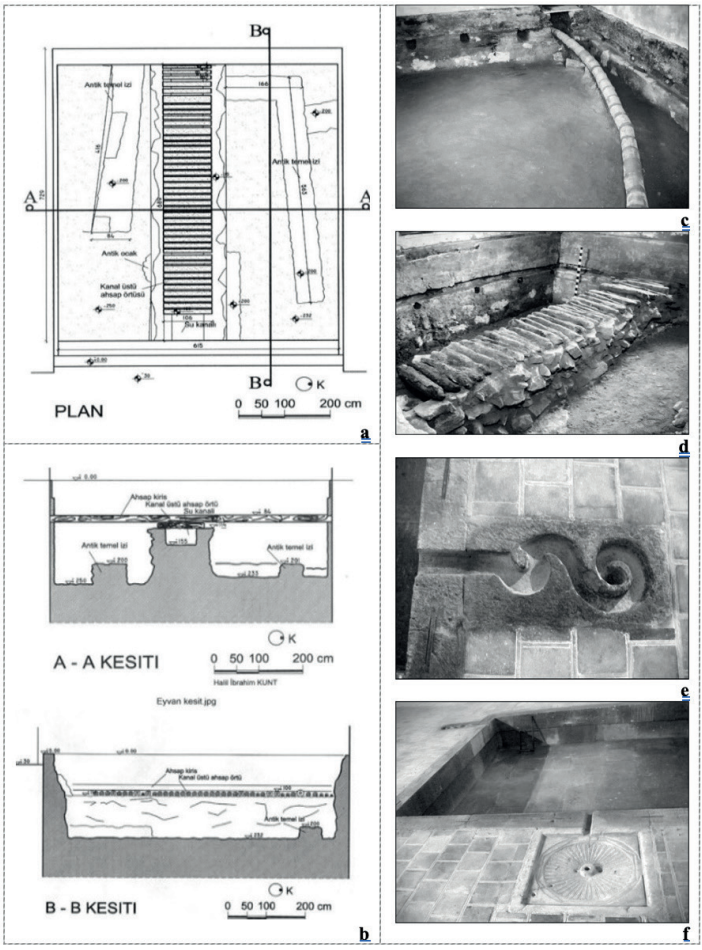
Yüzey, satıh veya kaynak suları açık hazne/havuzlar ile kurulan hacimlerde depolanmaktadır. Anadolu Selçuklu mimarisinde havuz geometrisinde belli bir denge aranmış 3-4-5 rakamları ile bunların katları veya çarpımları esas alınmıştır. Çoğunlukla, kenarlar arasında 1,618 oranı sağlanmıştır [32]. İnce Minareli Medrese'de kubbe ortasında bir opaion ve altında da bir impluvium (yağmur suyunu alan bir havuz) vardır [11]. Havuzun girişe paralel kenarı 3.93m, diğer kenarı ise 3.86m'dir. Derinliği 0.57m'dir. Girişe göre sağ ve

sol doğrultularında fazla suyu toplamak üzere 0.26m genişliğinde oluklar bulunmaktadır [29]. Havuzun ortasında fıskiye çanağı yer alır (Şekil 7).



Şekil 7- İnce Minareli Medrese havuzu, su oluğu ve havuz gider deliği

Fıskiyeli çeşme düzeneği yörede "büngüldek" olarak adlandırılmaktadır. Zemin kaplaması alt düzleminden künk borularla taşınan su, büngüldek üzerinden havuza akmakta; havuz seviyesi dolduktan sonra su havuzu çevreleyen, üstü açık bir kanal boyunca ilerleyerek, kaplama yüzeyine oyulmuş olan gider deliğinden tahliye edilmektedir [31]. 2001 yılında yapılan restorasyon çalışmaları sırasında havuza ait su iletim sistemi yapılan kazılar sonucunda bulunmuştur [8]. Zeminden kaynaklı rutubeti engellemek amacıyla eyvanda yapılan açmalar sonrasında eyvan zemin döşemesi altından geçen ve havuza su getiren yaklaşık 30cm genişliğinde bir suyolu açığa çıkarılmıştır. Havuz merkezli bir uygulama ile Sahip Ata Hanikah'ı açmalarında da karşılaşılmıştır. Muhdes kaplamanın kaldırılması sonucu döneme ait taş döşeme ve aydınlık fener izdüşümünde sekizgen havuz ortaya çıkarılmıştır [30]. Karatay Medresesi altyapısında da havuz merkezli donanım okunaklıdır. Burada da kubbe merkezinde 3.75m kenar uzunlukları, 0.68m derinliği olan kare planlı bir havuz bulunmaktadır. Havuzun güney kenarında kare biçimli mermer bir büngüldek yer almaktadır. Göbekteki fıskiyeden çıkan sular dar bir kanalla havuz haznesine toplanır. Havuzun batı kenarında ise ters "S" kıvrımlı biçime sahip bir diğer kanal aracılığıyla suyun tahliyesi sağlanmaktadır. Bu biçim arayışının medresenin akustiğini düzenlemek amacıyla olabileceği düşünülmektedir. Bu tahliye savacağında toplanan suyu tahliye eden pişmiş toprak su künkleri kapı eşiğinden çıkarak drenajdaki çıkış çörtenine bağlandığı kazı açmalarında ortaya çıkmıştır [33] (Şekil 8). Merkezdeki havuz, eyvandaki temiz su kanalı ve drenaja bağlanan tahliye kanalı bir bütün olarak değerlendirildiğinde bütünleşik altyapı kurgusu okunaklı hale dönüşmektedir.



Şekil 8- Karatay Medresesi havuzu ile bağlantılı donanım [33]
a-ana eyvan planı, b-kesitler, c- tahliye künkleri, d-kanal
e- havuzun kenarındaki 'S' kıvrımlı tahliye, f- büngüldek

4.2. Kanallar ve Galeriler

Yapı içinde donanım elemanları arasında, yerleşme ölçeğinde yapılar ve mahaller arası altyapı bağlantısı su akış ağı oluşturur. Kanallar ve galeriler, suyu toplamayı ve dağıtmayı sağlamaktadır. Böylece, su isalesi ve su kaptajı sağlanabilmektedir. Bağlantılı kanalların oluşturduğu işleyiş düzeni suyun tek bir noktada birikmesini engellemektedir. Su seviyesini kontrol ederek belli bir seviyeyi aşmasını engellemek yapı temel ve duvarlarına tesir edecek basınçlı su etkisini düşürür. Yüzey sularının kanallara toplanması suyun malzeme üzerinde kılcallıkla hareketini aza indirgemektedir. Galeriler

içine künk döşenebildiği gibi hat boyunca sızan suları toplamak için galeri künksüz de olabilmektedir [34]. Galeriler ise, suyun toplanmasının ve dağıtılmasının yanı sıra yapıyı çevreleyip, yapı oturum alanı dışına açılmasına bağlı olarak havalandırma yoluyla toprak içindeki nemli hava zonları tasfiye edilmesine, böylece altyapıda nem etkisinin kalkmasına katkıda bulunmaktadır [35]. Anadolu Selçuklu mimarisinde künk veya galeriler ile açık veya kapalı kanallar kurulmuştur. Su isale hattında yapıya pişmiş toprak künkler, halk arasında bilindiği adıyla pöhrenkler ile taşınan su tek bir noktadan veya birkaç yerden yapı içine bağlanmakta düşey künklerle duvar içinde yükselmekte, gerektiğinde tali kanallara ayrılmakta, sarnıç, kuyu, havuz gibi bir açık/kapalı bir depolama haznesine açılmaktadır. Selçuklu yapılarında, künklerin birbiriyle bağlantısını güçlendirmek amacıyla geçmeler yapılmış olmasının yanı sıra akış doğrultusunun değiştiği kırılma noktalarında artan basıncı karşılamak amacıyla (L), (T), (Y) şeklinde dökülmüş künklerin yanı sıra yekpare taştan parçalar da kullanılmıştır [36].

İnce Minareli Medrese 2001 yılı onarımında ana eyvanın zemininin açılması sırasında havuza bağlanan bir açık kanal bulunmuştur. Onarım sonrasında kanal ve kapak taşları korunarak sergilemeye açılmıştır. Kanal ile bağıntılı olarak ortaya çıkan künk bileşenleri ise müze taş eserler koleksiyonu içinde sergilemeye açılmıştır. Pişmiş topraktan (tuğla) silindirik formlu künklerin havuza su getiren ve tahliyesini sağlayan elemanlar olduğu anlaşılmaktadır. Dört ayrı parça halinde olup çapları 13-17 cm, uzunlukları 39-42 cm arasındadır. Uç kısımları birkaç cm daha inceltilerek birbirine geçmeli olarak uç uca birleştirilerek kullanılmıştır [26]. Kanallar aracılığıyla taşınan suyun depolama haznesi havuza tahliye edildiği işleyiş okunaklıdır (Şekil 9).

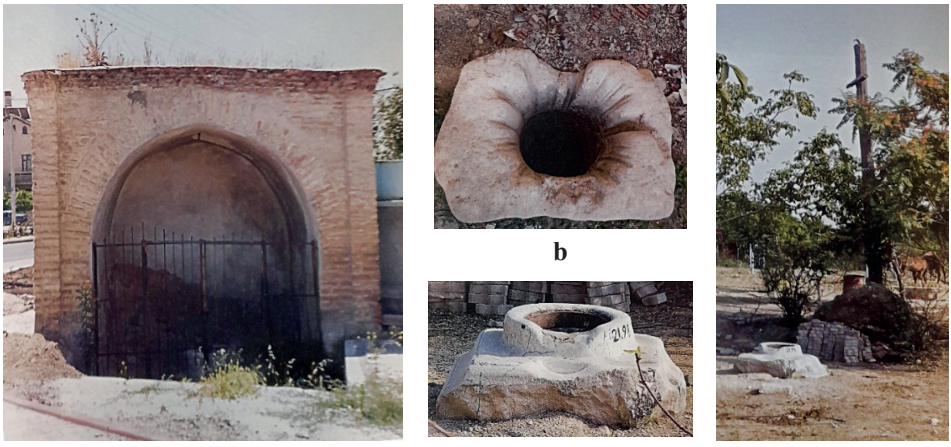


a **b** **c**

Şekil 9- İnce Minareli Medrese kanal ağı.
a-pişmiş toprak künkler [26], b,c-açık kanal [37]

4.3. Sarnıçlar

Sarnıçlar kapalı su depolama hazneleridir. Su isale hattı ile bağlantılı kanalların açıldığı sarnıçların yanı sıra yağmur suyunun toplandığı veya su kaynağının beslediği sarnıç örnekleri de mevcuttur. Yerleşmelerde drenaj sisteminden kanallarla toplanan suyun sarnıç veya çeşme haznesine boşaltılmıştır [38]. Sarnıcın isale hattından bağımsız çözülmesi şehir kuşatması esnasında kent sınırları içinde güvenli su kaynağı sağlamanın esaslı yollarından biri olmuştur. Anadolu Selçuklu mimarisinde kervan yollarında seyahat eden insan ve hayvanların su ihtiyaçlarının karşılanabilmesi içinde şehir dışına yapılmış sarnıçlar bulunmaktadır. Sarnıç ile benzerlik gösteren buzhaneler de bu amaca hizmet etmektedir. Soğuk hava deposu anlamı taşıyan buzhaneler, yazın sıcak zamanlarında kullanılmak üzere karın ve buzun depolandığı, toprak altında yapılmış ve iyi izole edilmiş yapıdır. Sarnıçların buzhanelerden farkı, sarnıçlarda dışarıdan toplanacak suyun hazneye ulaşması için duvarlarda delikler bulunmasıdır [39]. Selçuklu Dönemi'nde Konya ve çevresinde su kaynaklarının bulunduğu alanlarda, taş veya tuğla malzeme ile inşa edilmiş olan çok sayıda sarnıç bulunmaktadır. Konya-Beyşehir güzergahında inşa edilmiş Hoca Fakih Sarnıcı, Konya-Lâlebahçe yolu üzerinde yer alan Şerefeddin Sarnıcı gibi üstü toprak dam ile örtülen bağımsız depolar şeklinde kullanılabildikleri gibi başka bir işleve sahip yapının bodrumunda oluşturulan hazneler de bu amaçla kullanılabilmektedir [40] (Şekil 10). Sarnıçlar zemin kotu altında gömme oluşları ve zemin üzerinde depolama haznesi içermesi üzerinden çeşitlenmektedir.



a **b** **c** **d**

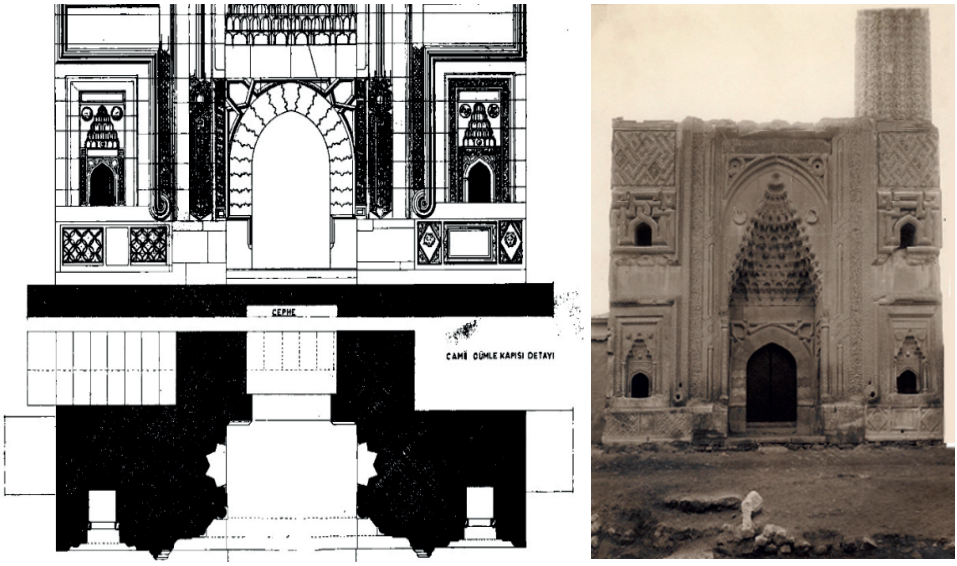
Şekil 10- Konya'da Selçuklu Dönemi'ne ait tam gömme ve toprak üstü sarnıç örnekleri [39]

İnce Minareli Medrese kompleksinde yapıyı destekleyen bir sarnıç mevcuttur. Bu birimin XIV-XV yüzyıllarında ilaveten inşa edilmiş olabileceği düşünülmektedir. Sarnıç yapının güneyinde yer almaktadır. Yapı temel duvarına bitişiktir ve toprak altında tam gömme sarnıç niteliğindedir. Yaklaşık 10.60x3.80m plan ölçüsündeki sarnıç sivri kemerli beşik tonoz ile örtülmüştür [41]. Yapının, zemin seviyesindeki donanım ağı haricinde temel düzeyinde kaptaj ve drenaj çözümü olarak sarnıç ile desteklenmiş olduğu görülür.

4.4. Çeşmeler/Sebiller

Çeşmeler bir kaynaktan beslenen veya su yoluna bağlanan, zemin seviyesi üzerinde yer alan su hazneleridir. Bileşenler açısından teknenin yerleştirileceği bir niş, suyun aktığı bir lüleden oluşur. Selçuklu mimarisinde yerleşme meydanında, yapı avlusunda bulunan çeşmelerin yanı sıra abidevi yapının giriş cephesi yüzeyinde çözümlenmiş duvar çeşmesi uygulamaları kimlik oluşturur. XIII. yüzyıl ortalarında Konya'da çok sayıda çeşme vakfetmiş olan Sâhip Ata'nın 1258 yılında yaptırmış olduğu mescit, hankah ve türbeden oluşan külliyesinin cümle kapısında yer alan çifte minarenin alt seviyesinde bu amaçla çözümlenmiş bir çift su alma hücresi vardır [42]. İnce Minareli Medrese'de de kapın iki yanında iki masif destek bulunur. Desteklerin alt kısmında da çeşme için açılmış olabileceği düşünülen birer niş ve pano yer alır [43].

Selçuklu yapıları dış cephe çeşmelerindeki ortak özellik, değişik kompozisyon ve kuruluşlarına karşın yüzeysel nişler halinde inşa edilmiş oluşlarıdır. Bu uygulamada, duvar içinden gelen su künkü, doğrudan akara bağlanmayıp, öncelikle bir hazneye açılmakta, suyun dinlendirilmesiyle suyun içindeki eriyik halde bulunan havanın basınç etkisi oluşturarak akışı kesmesi engellenmektedir. Bu amaçla, duvarda çeşme yapılacak yere, taştan oyma bir su haznesi yerleştirilmekteydi. Antik Dönem lahidleri de bazen bu amaçla kullanılmıştır. Hazne olarak kullanılan boşluklu büyük taşın, duvar örgüsünde yer alması ve üstüne mümkün olduğunca yük bindirilmemesi Selçuklu cephe mimarisi düzenini etkilemiştir [36]. Bu işleyiş cephenin statik düzeniyle birlikte kurgulanmış konstrüksiyon kuruluşunu yansıtmaktadır (Şekil 11).



a **b**

Şekil 11- Sahip Ata Camii duvar çeşmesi.
a-duvar çeşmesinin plan ve görünüşteki yeri [44],
b- tac kapı ve duvar çeşmesi [45]

4.5. Kuyular

XI. yüzyılda Selçuk Çağı'nın başlarında Anadolu'da "kudug" olarak olarak anılan su kuyuları hem evin hem mahallenin hem de bağ ve bahçenin en değerli hayat kaynağı idi. Su seviyesine erişene kadar kuyu kazıldıktan sonra kuyu duvarı örülüp, devamında örme yoluyla ya da delikli bir taş veya ağaç ile kuyu ağzı yapılırdı. Kuyudan su çekebilmek için kuyu çıkrığı bir diğer tanımla su dolabı olarak adlandırılan çark sistemi ile işleyiş tamamlanabilmekteydi. Kuyunun yanında dikilen, çıkrığın kollarının dayandığı seren/bastıran olarak adlandırılan kaldıraç sistemi kovanın düşeydeki hareketini yönetmeyi sağlamaktaydı [46]. İnce Minareli Medrese civarında kuyu mevcudiyetine dair veri kayıtlarda bulunmasa da seyyahların aktarımından bu dönemde Konya'da 2700 adet kuyu bulunduğu [2] ve ev, bahçe ve bostan su kuyularının oldukça derin olduğu [47] takip edilebilmektedir. Su temini için şebeke hatlarının kullanılmaya başlaması ardından birçoğu kapatılmış olan bu kuyuların işletilmesinin yapı su denetim sistemine ayrıcalıklı katkısı bulunmaktadır. Suyun kaptajı ile su seviyesinde alçalma meydana gelir. Bu

durum, kuyu içerisindeki basıncın düşmesine neden olur. Diğer taraftan, kuyuyu çevreleyen su taşıyan formasyon başlangıçtaki basıncını korur. Kuyu çukuru ve etrafında oluşan basınç farkı dolayısıyla su kuyu haznesi içerisinde depolanır [23]. Suyun ve mekanizma işleyişinin bilinciyle geliştirilmiş bu uygulama, gerek su tablasından bir kaynak olarak faydalanılması, gerekse donanımın drenaja katkısı açısından dikkat çekicidir.

5. Sonuç

Anadolu Selçuklular Dönemi Konya Kenti su yönetim altyapısı, coğrafi olanakların farkındalığıyla geliştirilmiş, yere has su yönetim stratejilerini, yerleşme ölçeğinde su temin ve su denetim kararlarını içermektedir. Kentin konumunun hidrolojik özellikleri göz önünde bulundurmak suretiyle seçilmiş olduğu görülür. Suyun isalesi, suyun iletilmesi ve suyun dağıtılması suyun hidrolik hareketinin bilinciyle şekillendirilmiştir. Coğrafi koşulların dağlar arasında bir ova ile tanımlanmasından ötürü, kent sınırlarının yanı sıra taşkınlar ve seller etkisiyle oluşabilecek yüzey suyu etkisi sur duvarını saran hendek ile sınırlandırılmıştır. Zeminin suya doygun olduğu alanlarda suyun kaptajını sağlayacak uygulamalar ile drenaj çözümleri üretilmiştir. Yapı oturum alanında su kaynaklarının bulunduğu, su tablasının yüzeye yakın olduğu koşullarda kuyu, kanal ve galerilerden oluşan düzenek sayesinde arazi yapılaşmaya açılabilmiştir. Su potansiyelinin bulunmadığı alanlarda isale hattından künkler ve galeriler ile taşınan sarnıç veya çeşme gibi bir depolama haznesine açılmaktadır. Yapıdan bağımsız olarak bir avlu veya meydanda, yol aksında yer alan çeşmeler haricinde abidevi yapıların giriş cephesinde duvar içine gömülerek çözümlenmiş olan çeşme uygulamaları döneme has kimliği tanımlar.

Konya İnce Minareli Medrese üzerinden görüldüğü üzere su yönetim altyapısı ekseninde Anadolu Selçuklu mimarisinde donanım kuruluşunda eşdeğer arayışlar ve farklılaşmaya neden olan etkenler ön plana çıkmaktadır. Kubbe ekseninde havuz merkezli işleyiş gerek bu yapıda gerekse Karatay, Sahip Ata ve Ali Gav Medreseleri'nde işlevsel ve aynı zamanda odak noktası oluşturarak imgesel açıdan karşılıklıklar yakalamaktadır. İşleyiş, tarihi yapılarda bir tasarım öğesi olarak suyun öneminin anlaşılması için söz alanı açmaktadır.

Kaynaklar

[1] Gordelevski, V., Anadolu Selçuklu Devleti. Ankara: Onur Yayınları, 1988.

[2] Konyalı, İ. H., Abideleri ve Kitabeleri ile Konya Tarihi. Ankara: Yeni Kitap Basımevi, 1964.

[3] Baykara, T., Türkiye Selçukluları Devrinde Konya. Ankara: Kültür ve Turizm Bakanlığı, 1985.

[4] Bildirici, M. ve Bildirici, Ö., "Konya ve Çevresinde Çağlar Boyu Tarihi Su Yapıları." Türkiye İnşaat Mühendisliği Teknik Kongresi'nde sunulan bildiri, İzmir, 23-25 Ekim 1997.

[5] Özerdem, F. ve Diken, A., "Konya Suyunun Dünü Bugünü." TMMOB I. Konya Kent Sempozyumu'nda sunulan bildiri, Konya, 26-27 Kasım 2011.

[6] Soyman, F. ve Tongur, İ., Konya Eski Eserler Kılavuzu. Konya: Konya Yeni Kitabevi, 1944.

[7] Cabrera, E., Water Engineering and Management Through Time – Learning from History. The Netherlands: CRC Press, 2010.

[8] Doğan, S., Konya Su Tarihi. Konya: KOSKİ, 2003.

[9] Karpuz, H., Anadolu Selçuklu Mimarisi. Konya: SÜYGV, 2001.

[10] Akok, M., "Konya İnce Minareli Medrese'nin Rölöve ve Mimarisi." Türk Arkeoloji Dergisi, 1972a.

[11] Kuban, D., Selçuklu Çağında Anadolu Sanatı. İstanbul: YKY, 2002.

[12] Aslanapa, O., Türk Sanatı. İstanbul: Remzi Kitabevi, 2011.

[13] Kuran, A., Anadolu Medreseleri. Ankara: ODTÜ Mimarlık Fakültesi, 1969.

[14] Eren, E., "Konya Selçuklu Mimari Yapıtlarında Kullanılan Taşların Korunmuşluk Durumları ve Koruma-Onarım Yöntemleri Üzerine Öneriler." Selçuklu Çağında Mimarlık Sempozyumu'nda sunulan bildiri, Konya, 15-17 Kasım 2007.

[15] Taşlıgil, N. ve Şahi̇n, G., "Yapı Malzemesi̇ Olarak Kullanılan Türkiye Doğal Taşlarının İkti̇sadi̇ Coğrafya Odağında Analizi̇." Marmara Coğrafya Dergisi, 2016.

[16] Tekin, M. A., "Konya Bölgesindeki Tarihi Yapılarda Kullanılan Kayaların Bozunma Özelliklerinin Araştırılması." Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, 2020.

[17] Forsyth, M., Structures & Construction in Historic Building Conservation.

Oxford: Blackwell Publishing, 2007.

[18] Siegesmund, S. ve Snethlage, R., Stone in Architecture Properties, Durability. London: Springer Science+Business Media, 2014.

[19] Prikryl, R. ve Smith, B., Building Stone Decay: From Diagnosis to Conservation. London: Geological Society Special Publication, 2007.

[20] Hoff, W. D. ve Hall, C., Water Transport in Brick, Stone and Concrete. Boca Raton: CRC Press, 2011.

[21] Clair, L. ve Seaward, M. R. D., Biodeterioration of Stone Surfaces- Lichens and Biofilms as Weathering Agents of Rocks and Cultural Heritage. Dordrecht: Springer Science+Business Media, 2004.

[22] Mandrioli, Pa., Caneva, G. ve Sabbioni, C., Cultural Heritage and Aerobiology. Bologna: SEPS Kluwer Publisher, 1998.

[23] Dinç, İ., "Su Kuyularının Abideleri Koruma Fonksiyonları." TAÇ Vakfı Yıllığı. İstanbul: TAÇ Vakfı, 1991.

[24] Atçeken, Z., Konya Şer'iyye Sicil Kayıtlarına Göre Konya'daki Selçuklu Yapılarının Osmanlı Devrinde Bakımı ve Kullanılması. Ankara: Türk Tarih Kurumu Basımevi, 1998.

[25] Akok, M., "Konya'da Restore Edilme Yoluyla Kurtarılması Düşünülen Üç Selçuklu Eseri. Sırçalı, Karatay ve İnce Minareli Medreselerin Restorasyon Projeleri." Türk Arkeoloji Dergisi, 1977.

[26] Erdemir, Y., İnce Minare Taş ve Ahşap Eserler Müzesi. Konya: T.C. Konya Valiliği İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, 2007.

[27] Ögel, S., Anadolu'nun Selçuklu Çehresi. İstanbul: Akbank Yayınları, 1994.

[28] Peker, A. U., "Ortaçağ Anadolu Mimarisinde Anlam." Arkeoloji ve Sanat, 1998.

[29] Ağıl, A., "Anadolu Selçuklu Kapalı Medreseleri ve Kubbe-Havuz İlişkisi." Y. Lisans Tezi, İTÜ 1992.

[30] Yavaş, A., "Anadolu Selçuklu Veziri Sahip Ata Fahreddin Ali'nin Mimari Eserleri." Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, 2007.

[31] Önge, Y., "Fıskıyeli Türk Çeşmeleri.» Vakıflar Dergisi, 1991.

[32] Önge, Y., "Tarihi Türk Su Mimarisinden Örnekler XIV. Yüzyıla Ait İki Eski Türk Havuzu." Arkitekt, 1964.

[33] Pekdemir, S. N., "Karatay Medresesi Eyvanı Kurtarma Kazısı." 16. Müze Çalışmaları ve Kurtarma Kazıları Sempozyumu'nda sunulan bildiri, Marmaris, 25-27 Nisan 2007.

[34] Çeçen, K., "Osmanlı Suyollarında Künkler, Debi Ölçme Tertibatı ve Su Terazileri." Osmanlı İmparatorluğu'nun Doruğu 16. Yüzyıl Teknolojisi. İstanbul: İSKİ, 1999.

[35] Kolbay, D. ve Arun, G., "Influence of Underground Water Controlling Systems on Durability of Ancient Masonry." Conference Importance of Place Proceedings, Sarajevo, 21-23 October 2015.

[36] Önge, Y., Türk Mimarisinde Selçuklu ve Osmanlı Dönemlerinde Su Yapıları. Ankara: Türk Tarih Kurumu Basımevi, 1997.

[37] Doğan, S., İslam Medeniyeti ve Konya Suları. Konya: NKM, 2004.

[38] Arun, G., "Master Builders' Design Skills Diagnosing the Failures," Structures and Architecture: Concept, Aplications and Challanges. London: CRC Press, 2012.

[39] Boran A. ve Mutlu M., "Meram İlçesinde Bulunan Sarnıçlar." Yeşilin ve Medeniyetin Köprüsü Meram. Konya: Meram Belediyesi, 2014, 310-344.

[40] Çobanoğlu, A. V., "Sarnıç/Selçuklu ve Osmanlı Devri." DIA, c.36. Ankara: TDV, 1993, 159-161.

[41] Özyurt, O., "Konya ve Çevresindeki Tarihi Su Sarnıçları." Y. Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, 1988.

[42] Eyice, S., "Çeşme." DIA, c.8. Ankara: TDV, 1993.

[43] Giovanni C., Türkiye Selçuklularından Osmanlılara Sanat. İstanbul: YKY, 2010.

[44] Akok, M., "Konya Sahib-ata Hanikah, Camiinin Rölöve ve Mimarisi." Türk Arkeoloji Dergisi, 1972b.

[45] SALT Araştırma, "Sahip Ata Camii'nin Taçkapısı." Erişim 01 Mayıs 2024. https://archives.saltresearch.org/handle/123456789/71383.

[46] Ögel, B., Türk Kültür Tarihine Giriş-III. Ankara: Kültür Bakanlığı Yayınları, 1991.

[47] Kahraman, S. A. ve Dağlı, Y., Evliya Çelebi Seyahatnamesi: Konya Kayseri Antakya Şam Urfa Maraş Sivas Gazze Sofya Edirne. İstanbul: YKY.

[48] DSİ Hidroloji Terimleri Sözlüğü, (Erişim tarihi: 04.09.2024)

https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/1352

[49] Erkal, M. "Arşın", IA, cilt 3, 411-413, 1988.

[50] Hasol, D. Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü. İstanbul: YEM, 1979.

[51] Güneş, H. Konya İnce Minareli Medrese ve Restorasyon Evreleri. Tarih Araştırmaları III içinde 311-340. Ankara: İksad, 2022.

[52] Eroğlu, Ü. & Halaç, H. İnce Minareli Medresedeki Nem Problemi ve Çözüm Önerileri. Vakıflar Dergisi, 57, 157-176, 2022.

[53] Konya'nın abidevi eseri İnce Minareli Medrese'sinin taç kapısı acil restore edilmeyi bekliyor (Erişim tarihi: 04.09.2024)

https://www.arkeolojisanat.com/shop/blog/konyanin-abidevi-eseri-ince-minareli-medresesinin-tac-kapisi-acil-restore-edilmeyi-bekliyor_3_1364451



TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI
UCTEA THE TURKISH CHAMBER OF CIVIL ENGINEERS
ODEYA ENDEZYARÊN AVAHIYÊ