
III. Gün

Yapısal Güçlendirme İle İlgili Analiz ve Yapım Teknikleri

1. Oturum

Oturum Başkanı: Prof. Dr. Ali İhsan ÜNAY - ODTÜ

Yapısal Analiz

Antalya’da Bulunan Tarihi Bir Yapının Restorasyon Çalışması ve Deprem Performansının Artırılması

***Ali KOÇAK ve **Şemsi TUGAY**

*Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fak., İstanbul
0212 259 70 70/2283, akocak@yildiz.edu.tr

**Tugay Mimarlık, 0242 241 75 77, Antalya, tugaymimarlik@gmail.com

*****Zihni KİLİT**

***Kilit İnşaat, 0242 243 24 43, Antalya, zkilit@kilit.com.tr

ÖZ

Bir yapının korunumu ancak işlevselliğinin artırımı sayesinde olmaktadır. Kapalı halde tutulan veya kullanılmayan tarihi bir yapı zamanla aşınacak, doğal ve diğer etkilere dolayı hasara uğrayarak kullanılmayacak hale gelecektir. Bu nedenle tarihi yapıların korunarak ve kullanılarak kültürel hayata kazandırılması, dönemi ni yansıtmayı ve geleceğe güvenle aktarılması açısından son derece önemlidir.

Tarihi yapıların korunumu ve restorasyonu yakın zamanda daha da önem kazanmıştır. Birçok tarihi yapı bu amaçla ele alınmaya başlanmış, restorasyonları için çalışmalar hız kazanmıştır. Kültürel mirasımızdan bir tanesi de Antalya’ da yer alan, 1910 yılında yapımı tamamlanmış, uzun yıllar okul olarak kullanılmış Gazi Mustafa Kemal İlköğretim Okulu’ dur. Yığma şeklinde olan okul binası bodrum, zemin ve 1 normal kattan ibarettir. Ancak yapının kat yüksekliği nedeni ile bodrum katı kullanılamamaktadır. Diğer iki katı sınıf, öğretmenler odası, laboratuvar ve wc olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, tarihi okul binasının onarımı ve restorasyon çalışmaları anlatılacaktır. Çalışmalarda binanın yapım yılı itibari ile kullanılan malzemeleri kullanılmış, tüm ayrıntılar dikkatle incelenmiştir. Yapı deprem ve diğer yükler için, mimari tarzına zarar verilmeden güçlendirilmiştir. Hasara uğrayan ya da aslında uygun olmayan tüm kısımları ve elemanları değiştirilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Tarihi yapı, Onarım-güçlendirme, Antalya, Rölöve, Restorasyon

GİRİŞ

Kültürel bir miras olan tarihi yapı ve anıtların korunmasından, restorasyonundan ya da tarihi yapı ve anıta yapılacak müdahaleden önce yapı hakkındaki

tüm bilgilerin belirlenmesi gerekmektedir. Yüzyıllardır çeşitli savaşlar, yangınlar, depremler ve doğal afetler gören bu yapıların yük taşıma mekanizmasını bilmek, yapıda kullanılan malzemelerin mukavemet ve karakteristiklerini anlamak ve bu anlamda tarihi yapıya müdahale etmek gerekmektedir. Yapısal koruma yada müdahalede yapıya sanatsal, tarihsel, mimari ve mühendislik açısından yaklaşmak yapının tarihsel anlamının bozulmasını önleyecektir.

Tarihi yapılar gerek tarihsel ve mimari yönden ve gerekse malzeme ve taşıyıcı sistemi açısından yakın dönemde çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmiştir. Ancak inceleme ve araştırmalar her tarihi bina için özel olarak yapılmış, yöntemler ve sonuçlar her araştırmada farklılıklar göstermiştir.

Bu araştırmaların birçoğu tarihi yapıların malzeme yönünden, dolgu duvarların veya yapının modellenmesi yönünden incelenmesi şeklindedir. Bu çalışmalardan Ahunbay ve Diğ.' 1997, Erdik, Yüzügüllü ve Karakoç' 1990, Çakmak, Mark ve Erdik' 1992, Durukal' 1992, Erdik ve Durukal' 1993' ün çalışmalarında Ayasofya Camii' nde kullanılan malzemelerin karakteristik dayanımları, harcın özellikleri ve çevresel titreşimler belirlenmiştir. Rölevesi alınan ve çatlakları belirlenen yapının sonlu elemanlarla modeli oluşturularak lineer ve non-lineer analizleri yapılmıştır. Bozinovski ve Velkov' 1983' de iki tarihi taş bina olan Ohrid-Makedonya' daki St. Sofia kilisesi ve Dubrovnik' te bulunan Sponza Palas üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalar laboratuvar ortamında ve yerinde yapılan malzeme deneyleri ile yapı modeli üzerinde yapılan çalışmaları kapsamaktadır.

Pichard'1976, Gavrilovic 1993'de, 8 Temmuz 1975 yılındaki depremde hasar gören Pagan Platosu, Burma merkezinde yer alan tapınak ve Çin-Pagoda' ların tamir ve onarımlarını, 1979 yılındaki Montenegro Depremi ile hasar görmüş Budva Kasabası tarihi anıtların tamirâtı ile Üsküp Nerezi'de bulunan St. Pantelemon manastırı ve 1963'te hasar gören Üsküp Kurşunlu Han'ın güçlendirme ve onarımlarını anlatmıştır. Di Pasquale' 1979' de kargir duvarların karakteristikleri ve malzeme davranışı ifade edilerek Santa Maria Del Fiore Katedrali'nin kubbesi incelenmiştir. Kubbe sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş ve sonuçlar irdelenmiştir. Lourenço, Borst, Rots' 1997, Lourenço, Rots' 1997, Lourenço' 2002' de yığma binalarda kullanılan duvarların denysel ve kuramsal çalışmalarını yapmışlardır. Kuramsal çalışmalarda duvarlar sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş ve doğrusal olmayan analizleri yapılmıştır.

Bu çalışmada yığma şeklinde yapılan ve ilköğretim okulu olarak kullanılan yapı ele alınmış, yapıya ait karakteristik değerler belirlenerek yapı, yönetmeliklere uygun şekilde güçlendirilmiştir. Diğer yandan yapı ve yapı elemanları aslına uygun olarak düzenlenmiştir.

YAPININ TARİHÇESİ

Antalya Merkez Elmalı Mahallesi' nde bulunan yapı, Antalya Kent Kronolojisi (H. Çimrin ATSO yayınları) eserine göre 1906 yılında "NEFİSE MEKTEBİ" adıyla açıl-

diğı ifade edilen okul, Kentin büyük bir kesimine eğitim ocağı olmuştur. Diğer bir görüşe göre okulun Mimar Kemalettin Bey tarafından 1905 yılında bitirildiğı ifade edilmektedir. Bina 1926 yılında “ GAZİ MUSTAFA KEMAL İLKOKULU ” adını alarak 2005 yılı sonuna kadar eğitim kurumu olarak hizmet vermeye devam etmiştir.

1919 İtalyan İşgali sırasında okul öğrenime ara vermiş ve İtalyanlar tarafından Karargâh ve cephanelik olarak kullanılmıştır.

Yapının doğu girişinde yer alan 68*123 cm ölçüsündeki limra tabletin sıva ve boyalardan temizlenmesi ile ortaya çıkarılan yazıt, Antalya Müzesi Uzmanlarınca incelendiğinde ise “1331 (R) tarihi ve İTTİHAT VE TERAKKİ MEKTEBİ” yazısı okunmuştur. Farklı tarih anlatımından yola çıkarak anlamı belirlenmeye çalışılan yazıtın yapılış sırasında konulup konulmadığı belirlenememiştir.

Diğer bir görüşe göre yapının; Sabur Paşa tarafından “amele taburları kullanılarak yaptırıldığı” ifade edilmiş, ayrıca Antalya’ da o dönemlerde Nefise (Sanat) okulunun olmadığı belirtilmiştir.

BİNANIN YAPISAL ÖZELLİKLERİ

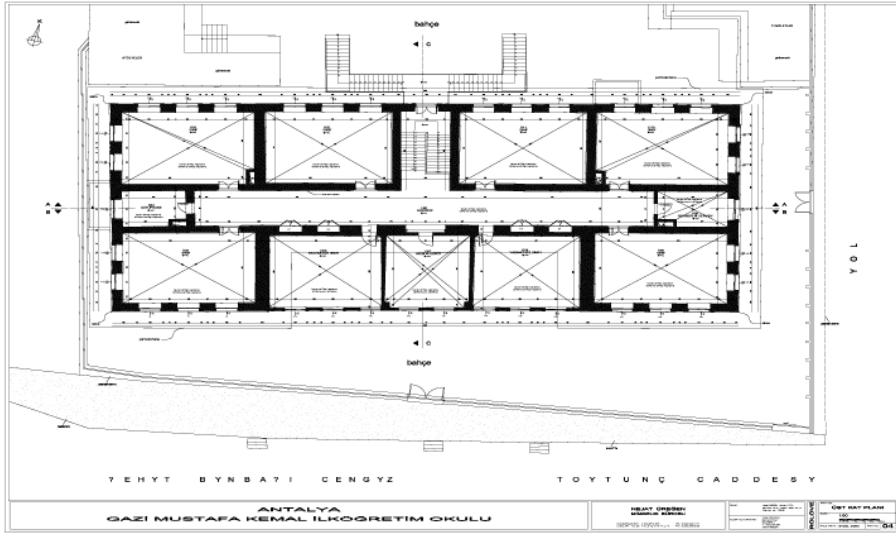
Yapılış amacı okul olan yapı U plana sahip olup, orta aksta yalnız üst kata çıkan bir merdiven ile doğu ve batıda bodruma inen kot farkından dolayı zemin ve ara kata çıkan bir merdiveni bulunmaktadır. U planın içi avlu şeklinde olup 7 adet blok limra taş basamakla zemin kata çıkılmakta ve ana girişte yine limra söve kapı bulunmaktadır.

Tamamen kayalık alandaki kapının hatılsız temel duvarları 85 cm kalınlıktadır. Tüm duvarlar yöresel falez taşları ile kaba yonu şeklinde yapılmış olup, bağlayıcı olarak kireç, kum ve samandan oluşan bir harç kullanılmıştır. Bina iç ve dış sıvaları da duvarlarda kullanılan harç ile sıvanmakla birlikte, üzerine daha sonra yapılan çimento esaslı sıvadan dolayı orijinal sıvayı deforme etmiştir.

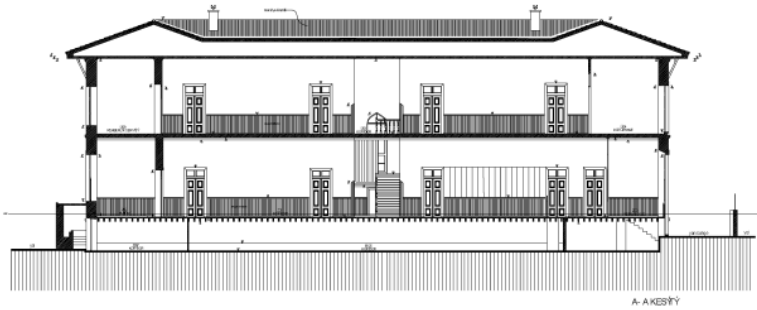
Döşeme seviyesinde tüm duvarlar ahşap hatıllarla çevrelenmiş ve eksiz (yaklaşık 650 cm boyunda 14x22 cm ölçüsünde 35–40 cm aralıklı sedir kerestesinden nervürler, ahşap hatıllara oturtulup döşeme kaplaması yapıldığı belirlenmiştir. Ayrıca kapı üst kotunda (305 cm) da ahşap hatıllar duvarları çevrelemektedir. Böylece yapı beden duvarları döşeme ve kapı üstlerinde bir hatıl gibi kenetlenmesi sağlanmıştır. Tümü sedir olan ahşap imalatların montajında sıcak dövme demir çivilerle birleştirildiğı belirlenmiştir.

Yapının çatısı da sedir kerestesinden 610 cm açıklığı geçen asma çatı sistemi ile yapılmıştır. İmalatta 12x18, 18x22 ve 12x15 cm ölçülerinde kereste kullanılmış olup, makas aralıkları da 160- 170 cm civarındadır. Makaslar arasında 5x9 cm ölçüsünde mertekler ve üzerinde 2.5x10cm kiremit altı kaplaması bulunmaktadır. Kiremit altı kaplama tahtaları dışındaki tüm ahşaplar sağlam ve kullanılacak durumdadır.

Binanın alınan rölövesi ve kesiti Şekil 1 ve 2’de verilmiştir.



Şekil 1. Binaya Ait Rölöve Projesi



Şekil 2. Yapının mevcut durumuna ait kesiti

YAPININ GEÇİRDİĞİ ONARIM EVRELERİ

100 yıldır eğitim kurumu olarak hizmet veren yapının eskiye ait tek fotoğrafı bulunamamıştır. Yerli halktan da çok az bilgi edinilmiştir. 1989 yılında bitişikteki ahşap evin yanması sonucu okulda da yangın başlamış, kuzey batı köşedeki odanın zemin ve birinci kat döşemelerinin tamamen yandığı, koridorun bir kısmı ile aynı odanın tavan kaplamaları ve doğramalarının da yandığı belirlenmiştir. 1989 yangını sonrasında ahşap kirişlemeler takviye edilerek döşeme kaplamaları da yenilenmiştir. Anılan yangın ve daha sonra yapılan inşaat işleri yapının orijinaline vermiş olduğu zararları şu şekilde sıralayabiliriz:

1. Yapının küfeki taşından yapılmış tüm söveleri dahil olmak üzere, kireç saman ve kumdan oluşan sıvası üzerine önce ince sıva sonra grenli boya yapıldığı,

2. Neredeyse tüm söveler ve doğramaların klima cihazı takılmak bahanesi ile delindiği veya kırıldığı,
3. Blok Limra taşından kesilmiş geçme tarzında yapılan merdivenlerin önce yüzeyleri çentilerek dökme mozaik daha sonra da ahşap kaplandı,
4. Tüm ahşap imalatla olduğu gibi Sedir’de yapılan döşeme kaplamalarının üzerine ızgaralı çam taban tahtası yapıldığı,
5. Doğu, batı ve güney cephedeki balkonların tamamen yıkıldığı, kuzey balkonu da yıkılıp yerine betonarme merdiven yapıldığı,
6. Kuzey, doğu ve batı bahçelerinin 60–80 cm doldurulduğu tüm bahçenin büyük kısmı asfalt ve karo kaplandı, bu işlem sonucu traverten zemin kaplamaları ile 20x30 cm ölçüsündeki yağmur suyu toplama kanallarının kuzey cephe dışında yok olduğu,
7. Yapılan tahribatın en korkuncu da U planının içinin zemin katı boş üstü 1 katlı betonarme bir eklenti inşa edilerek dikdörtgen bir yapıya dönüşmüştür. Bu İnşaatın yapımında uygulanan teknikle (?) ana yapı beden duvarları bölüm bölüm oyularak betonarme yapı ile ana yapı birbirlerine kaynaştırılmıştır. Aynı ek yapının orta iç kolonları da pencereler önüne özensiz olarak yerleştirilmiştir. Betonarme yapının inşası sırasında giriş saçağı/balkonun da yıkıldığı belirlenmiştir.
8. Betonarme yapı her ne kadar kolonlar üzerine oturuyorsa da, üst katta karma sistem uygulanarak U planının içinde kalan tüm pencereler ve balkon kapısı taşıyıcı tuğla duvarlar içinde kaldığı belirlenmiştir.
9. Çatı tamamen orijinal halini korumakta olduğu, tahribatın olmadığı ancak kiremit altı tahtalarının büyük kısmının çürüdüğü belirlenmiştir. Çatı örtüsü Marsilya kiremit ve markalarından yeni olduğu belirlenmekle birlikte orijinalinin ne olduğu belirlenmedi.
10. Yapıda hava sirkülasyonu sağlamaya yönelik 145 cm yüksekliğindeki bodrumda (subasman) yer alan 33 adet pencerenin tümünün söveleri kırılarak bir kısmı tuğla ile kapatılıp sıvandığı bir kısmının da kutu profillerle panjur yapıldığı görülmekteydi.
11. Yapıldığı dönemdeki arsa sınırları güney cepheden yol geçirilerek küçültüldüğü, orijinal bahçe duvarlarının 8,5 metrelik bölümü dışında tümü ile yıkılarak briket ile bahçe duvarı yapıldığı, kalan duvarında takviye amaçlı parça parça beton harçla doldurulduğu belirlenmiştir. Bahçe duvarında dövme demir korkuluklar kullanılmış, ancak günümüze kadar ancak 8–9 m uzunluğunda bir parçası kalmıştır. Güney kapı yol yapımı sırasında yıkılarak geri çekildiği kapsı demirinin yok olduğu Doğu kapısı yanlarındaki kolonların yıkıldığı ancak kapının korunduğu belirlenmiştir (Şekil 3-6).



Şekil 3. Binanın Bodrum Katı



Şekil 4. Binanın Zemin Katı



Şekil 5. Binanın Bodrum Katı



Şekil 6. Binanın Cephe Penceresi

YAPININ RESTORASYONU VE GÜÇLENDİRİLMESİ

Antalya Büyükşehir Belediyesi 1. Kentsel Dönüşüm Projesi Cumhuriyet Meydanı düzenlemesi kapsamında Valilik Binasının yıkılması Gazi Mustafa Kemal İlkokulu'nun restore edilerek "Hükümet Konağı" olarak hizmet vermesi kararlaştırılmıştır. Bu kapsamda Mimarlar Odası Antalya Şubesi tarafından yapının röleve projeleri hazırlanmıştır. Yapının statik güçlendirmesinin ayrıntılarından bu noktada bahsetmeden kısaca temellerin betonarme perde ile takviyesi sonucuna varılınca, perde duvarlarının 150 cm daha derinde yapılması ile bir bodrum kat yaratılması kararlaştırılmıştır.

Bodrum katın oluşturulması için önce odanın bir duvarı hizasından bodrum yüksekliği temel kalınlığı dahil 350 cm ye kadar kazılmış, kazılan duvarın temeli atılmış kayalık zemine demir ankrajlarla takviye edilerek betonarme perde duvarı dökülmüştür. Daha sonra aynı odanın teker teker perde duvarları tamamlanarak ortada kalan kazı kaldırılmıştır. Birinci oda tamamlandıktan sonra diğer yan odaya geçilerek tüm yapının altında 320 cm yükseklikte bir bodrum kat kazanıl-

mıştır. Zemin yapısı son derece sert kaya olması nedeniyle anılan işlemler 8 ay gibi uzun bir süre almıştır (Şekil 7-10).



Şekil 7. Binanın Bodrum Katının Kazılarak Yükseltilmesi



Şekil 8. Bodrum Kat Duvarlarının Güçlendirilmesi



Şekil 9. Bodrum Kat Duvarlarının Güçlendirilmesi



Şekil 10. Bodrum Kat İlave Betonarme Perde Duvarları

Antalya Valiliği'nden alınan ihtiyaç programı doğrultusunda yapı için kullanım avan projesi hazırlanmış, ancak mevcut yapının eklenen bodrum kata rağmen Valilik birimlerin ihtiyacına yeterli olamadığı belirlenmiş ve bir arayışa girilmiştir, sonucunda 25 parselde yapı ile (ana yapı 24 parseldedir) yarışmayacak ek bir yapı zorunluluğu dikkate alınarak bir avan proje hazırlanmıştır. 25 parselde yapılmasını önerdiğimiz ek yapının bir yandan ana yapı ile bağlantı zorunluluğu, diğer yandan ana yapı ile yarışmaması gerekliliği diğer yandan da ana yapı ile bütünleşme kriterleri dikkate alınarak;

- * Yeni yapı bahçe kotunun altında tasarlanarak ana yapıya bitişmesi-birleşmesi önlenmiş,
- * Yeni yapı, ana yapının subasman kotunun altında planlanarak birbirleri ile yarışmaması sağlanmış,
- * Halk girişi yeni yapı bünyesinde çözülerek bağımsız yapılaşma oluşturulmuş,
- * Yeni yapıda eski yapının hiçbir yapısal özelliği taklit edilmemekle iki yapının yarışması olanağı verilmemiştir.

- * Yeni yapının terası da yeşillendirilerek dikkati çekmeyecek bir hale getirmeye çaba harcanmıştır.

Bu kriterler doğrultusunda hazırlanan proje Antalya Koruma Kurulu Bölge Müdürlüğüne sunularak onay alınmıştır.

Öncelikle yapıda kullanılan malzeme cinslerinin belirlenmesi ile işe başlandı. Özetle ana kalemleri saymak gerekirse; merdivenlerde her bir kolda 3'er adet NPI 240 çelik limon kirişlerine (Alman malı 1860 yapım yılı, mühürlü ancak tamamen korozyona uğramış) oturan limra blok geçme basamaklar vardır. Döşemelerin sonradan yapılan taban tahtaları söküldüğünde 2.5x13 cm ölçüsünde sedir kaplamadır. Tavanlar tek istikamette tezyinli altta 20 cm üstte basan kenarları kordonlu ahşaplar 13 cm olmak üzere duvar dibi pervazlar ile sonlanmıştır. Tüm yüzeyler sıvalıdır.

Yapının değiştirilmesi gerekli tüm yapı elemanlarının taş sövelerden, taş profillerle ahşap tavan ve döşeme kaplamalarından doğramalara, kapılar hatta kapılardaki çitalara kadar tümünün şablonları çıkarılarak uygulama detayları hazırlanmıştır. Araştırma kazısı sonucu gerçek arazi kotu belirlenerek doğu, batı ve kuzey cephelerdeki arazi 60–70 cm indirilmiştir. Bu kazı sırasında da doğu merdiven önündeki traverten döşeme kaplamasının 120x350 cm'lik kısmı ile kuzey cephedeki yağmur suyu kanalları ortaya çıkarılarak sergilenmesi sağlandı.

Çatının çürüyen kiremit altı kaplamalarının sökülmesinden çivi ve ahşabın kaynaşması sonucu taşıyıcı ahşaba zarar vermemek için mevcut ahşaplar sökülmeden üzerine yeniden kiremit altı kaplaması çakılarak kiremitler döşenmiştir (Şekil 11).

İmalatlar sırasında sonradan yapılan çimentolu sıvaların sökülüp orijinal sıva ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Ancak eski onarımlarda (?) orijinal sıva çentilerek sıvandığı için tüm sıvaların yenilenmesi zorunluluğu ortaya çıkmıştır (Şekil 12-14).



Şekil 11. Çatının Düzenlenmesi



Şekil 12. Cephe Sıvalarının Sökülmesi



Şekil 13. Sıvaların Sökülmesi



Şekil 14. Sıvaların Sökülmesi

Tüm taş söveler ve profillerin sonradan sıvalardan temizlenmiş, delinen kırılan parçalar çürütme yöntemi ile onarılmış, noksan parçalar aslına göre tamamlanmıştır (Şekil 15-18).



Şekil 15. Sövelerin Temizlenmesi



Şekil 16. Sıvaların Sökülerek Sövelerin Ortaya Çıkartılması



Şekil 17. Cephe Sövelerinin ve Bodrum Kat Penceresinin Açılmadan Önceki Hali



Şekil 18. Cephe Sövelerinin ve Bodrum Kat Penceresinin Açıldıktan Sonraki Hali

Merdiven NPI 240 limon kirişleri tümü ile korozyona uğradığından ve basamakları dökme mozaik yapmak için çentildiği ve çoğu kırıldığından tümü ile asıl ölçüsüne ve malzemesine sadık kalarak yenilenmiştir. Korkuluklar da kırık ve çürümüş olduğundan orijinaline uygun profiller ve merdiven basamakları yenilenmiştir. Pencere doğramalarına sonradan takılan (zemin kat) demir kepenkler tümü ile sökülmüştür. Gerek klima için açılan delikler gerekse bakımsızlıktan oluşan çürümeler nedeni ile tüm pencereler orijinal detayına uygun olarak yenilenmiştir.

+ 4.90 (Birinci kat) kotundaki sonradan yapılan döşeme kaplaması söküldüğünde taşıyıcı sedir ahşap nervür kirişlerinin çok iyi durumda olduğundan temizlenerek ahşap koruyucu boya ile boyanmıştır. Giriş katındaki (+0.29) bulunan ve sonradan yapılan döşeme kaplamaları da sökülmüş, yangın geçiren kuzey batı oda ve koridor taşıyıcı sedir ahşap nervür kirişlerinin yangından büyük ölçüde zarar gördüğü, özensiz takviye yapıldığı, bir kısmının da çürüdüğü belirlendi. Bu kat döşemelerinde kullanılan ahşap nervür kirişlerinin aynı ölçüde çelik kirişlerle değiştirilmesi statik yönünden de uygun bulunmuştur (Şekil 19-22).



Şekil 19.Hasarlı Döşemelerin Kaldırılması



Şekil 20.Hasarlı Döşemelerin Çelik Profillerle Değiştirilmesi



Şekil 21.Ahşap Döşemelerin Temizlenmesi



Şekil 22.Hasarlı Döşemelerin Çelik Profillerle Değiştirilmesi

Döşemelere konulan hasır çeliklerin arasına donatı yerleştirilmiş, yerleştirilen donatıların üzerine 10-12 cm kalınlığında beton dökülmüştür (Şekil 23). Diğer yandan yapının üst katlarının deprem dayanımının artırılması amacıyla, yapının her iki doğrultusunda hesaplar sonucunda belirlenen bazı duvarlar güçlendirilmiştir (Şekil 24).



Şekil 23. Döşemeye Donatı Yerleştirme



Şekil 24. Üst Kat Duvarlarının Güçlendirilmesi

Tüm tavan kaplamaları defalarca boyandığı için ahşap özelliğini kaybettiği, yer yer kırıklar olduğu için aynı ölçüde ve formda ahşaplarla değiştirilmiştir. Röleve ve restorasyon projelerinde tavanlar boyalı görülmesine rağmen, kimyasal analiz sonucu; boyanın ilk katında ahşap cilası olduğu belirlendiğinden tüm tavanlar ahşap koruyucu kullanılarak korunmasına karar verilmiştir. Yapının girişinde bulunan limra söve ve diğer küfeki söveler, profiller ve duvar kaplamalarındaki sıvalar sökülmüş, sıva altındaki grenli boyalar taraklanarak temizlenmiştir. Kırılan, tamamen yok edilen (tüm bodrum ve balkonlar) söveler çürütme yöntemi ile tamir edilmiş veya yeniden yapılmıştır.

Hazırlanan imar planı değişikliği ile önde kalan 5 m bahçe aslına uygun hale getirilemeye de 13 m ye çıkarılmıştır. Örnek duvardan yola çıkarak yeniden bahçe duvarları asıl şekli ve malzemesine (küfeki) uygun olarak yeniden inşa edilmiştir. Elde kalan 9 m bahçe demiri boyanarak kullanılmış olup, geri kalan kısmı ise el yapımı sıcak dövme demir ile aslına uygun olarak yapılmıştır.

Yapının üst katında (+4.90) U planın boşluğuna bakan, betonarme ve binaya bitişik olarak yapılan kısımda kapı ve pencerelerin bulunması gerektiği düşünülerek bir kısım tuğla duvarlar yıkılarak balkona çıkan taş kapı ve sövesi ile diğer 4 adet pencere ortaya çıkarılmıştır (Şekil 16). Ancak, betonarme yapının kirişinin söveyi kapatması nedeni ile sövenin kemer kısmı 30 cm daha aşağıda oluşturulmuştur. Diğer pencerelerin de dış yüzeylerindeki tuğla duvar statik yönden kaldıramadığı için niş şeklinde korunmuştur.

SONUÇ

Bu çalışmada Antalya' da bulunan tarihi bir okul binasının güçlendirilerek restorasyonu anlatılmaya çalışılmıştır. Yapının tarihini yansıtmayı ve geleceğe güvenle aktarılması bakımından yapının her noktası ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Restorasyon çalışmaları sırasında bütün mesleki disiplinler bir arada çalışmış, yapıya önceden verilen zararlar da ortadan kaldırılmıştır.

Tarihi yapıların yaşatılması bakımından her yapılan çalışmanın diğer meslektaşlara aktarılması, tartışma ortamı yaratılması şüphesiz tarihimizi daha ileriye götürecektir. Çünkü her yapı kendisine özel detaylar içermekte, gerek mimari yönden ve gerekse mühendislik yönünden çeşitli özellikler göstermektedir. Dolayısıyla çalışılan her yapı, yapılarda karşılaşılan her türlü sorun bu konuda çalışma yapan meslektaşlarımıza biraz daha ışık tutacaktır.

KAYNAKLAR

Ahunbay, M. Z. and et al., (1997), "Non-Destructive Testing and Monitoring in Hagia Sophia", International Conference on Studies in Ancient Structures", Yildiz Technical University, Faculty of Architecture, Yildiz, Istanbul, Turkey, pp.197-207.

Bozinovski, Z., Velkov, M. (1993), "Concept of Experimental Determination of Bearing and Deformability Capacity of Structural Walls of Historic Monuments", 2. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 10-13 Mart 1993, İstanbul, s. 222-232

Çakmak, A.S., Mark, R., Erdik, M., (1992), "Structural Evaluation of the Hagia Sophia in İstanbul", Princeton University and Boğaziçi University, İstanbul

Çimrin, H., (2005), "Kuruluşundan Günümüze Antalya Kent Kronoojisi" (2005), ATSO Yayınları

Di Pasquale, S., (1988), "Finite Element Analysis of Masonry Domes", Proceedings of IASS-MSÜ Int. Symposium, İstanbul, pp. 327-336

Durukal, E., (1992), "A Study on Structural Identification and Seismic Vulnerability Assesment of Ayasofya", M.S. Thesis, Boğaziçi University, İstanbul

Erdik, M., Yüzügüllü, Ö., Karakoç, C., (1990), "İstanbul Aya Sofya Müzesi Yapısal Sisteminin Belirlenmesi ve Deprem Güvenilirliğinin Sağlanmasına Yönelik Tedbirlerin Tespiti - Birinci Aşama Raporu", Deprem Mühendisliği Bölümü, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul

Erdik, M., Durukal, E. (1993), "Ayasofya'nın Deprem Davranışı", 2. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 10-13 Mart 1993, İstanbul, s.198-207

Gavrilovic, P., (1993), "Methodology, Methods and Techniques for Repair and Strengthening of Historical Monuments", 2. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 10-13 Mart 1993, İstanbul, s. 208-216

Karaveziroğlu, M., Barboutis, C., Kranas, V. (1997), "Behaviour of Masonry with Full Bricks and Lime Mortars", International Conference on Studies in Ancient Structures", YTÜ Faculty of Architecture, Yıldız, İstanbul, pp.225-233

Lourenço, P.B., de Borst, R., Rots, J.G., (1997), "A Plane Stress Softening Plasticity Model for Orthotropic Materials", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 40, No. 21, pp.4011-4032

Lourenço, P.B., Rots, J.G., (1997), "Multisurface Interface Model for Analysis of Masonry Structures", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 123, No. 7, pp. 660-668

Lourenço, P. B., (2002) "Computations on Historic Masonry Structures", University of Minho, Portugal, Prog. Structurel Engineering Materials, 301-319
Penelis, G., Karaveziroğlu, M., Styliandis, K., Leontaridis, D., (1992), "The Rotunda of Thessaloniki: Seismic Behavior of Roman and Byzantine Structures in Hagia Sophia from Age of Justinian to the Present", ed.by R.Mark and A.Çakmak, Cambridge University Press

Pichard, P., (1975-76), "The Restoration of Pagan-Burma", Unesco Report RP/1975/76/3.411.6/

Sheppard, P.F., Tercely, S., (1985), "Determination of the Seismic Resistance of an Historical Brick-Masonry Building by Laboratory Tests of Cut-Out Wall Elements", Proc. 7th. International Brick Masonry Conference, Melbourne, Australia, 17-20 February

Tezcan, S.S., (1996), "Probability Analysis of Earthquake Magnitudes.", Türkiye Deprem Vakfı Yayınları, İstanbul

UNIDO, (1984), "Design and Construction of Stone and Brick Masonry Buildings" Building Construction Under Seismic Conditions in the Balkan Region, v.3, Unido, Vienna

Artvin-Borçka Köprüsü'nn Tarihi ve Yapısal Değerlendirmesi

Hilal Tuğba rmecioğlu, Aslı Er Akan

Araştırma Görevlisi, ODTÜ Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü,06531, Ankara, tlf: 0 312 2102203 fax: 0 312 2107966, email: hilaltugba@arch.metu.edu.tr

Araştırma Görevlisi, ODTÜ Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü,06531, Ankara, tlf: 0 312 2102203 fax: 0 312 2107966, email: erasli@arch.metu.edu.tr

z

Geçen yüzyılın ilk yarısında Cumhuriyet'in hızlı bayındırlaşma hamlesi çerçevesinde geleneksel yığma yapım teknolojisinden uzaklaşan ancak bugün bildiğimiz anlamda modern malzeme teknolojisine de sahip olmayan çok sayıda erken-modern mühendislik yapısı inşa edilmişti. Bunlardan özellikle köprüler demiryolu ve karayolu sistemlerinin kurulması aşamasındaki bu süreçte özel bir öneme sahipti. Bu çalışmada, nadir demir karayolu köprüsü örneklerinden Artvin'deki Borçka Köprüsü'nn tarihsel önemi, yapısal sistemi ve malzeme özellikleri incelenmiş; yapının kendi yükleri ve doğal koşullar altındaki davranışı SAP2000 bilgisayar programı ile yapılan analizlerle değerlendirilmiştir. Bu analiz, çeşitli geometrik şekillere sahip yapı elemanlarının bütün kesit ve malzeme özelliklerinin kolaylıkla tanımlanabileceği bir analiz yöntemi olan, sonlu elemanlar metoduyla yapılmıştır. Bu çalışmanın sonuçlarının, Borçka Köprüsü rnekleğinde, benzer durumdaki erken Cumhuriyet dönemi köprülerinde mevcut doğal koşullara ilaveten zamanla değişen kullanımlar nedeniyle ortaya çıkan aşırı yüklenmelerine/ karşısındaki durumlarına dikkat çekmesi açısından faydalı olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Borçka Köprüsü, sonlu elemanlar yöntemi, tarihi demir köprüler.

1. Giriş

Cumhuriyet'in ilk yıllarında ulaşım ağlarının kurulması hayati bir önem taşıymaktaydı. "Muasır medeniyet"in ülkenin ücra köşelerine kadar yayılması, "bayındır ülke" idealinin gerçekleştirilebilmesi ve yeni rejimin sağlamlaştırılması buna bağlı görülmekteydi. Bu nedenle ağların kurulmasında kritik noktalar olan köprüler ve tüneller özel bir önem taşıyordu.

Bu çalışmada, bu köprülerden biri olan tarihi Borçka Köprüsü taşıyıcı sistemi incelenmiş (şekil 1) ve bilgisayar ile l yükler ve hareketli yükler altındaki

davranışının analizi yapılmıştır. Borçka Köprüsü'nün sonlu elemanlar analizinin sonuçlarının yorumlanması için deplasman, kesme kuvveti ve eksenel kuvvetleri gösteren grafiklerden yararlanılmıştır. Bu çalışmanın sonuçlarının Borçka Köprüsü'nün mevcut durumunun belirlenmesinde faydalı olacağı düşünülmektedir.



Şekil 1 Tarihi Borçka Köprüsü.

2. Erken Cumhuriyet Döneminde Şose Köprüleri ve Borçka Köprüsü

Cumhuriyet'in kurulmasıyla birlikte yönetimin en önemli gündem maddelerinden biri gelişmiş modern Türkiye'nin hızla yaratılması ve savaş sonrası yıkımların yaralarının da kapatılması amacıyla yurdun bayındır hale getirilmesiydi. Gerek kendine yeterli "milli ekonomi"nin yaratılması için kaynakların verimli kullanılabilmesi ve böylelikle ekonomik olarak refaha kavuşabilme, gerek ise modernleşme hamlesinin tabana yayılabilmesi ve en ücra köşelere kadar kendini gösterebilmesi için "bayındır ülke" idealinin gerçekleştirilmesi gerekiyordu. Bu amaçla bataklıkların kurutulmasından, kent planlarının yapılmasına, kamu binalarının inşasından sanayi yapılarına, demiryolu ve karayolu hatlarının kurulmasından elektrik, havagazı, su vb. altyapı hizmet sistemlerinin inşasına farklı ölçeklerde bayındırlık çalışmaları yapılmaya başlandı.

Yapılan bu çalışmalar arasında en önem verilen ve öncelikle ele alınan ise ulaşım ağlarının kurulmasıydı. Ulaşım politikasında öncelik, ülke kaynaklarını harekete geçirmesi hedefiyle demiryollarının yapımına verilmiş ve demiryolu hatları potansiyel üretim merkezlerine ve doğal kaynaklara yönlendirilmişti. Bu nedenle bazı temel hatlar Ergani'ye ulaşan demiryolu bakır, Ereğli kömür havzasına ulaşan demir, Adana ve Çetinkaya hatları pamuk ve demir hatları gibi isimlerle anılıyordu. Böylelikle demiryolu aslında sanayinin yurt sathına yayılma sürecinde yer seçiminin belirlenmesinde yönlendirici olmuştu. Buna karşın, demiryolu ülkenin ancak belli noktalarına ulaşabiliyordu. Ülkenin "karasal bütünlüğü"nün kurulabilmesi ve ekonomik gelişmenin ülke düzeyinde yayılmasını özellikle de az gelişmiş bölgelere ulaşması için bu hatların karayolu ağıyla desteklenmesi gerekiyordu (Bozdoğan, 2002) .

Osmanlı İmparatorluğu'nun yükseliş döneminde askeri ve ticari ihtiyaçlara uygun bir ulaşım ağı inşa edilmiş ve bu ağ uzun süre başarıyla korunmuştur. Ancak, imparatorluğun son dönemlerinde değişen ihtiyaçlar karşısında yeni yollar yapılamadığı gibi mevcut yollar da ihmal edilmeye başlanmış ve bakımsız kalmıştı. Sonuç olarak 1923 yılında Türkiye Cumhuriyeti kurulduğunda yeni yönetim 4000 Km'si iyi durumda olan toplam 18350 km uzunluğunda karayolu devralmıştı. Yukarıda anlatılan nedenlerle demiryolu hatlarını desteklemek ve ülkenin en ücra köşelerini bile ulaşılır kılmak amacıyla bu hatların geliştirilmesi gerekiyordu. Bu amaçla 1929 yılında Nafia Vekaleti (Bayındırlık Bakanlığı) içinde Şose ve Köprüler Reisliği kuruldu ve çıkarılan yol kanunu ile karayolu yapım çalışmalarına hız verildi. (Bayındırlık İşleri Dergisi, 1938, 5/5)

Gerek demiryolu gerekse karayolu yapım çalışmalarının en kritik noktaları şüphesiz geçilmesi gereken dağlar, vadiler ve nehirlerdi. Bu bağlamda köprüler ve tüneller bu bayındırlık atılımının en prestijli yapılarıydı. Bunlardan köprüler özellikle de büyük şose köprüleri yapımı bakanlık için oldukça önemli icraatlardan biriydi.

Cumhuriyet'in ilk oniki yılında çeşitli boyutlarda 13537 adet köprü ve menfez inşa edilmiş ve 11286 adet köprü onarılmıştır. Bu yılların en dikkat çekici örneklerinden biri 1935 yılında kullanıma açılan ve bugünde ayakta olan Borçka Köprüsü'dür. Hatta denilebilir ki, kemerli yapısıyla Borçka Köprüsü az sayıdaki demir şose köprüsü arasında oldukça nadir örneklerden biridir. Artvin ilinde Hopa-Kars yolunun 36'ncı kilometresinde Çoruh Nehri üzerinde yapılmış olan köprü 1935 yılına kadar yapılan köprüler arasında 113 m açıklığıyla dönemin en dikkat çeken mühendislik ürünlerinden biridir. Langer kirişi sistemi kullanılarak yapılan köprünün kirişi çelikten yapılmıştır (Nafia Vekaleti dergisi. 1935, 2/5). Köprünün kemer yüksekliği mesnetlerden itibaren 15.75 m ahşap olan döşemesi ise 4.5 m genişliğindedir. Demir aksamı 240 ton ağırlığında olup Skoda fabrikası tarafından yapılmıştır. (Nafia Vekaleti dergisi. 1935, 2/4)

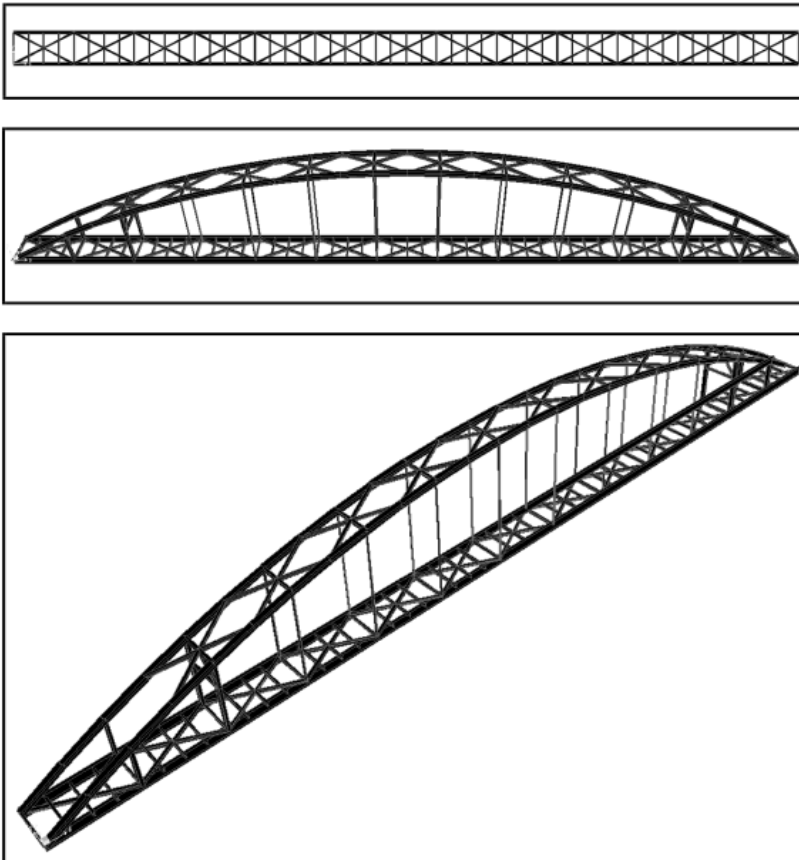
3. Artvin Borçka Köprüsü'nün Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi

Ülkemizde de endüstri mirasının korunması oldukça yeni bir gündemdir. Bu konunun bir parçası olarak ele alınmakta olan erken modern mühendislik yapılarının korunması ise öncelikle bu yapıların olası sorunlarının gözlemlenmesi ve bunlara karşı analizlerinin yapıp durumlarının değerlendirilmesiyle gerçekleştirilecektir. Söz konusu yapıların strüktürel davranışını incelemek amacıyla, yapısal performansın değerlendirilebilmesi ve sürdürülebilmesi için alınması gereken önlemlerin ipuçlarını verecek bir dizi matematiksel hesaba kapsadığından Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle yapılan çalışmaların grafik çıktılarının özellikle mimarlar tarafından daha kolay anlaşılır olduğu söylenebilir (Ünay, 2001 ve Ünay 2002). Benzer çalışmalarda analiz ya tüm yapının ya da yapı elemanlarının sonlu elemanlar modelinin üretilmesiyle başlar. Matematiksel modelin amacı yapının/yapı elemanının gerçek davranışının

matematiksel ifadelerle ve bir analiz programının yardımıyla bilgisayar ortamında benzetiminin yapılabilmesini sağlamaktır.

3.1 Sonlu Elemanlar Modeli ve Analizi

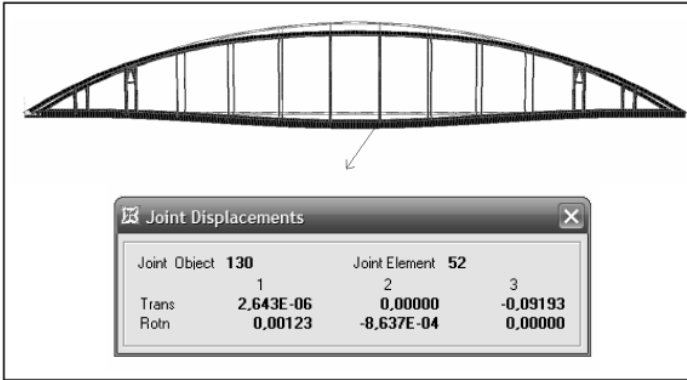
Bu çalışmanın konusu olan Borçka Köprüsü'nün analizi, çeşitli geometrilerdeki yapı elemanlarının kesit ve malzeme özelliklerinin kolaylıkla tanımlanabileceği bir analiz yöntemi olan, Sonlu Elemanlar Yöntemi ve SAP2000 (Computers and Structures Inc., 1999) bilgisayar programı ile gerçekleştirilmiştir. Bilindiği gibi, sonlu elemanlar metodu ile yapılan analizlerde çeşitli yük ve çevresel etkilere göre yapıda oluşan yer değiştirmeler, eğilme momenti, kesme kuvveti ve burulma momentleri hesaplanabilir. Bu noktada, analiz sonuçlarının hassasiyeti ve kapsamı hazırlanan matematik modelin hassasiyetiyle doğrudan ilgilidir. Bu yöntemde yapı elemanlarının ve dolayısıyla yapının geometrisi gerekli sayıda düğüm noktaları ile belirlenmektedir (Toker ve Ünay, 2004). Aşağıdaki şekilde Borçka Köprüsü'nün üç boyutlu modeli görülmektedir.



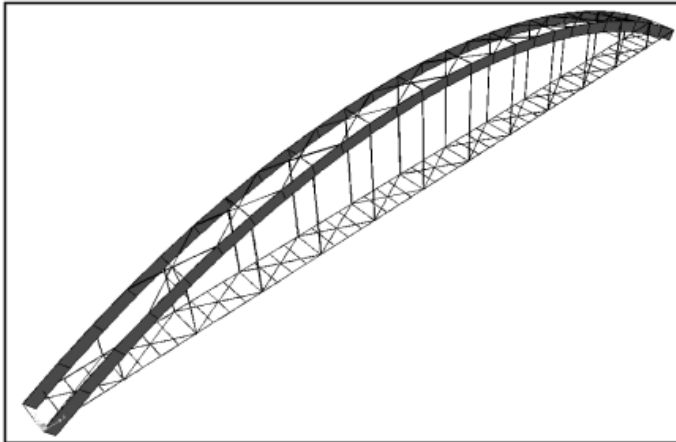
Şekil 2 Borçka Köprüsü'nün Üç Boyutlu Modelinin Değişik Açılardan Görüntüsü.

Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması için öncelikle yapının taşıyıcı sisteminin belirlenmesi gerekir. Bu nedenle, çekilen fotoğraflar incelenerek taşıyıcı sistemi oluşturan elemanların boyutları belirlenmiştir. Hassas sonuçlar elde edebilmek için yapının sonlu elemanlar analizinde çok sayıda düğüm noktası oluşturulmuştur. Modeli oluşturmak için 171 adet düğüm noktası ve 247 adet çubuk elemanlar kullanılmıştır. Seçilen malzeme özellikleri literatürde bu tür malzemeler için kullanılan genel değerler arasından seçilmiştir.

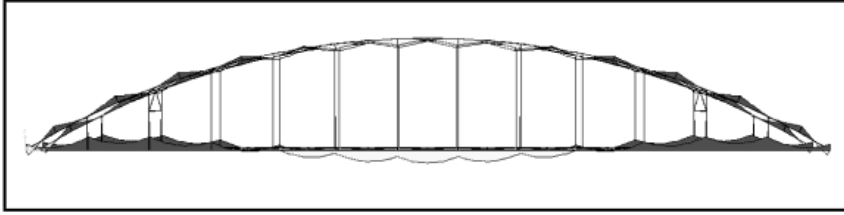
Hazırlanan Borçka Köprüsü'nün sonlu elemanlar modelinin sabit ve hareketli yükler altındaki analizi için hareketli yük 20 kN/m, sabit yük 4kN/m olarak alınmıştır. Bu yükler altında oluşan maximum yerdeğiştirme Şekil 3'te görüldüğü gibi 91.93 mm'dir. Ayrıca Şekil 4 ve Şekil 5'te Eksenel Kuvvet ve Moment diagramlarını görmek mümkündür. Şekil 4'te de görüldüğü gibi yapıda oluşan maksimum eksenel kuvvet beklenildiği gibi kemerde ortaya çıkmaktadır. Bu grafiklerden de anlaşılaacağı gibi elde edilen analiz sonuçları yapının "geometrik özellikleri" bakımından beklenen yapısal davranışını yansıtmaktadır.



Şekil 3 Yapıda Oluşan Maksimum Yer Değiştirme.



Şekil 4 Yapıda Oluşan Eksenel Kuvvet Diagramı.



Şekil 5 Yapıda Oluşan Moment Diagramı.

4. Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Yakın tarihimizin ihmal edilmiş bir parçası olan köprülerimiz ulaşım sistemleri içindeki işlevlerini yitirdikleri ve henüz koruma kapsamına alınmadıkları için diğer erken Cumhuriyet dönemi mühendislik yapıları gibi bugün kaderlerine terk edilmiş durumdadırlar. Oysa ki dünyada benzer yapılar endüstriyel mirasının bir parçası olarak son yıllarda artan bir bilinçle korunmaya çalışılmaktadır. Ülkemizde de benzer değerdeki bu yapılar gelecek kuşaklara aktarılacak için en iyi şekilde korunmalıdır. Bu yapılarla ilgili en önemli strüktürel sorunlardan birincisi bulundukları bölgelerdeki deprem, rüzgar, sel vb. doğal etkenlerin yarattığı yükler, ikincisi ise tasarlandıkları dönemdeki koşulların zaman içinde artarak ve değişerek ortaya çıkardığı aşırı yüklenmelerdir. Söz konusu yapıların korunarak gelecek nesillere aktarılabilmesi için strüktürel davranışlarının iyi bilinmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, örnek olarak Borçka Köprüsü taşıyıcı sistemi incelenmiş ve bilgisayar ile kendi yükü hareketli yükler karşısındaki davranışının analizi yapılmıştır. Borçka Köprüsü'nün matematiksel modeli, dönemin periyodiklerinde yayınlanmış planlar ile köprü'nün bugünkü fotoğraflarından yararlanılarak taşıyıcı sistem elemanlarının gerçek ölçülerine en yakın şekilde boyutlandırılmasıyla elde edilmiştir.

Bu datalar kullanılarak yapının kendi ağırlığı ve hareketli yükler altındaki davranışını belirleyebilmek amacıyla matematiksel bir model hazırlanmış, bu modelin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi gerçekleştirilmiştir. Borçka Köprüsü'nün sonlu elemanlar analizinin sonuçlarının yorumlanması için deplasman, moment, ve eksenel kuvvetleri gösteren grafiklerden yararlanılmıştır. Bu sonuçlara bakıldığında yapının "geometrik özellikleri" bakımından beklenen yapısal davranışını sergilediği görülmüştür.

Bu çalışmanın yaygınlaştırılarak benzer riskler altında bulunan erken-modern dönem köprülerimizin orijinal kullanımlarının değişiklikleri ve artan yoğunluk karşısında oluşan aşırı yüklenmeleri karşısında gösterdikleri davranışların gözlemlenmesinin "mühendislik mirasımızın korunması" konusuna yeni açılımlar sağlayacağına inanılmaktadır. Bu çalışmanın bu tür bir duyarlılığın oluşmasına katkıda bulunması umulmaktadır.

5. Kaynaklar

1. Bozdoğan, S. (2002), Modernizm ve Ulusun İnşası, Metis, İstanbul.
2. Yol İşleri, Bayındırlık İşleri Dergisi, T.C. Bayındırlık Bakanlığı, (1938), 5(5), s. 243-295.
3. Cumurluğun Onikinci Yılında Büyük Şose Köprüleri Yapıcılığı (1935), Nafia Vekaleti Dergisi, 2(5),s. 28-37
4. Borçka Köprüsü, (1935), Nafia Vekaleti Dergisi, 2(4),s. 53-57
5. SAP 2000. (2002) Version 8, Analysis Reference Manual, Computers & Structures Inc., Berkeley.
6. Ünay, A.İ. (2001) Analytical Modeling of Historical Masonry Structures for the Evaluation of Strength Capacity of Their Vulnerable Elements, International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, Bildiriler Kitabı, Cape Town, South Africa, s. 1269-1276.
7. Ünay, A.İ. (2002) Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı, ODTÜ Mimarlık Fakültesi Basım İşliği, Ankara, Türkiye.
8. Toker, S. ve Ünay, A. İ. (2004) Mathematical Modeling and Finite Element Analysis of Masonry Arch Bridges, G.U. Journal of Science, Vol. 17, No:2, s. 129-139.

Tek Açıklıklı Tarihi Köprülerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi

S. Bahadır Yüksel

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Müh. Mim. Fakültesi, Selçuk Üniversitesi, 42075, Konya

Tel: (332) 223 26 46, Fax: (332) 241 06 35

E-Posta: sbahadiryuksel@yahoo.com, sbuyuksel@selcuk.edu.tr

Öz

Tek açıklıklı tarihi köprüler genellikle simetrik parabolik guseli olarak yapılmıştır. Geometrik şekillerinden dolayı bu tip köprülerde oluşan kesit tesirlerinin belirlenmesi karmaşık ve zahmetli bir iştir. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak tek açıklıklı parabolik tarihi köprülerin davranışını araştırmaktır. Dış yüklerden dolayı bu tip köprülerde oluşan yatay reaksiyon kuvvetleri ve uç momentleri kapsamlı bir parametrik çalışma ile hesaplanmıştır. Tek açıklıklı tarihi köprülerin kesitinin ağırlık merkezinin sürekli değişmesi nedeniyle, düşey yükler altında eğilme momentine ilaveten çok önemli mertebelerde yatay basınç kuvvetleri oluşmaktadır. Ayrıntılı bir sonlu elemanlar modellemesi yapılmadığı takdirde, uç momentlerine ilaveten oluşan bu yatay basınç kuvvetlerini klasik çubuk eleman modeli ile hesaplama imkânı olmamaktadır. Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlar, klasik çubuk elemanları kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çubuk elemanlar kullanılarak elde edilen sonuçların önemli mertebelerde hata içerdiği ispatlanmıştır. Kapsamlı parametrik çalışma sonucu, çubuk elemanlar kullanılarak yapılan modellemedeki hataların nedeni ve büyüklüğü yorumlanmıştır. Ayrıca, tek açıklıklı tarihi köprülerin incelenmesi için yapılacak analizlerde dikkat edilmesi gereken hususlar açıklanmıştır.

Anahtar sözcükler: Tarihi köprü, prizmatik olmayan eleman, sonlu elemanlar analizi, uç momentler, uç kuvvetler.

Giriş

Uzun açıklıklı tarihi köprüler genellikle değişken kesitli olarak yapılmıştır. Uzun açıklıklı değişken kesitli tarihi köprülerin kesitleri uzunluk boyunca genellikle parabolik değişim gösterecek şekilde tasarlanmıştır. Tek açıklıklı simetrik parabolik guseli tipik bir tarihi köprü Şekil 1’de gösterilmiştir.



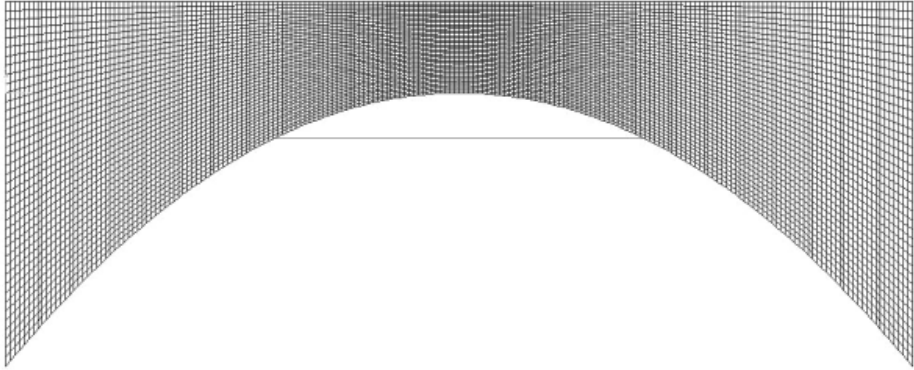
Şekil 1. Tek açıklıklı simetrik parabolik guseli bir tarihi köprü

Prizmatik olmayan geometrik şekilleri nedeni ile tarihi köprülerin yeniden analizi ve incelenmesi, özellikle yatay basınç kuvvetlerinin ve uç momentlerinin hesaplanması zahmetli ve zaman alıcı bir iştir. Literatürde prizmatik olmayan elemanların analizi için değişik yöntemler sunulmuştur. Prizmatik olmayan elemanların rijitlik katsayıları, taşıma katsayıları ve uç momentleri ayrıntılı bir biçimde 1958 yılında Portland Cement Association (PCA, 1958) tarafından tablolar halinde verilmiştir. PCA (1958) rijitlik katsayıları, taşıma katsayıları ve uç momentlerini elde etmek için bazı basitleştirici kabuller yapmıştır. Cross yöntemi ve açılı yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde, bu katsayılar ve uç momentleri 1958 yılından beri kullanılmaktadır (Timoshenko and Young, 1965; Tardaglione, 1991; Gere and Timoshenko, 1993; Hibeler, 2002). El-Mezaini ve ark. (1991) sonlu elemanlar analizleri yaparak derin guseli kirişler için bu rijitlik katsayılarının, taşıma katsayılarının ve uç momentlerinin önemli mertebelerde hata içerdiğini ispatlamışlardır. Prizmatik olmayan elemanların elastik analizi ve modellenmesi birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Vanderbilt (1978), Funk ve Wang (1988) prizmatik olmayan elemanları daha küçük elemanlara bölerek rijitlik matrislerini hesaplamışlar ve uç kuvvetlerini bulmuşlardır. Brown (1984) prizmatik olmayan kirişlerin rijitlik matrisini elde etmek için virtüel iş prensibini kullanarak bir yöntem sunmuştur. Al-Gahtani (1996) diferansiyel denklem ve sınır entegral metodu kullanarak prizmatik olmayan elemanların rijitlik matrisini, düzgün yayılı ve tekil yükler altında uç momentlerini bulmuştur. Tena-Calunga (1996) kesme deformasyonu etkisini de dikkate alarak dikdörtgen, kare, T, ve I kesitli lineer guseli bina kirişlerinin rijitlik matrislerini elde etmiştir.

Gerçekte; değişken kesitli elemanların ağırlık merkezleri sürekli değişim halinde bulunmasına rağmen, yukarıdaki çalışmalarda, rijitlik matrisleri ve uç momentleri değişken kesitli elemanların ağırlık merkezinin düz olduğu varsayımına göre çıkarılmıştır. El-Mezaini ve ark. (1991) ve Balkaya (2001) bu klasik çözüm yön-

temlerinin çok hatalı sonuçlar verdiğini ispatlamışlardır. Baklaya (2001) T kesitli prizmatik olmayan elemanların davranışını üç boyutlu sonlu elemanlar kullanarak araştırmış ve uç momentlerini, rijitlik katsayılarını ve taşıma faktörlerini bulmuştur.

Tek açıklıklı tarihi köprüler gibi kesit ağırlık merkezi sürekli bir biçimde değişen prizmatik olmayan elemanlar bir kemer gibi davranmaktadır. Eğer prizmatik olmayan bir elemanın iki ucu tüm yer değiştirmeler engellenecek şekilde ankastre olarak mesnetli ise, düşey yükler altında eğilme momentine ilaveten çok önemli mertebede eksenel basınç kuvvetleri oluşmaktadır. Ayrıntılı bir sonlu elemanlar modellemesi yapılmadığı takdirde, eğilme momentlerine ilaveten oluşan bu yatay basınç kuvvetlerini, klasik çubuk eleman modeli ile hesaplama imkânı olmamaktadır. Bu çalışmanın amacı; simetrik parabolik guseli tarihi köprülerin davranışını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemektir. Bu nedenle, tek açıklıklı tarihi köprülerin davranışı, guse yüksekliği değiştirilerek sonlu elemanlar yöntemi ile parametrik olarak araştırılmıştır. Tek açıklıklı tarihi köprülerin sonlu eleman modelleri SAP2000 (Computer and Structures Inc. 2002) paket programı ile yapılmıştır. Tek açıklıklı, tarihi köprülerin sonlu elemanlar modeli, dört düğüm noktasına sahip izoparametrik dikdörtgen elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Şekil 2’de tek açıklıklı tarihi bir köprünün sonlu elemanlar modeli gösterilmiştir.



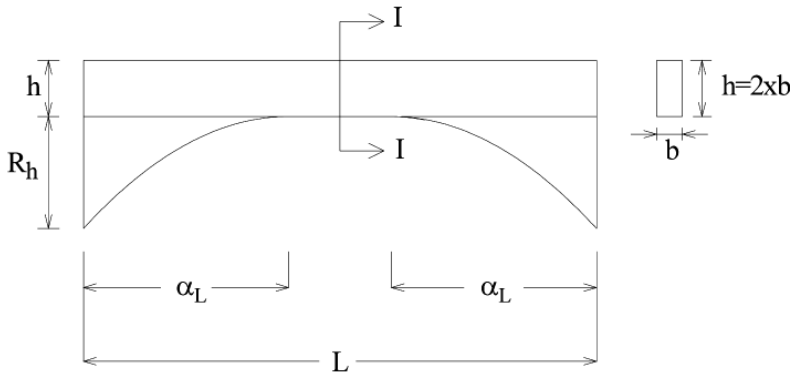
Şekil 2. Tek açıklıklı tarihi köprünün sonlu elemanlar modeli.

Bu model oluşturulurken 8000 adet dikdörtgen eleman kullanılmıştır. Tek açıklıklı tarihi köprülerin mesnetlerinde düşey yüklerden dolayı oluşan yatay basınç kuvvetleri ve eğilme momentleri hesaplanmıştır. Ayrıca çubuk elemanlar kullanılarak elde edilen sonuçlar ile sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlar da karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

Analitik Model Ve Parametrik Çalışma

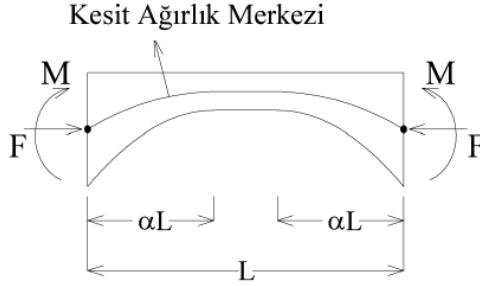
Simetrik parabolik guseli tek açıklıklı tipik bir tarihi köprünün geometrik parametreleri Şekil 3’te verilmiştir. Şekil 3’te; L köprü açıklığını, h köprünün orta

açıklığındaki yüksekliğini, b genişliğini, α_L guse uzunluk oranını (guse uzunluğu / köprü açıklığı), R guse yükseklik oranını ($R_h = R$) göstermektedir. Tek açıklıklı tarihi köprülerin iki ucunun ankastre olarak mesnetlendiği varsayılmıştır. Tek açıklıklı tarihi köprüler genellikle simetrik parabolik guseli ve α_L oranları 0.5 olacak şekilde inşa edilmiş ancak R parametreleri değişken olabilmektedir. Bu çalışmada, $\alpha_L = 0.5$ olan tek açıklıklı simetrik parabolik guseli tarihi köprüler model yapılar olarak üretilmiştir. Simetrik parabolik guseleri olan tek açıklıklı tarihi köprülerin davranışı SAP2000 (Computers and Structures Inc., 2002) programı ile iki boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturularak incelenmiştir. Sonlu elemanlar modellerinde yeterli doğruluğu sağlayabilmek için her bir tek açıklıklı köprü 8000 adet dikdörtgen elemana bölünmüştür. Analizlerde Şekil 3'te verilen geometrik konfigürasyon kullanılmış ve guse yüksekliği değiştirilmiştir. Dikdörtgen kesitli ($b \times h$) ve açıklığı L olan tek açıklıklı tarihi köprülerin homojen, izotropik ve lineer elastik olduğu varsayılmıştır. Elastisite modülü ve poisson oranı sırasıyla 3×10^7 kN/m² ve 0.2 olarak alınmıştır.



Şekil 3. Parabolik guseli prizmatik olamayan bir elemanın geometrik özellikleri.

Düşey yükler altında tek açıklıklı tarihi köprülerin davranışını araştırmak için burada parametrik bir çalışma yapılmıştır. Tüm modellerde düzgün yayılı düşey yük $w = 10$ kN/m ve açıklık ortasına etkiyen düşey tekil yük $P = 10$ kN olarak alınmıştır. Ayrıca tek açıklıklı tarihi köprünün kendi ağırlığından dolayı mesnetlerinde oluşan uç momentleri ve uç kuvvetleri hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar analizinde parametrik çalışma için $b = 0.5$ m, $h = 1.0$ m, $L = 10$ m, $\alpha_L = 0.5$ sabit olarak alınmış, geometrik parametre R ise 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 3.0, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 ve 4.0 olarak değiştirilmiştir. Bu kombinasyonlar ile geometrileri birbirinden farklı 41 adet parabolik guseli tek açıklıklı tarihi köprü elde edilmiştir. Her bir tek açıklıklı tarihi köprüye düzgün yayılı düşey yük, açıklık ortasına etkiyen düşey tekil yük ve kendi ağırlığı uygulanmıştır. Toplamda böylece 123 adet sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Yukarıda açıklanan her durum için sonlu elemanlar analiz sonuçları en kritik eğilme momentleri ve eksenel kuvvetleri bulmak için incelenmiştir.



Şekil 4. Tek açıklıklı parabolik guseli tarihi bir köprüde düşey yüklerden dolayı oluşan uç kuvvetler ve uç momentler.

Düşey yükler etkisi altındaki tek açıklıklı parabolik guseli tarihi köprülerin uç kuvvetleri ve uç momentleri sonlu elemanlar analizlerinden elde edilmiştir. Düğüm noktalarındaki kuvvetleri ve gerilmeleri hesaplamak uç kuvvetlerini bulmak için yeterli değildir. Sonlu elemanlar analizlerinin doğru sonuçlar vermesine rağmen, düğüm noktası kuvvetlerinden mesnet reaksiyonlarını hesaplamak çok uğraştırıcı ve zahmetli bir iştir. Tek açıklıklı tarihi köprülerin düşey yüklerden dolayı mesnetlerinde oluşan reaksiyon kuvvetleri Bathe (1996)'nin kitabında açıkladığı gibi düğüm noktaları kuvvetlerinden hesaplanmıştır. Şekil 4'te tek açıklıklı parabolik guseli tarihi bir köprüde düşey yüklerden dolayı oluşan uç kuvvetleri ve uç momentleri gösterilmiştir. Düğüm noktası kuvvetlerinden, mesnet bölgelerindeki uç momentleri ve uç kuvvetlerini hesaplamak için bir bilgisayar programı hazırlanmıştır.

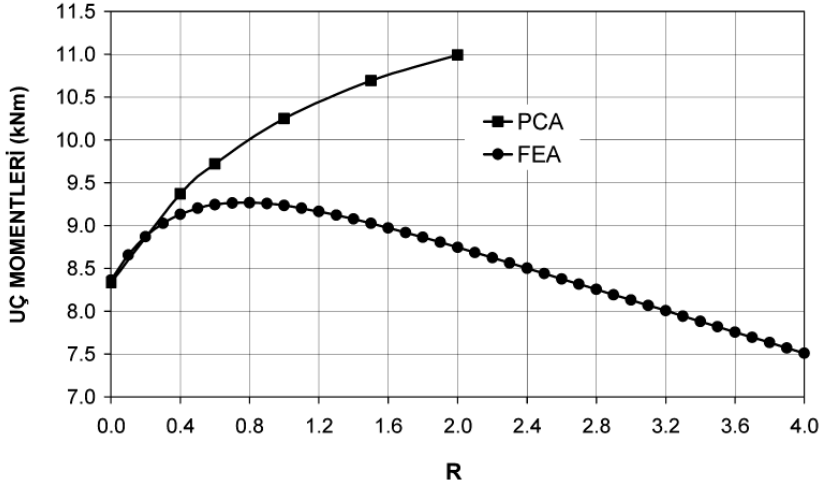
Parametrik Çalışmanın Sonuçları

Düzgün yayılı düşey yüklerden ($w = 1 \text{ kN/m}$) dolayı tek açıklıklı tarihi köprülerde oluşan uç kuvvetleri ve uç momentleri hesaplanmıştır. Tek açıklıklı bir tarihi köprüde ($R = 3$) oluşan eksenel gerilme diyagramı Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekilden görüleceği gibi oluşan gerilmeler non-lineer ve son derece karmaşıktır.



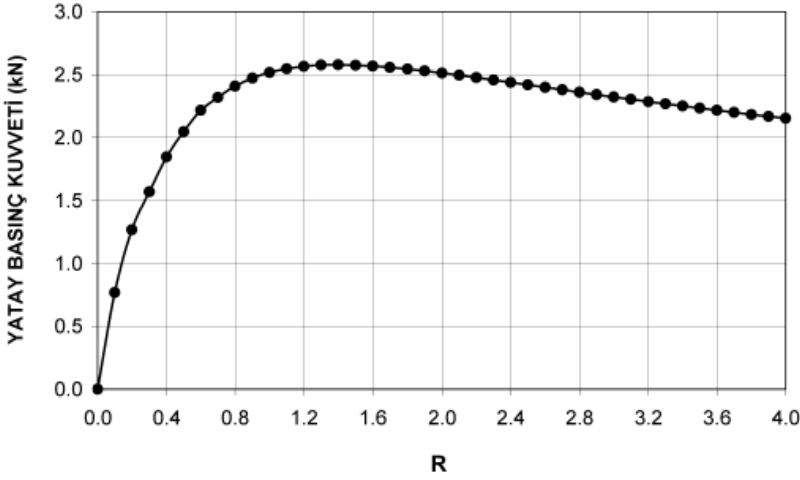
Şekil 5. Düzgün yayılı düşey yüklerden ($w = 1 \text{ kN/m}$) dolayı tek açıklıklı tarihi bir köprüde ($R = 3$) oluşan eksenel gerilme dağılımı.

Düzgün yayılı düşey yüklerden dolayı oluşan ankastrelik momentleri sonlu elemanlar analizinden elde edilmiş ve Şekil 6'da PCA (1958) verilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Parametrik çalışmada sonlu elemanlar analizleri $R = 4$ 'e kadar yapılmış, ancak PCA (1958) da verilen değerler $R = 2$ 'ye kadar mevcuttur. Bernoulli-Euler kiriş teorisine göre (PCA, 1958) guse yüksekliği arttıkça ankastrelik momentleri artmakta fakat sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlara göre ankastrelik momentleri $R = 0.7$ değerine kadar hızlı bir biçimde artmakta bu değerden sonra ankastrelik momentleri azalmaktadır. Bu iki farklı davranış ankastre mesnetli simetrik parabolik guseli tek açıklıklı tarihi köprülerin bir kemer gibi davranmasından kaynaklanmaktadır. Kesit ağırlık merkezinin sürekli değişmesi nedeni ile yapı parabolik bir kemer gibi davranmaktadır. Düşey yükler etkisi altında ankastre mesnetli parabolik guseli tek açıklıklı bir tarihi köprüde eğilme momentlerine ilaveten çok önemli mertebelerde eksenel basınç kuvvetleri oluşmaktadır. Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen bu eksenel basınç kuvvetleri, klasik çubuk eleman modelleri kullanılarak elde edilememektedir. Buna ilaveten günümüzde kullanılan yapı analizi programları bu eğilme momenti ve eksenel kuvvet arasındaki ilişkiyi modelde hesaba katamamakta ve PCA (1958) da bulunan sonuçlar gibi sadece eğilme momentini bulmaktadır.



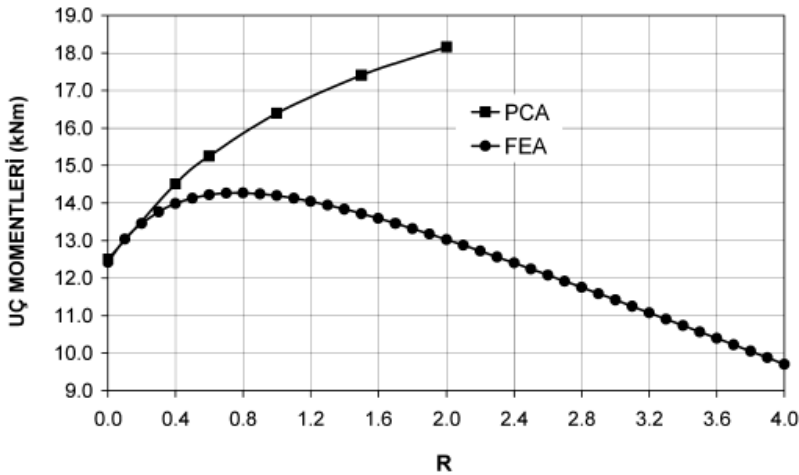
Şekil 6. Düzgün yayılı yükler ($w = 1$ kN/m) altında oluşan ankastrelik momentlerinin karşılaştırılması [FEA:Sonlu elemanlar modellemesi, PCA:(PCA, 1958)].

Düzgün yayılı düşey yüklerden dolayı tek açıklıklı parabolik guseli tarihi köprülerde oluşan yatay basınç kuvvetlerinin guse yükseklik oranına göre değişimi Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7'de gösterildiği gibi düşey yüklerden dolayı bu tür yapılarda çok önemli mertebelerde yatay basınç kuvvetleri oluşmaktadır. Sonlu elemanlar analiz sonuçları göstermiştir ki oluşan eksenel kuvvetler, $R = 1.3$ 'e kadar hızlı bir biçimde artmakta daha büyük değerler için eksenel basınç kuvvetleri artmamakta ve lineer olarak azalmaktadır.



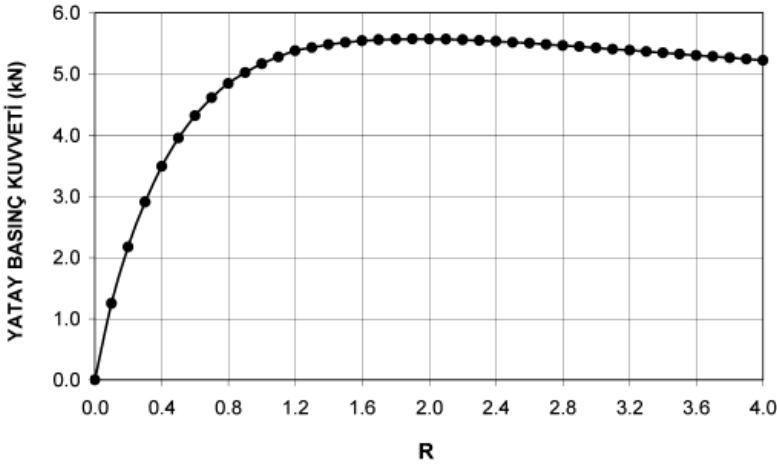
Şekil 7. Düzgün yayılı düşey yüklerden ($w = 1$ kN/m) dolayı oluşan yatay basınç kuvvetleri.

Şekil 8’de tek açıklıklı tarihi köprünün açıklık ortasına 10 kN’luk bir tekil yük etkimesi halinde sonlu elemanlar analizi ile klasik kiriş teorisinden (PCA, 1958) elde edilen ankastrelik momentleri karşılaştırılmaktadır. PCA (1958) değerleri $R = 2$ ye kadar mevcuttur. Bernoulli-Euler kiriş teorisine göre (PCA, 1958) guse yüksekliği arttıkça ankastrelik momentleri artmakta; fakat sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlara göre ankastrelik momentleri $R = 0.7$ değerine kadar hızlı bir biçimde artmakta, bu değerden sonra ankastrelik momentleri lineer olarak azalmaktadır.



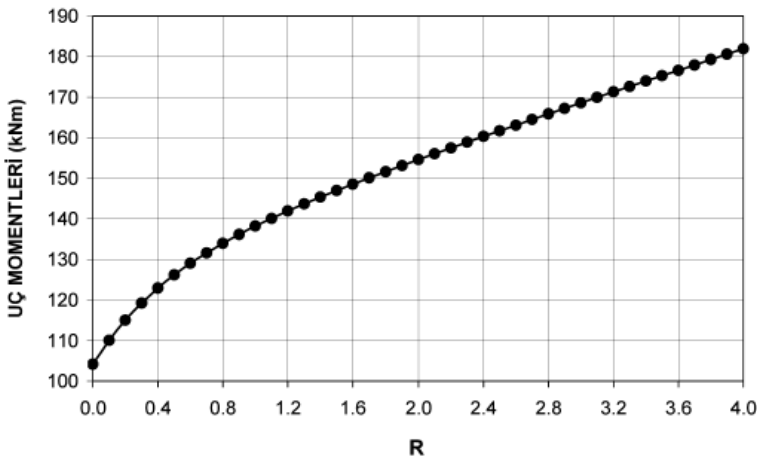
Şekil 8. Açıklık ortasına etkiyen düşey tekil yükten ($P = 10$ kN) dolayı oluşan ankastrelik momentlerinin karşılaştırılması [FEA: Sonlu elemanlar modellemesi, PCA:(PCA, 1958)].

Şekil 9’da tek açıklıklı tarihi bir köprüde açıklık ortasına etkiyen düşey tekil yükten dolayı oluşan yatay basınç kuvvetlerinin değişik guse derinlik oranlarına (R) göre değişimi gösterilmiştir. Kemer etkisinden dolayı, açıklık ortasına etkiyen tekil yükten dolayı önemli mertebelerde yatay eksenel kuvvetler oluşmaktadır. Yatay basınç kuvveti $R=1.6$ değerine kadar parabolik olarak artmakta ve bu değerden sonra eğri lineer olarak azalmaktadır.



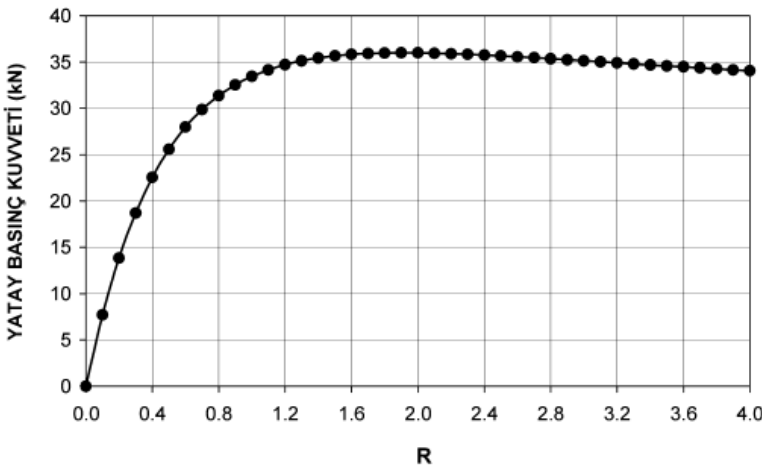
Şekil 9 Açıklık ortasına etkiyen düşey tekil yükten ($P = 10$ kN) dolayı oluşan yatay basınç kuvvetleri.

Şekil 10’da tek açıklıklı tarihi köprüde kendi ağırlığından dolayı oluşan ankastrelik uç momentleri sonlu elemanlar analizlerinden elde edilmiş ve guse yükseklik oranının (R) bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Guse yükseklik oranı arttıkça ankastrelik uç momentleri parabolik bir şekilde artmaktadır.



Şekil 10. Köprünün kendi ağırlığından dolayı uçlarında oluşan ankastrelik momentlerinin guse yükseklik oranına (R) göre değişimi.

Şekil 11’de tek açıklıklı tarihi köprüde oluşan yatay basınç kuvvetlerinin guse yükseklik oranına göre değişimi verilmiştir. Tek açıklıklı bir tarihi köprüde ağırlık merkezinin uzunluk boyunca sürekli değişmesi nedeni ile köprünün kendi ağırlığından dolayı eksenel yük ve moment arasında bir etkileşim oluşmaktadır. Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlara göre tek açıklıklı parabolik guseli tarihi köprülerin kendi ağırlıklarından dolayı önemli mertebelerde yatay basınç kuvvetleri oluşmaktadır. Köprünün kendi ağırlığından dolayı oluşan yatay basınç kuvvetleri $R = 1.6$ değerine kadar parabolik olarak artmakta ve bu değerden sonra neredeyse lineer olarak yatay kalmaktadır.



Şekil 11. Köprünün kendi ağırlığından dolayı oluşan yatay basınç kuvvetlerinin guse yükseklik oranına (R) göre değişimi.

Sonuçlar

Bu çalışmada tek açıklıklı parabolik guseli tarihi köprülerin düşey yükler altındaki davranışı araştırılmıştır. Düşey yükler altında tek açıklıklı tarihi köprülerin davranışını araştırmak için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak parametrik çalışma yapılmıştır. Düşey yükler altında tek açıklıklı tarihi köprülerin uçlarında oluşan uç momentleri ve eksenel basınç kuvvetleri; sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmış ve literatürdeki değerler ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları göstermiştir ki, bu tip yapıların kesit ağırlık merkezleri açıklıkları boyunca sürekli değişmekte ve tek açıklıklı parabolik guseli tarihi köprüler düşey yükler altında bir kemer gibi davranmaktadır. Kemer etkisi nedeni ile düşey yükler altında bu tip elemanlarda eğilme momentlerine ilaveten çok önemli mertebelerde eksenel basınç kuvvetleri oluşmaktadır. Literatürde bulunan değişken kesitli çubuk eleman modellerinde gerçekte ağırlık merkezlerinin sürekli değişmesine rağmen tüm formüller çubuk kesitinin ağırlık merkezinin düz olduğu varsayımına göre çıkarılmıştır. Bu nedenle çubuk elemanlar kullanılarak yapılan modellemeler ile çok hatalı sonuçlar elde edilmiş ve bilhassa düşey yükler altında oluşan ekse-

nel basınç kuvvetleri bulunamamıştır. Ayrıntılı bir sonlu elemanlar modellemesi yapılmadığı takdirde bu tip yapılarda düşey yüklerden dolayı oluşan kuvvetler doğru olarak elde edilmemiştir. Bundan dolayı bu tek açıklıklı parabolik guseli tarihi köprülerin detaylı ve doğru bir şekilde tahkikinin yapılabilmesi için mutlaka detaylı bir sonlu elemanlar analizi yapılmalıdır.

Kaynaklar

Al-Gahtani H.J. (1996) Exact stiffnesses for tapered members. Journal of Structural Engineering, ASCE 122(10) pp 1234-1239.

Balkaya C. (2001) Behavior and modeling of nonprismatic members having T-sections. Journal of Structural Engineering, ASCE 127(8) pp 940-946.

Brown C.J. (1984) Approximate stiffness matrix for tapered beams. Journal of Structural Engineering, ASCE 110(12) pp 3050-3055.

Bathe, K.J. (1996) Finite Element Procedures, Prentice Hall Publisher: NJ, USA.

Computer and Structures Inc. (CSI), (2002) SAP2000 User's Manual. Berkeley, CA.

El-Mezaini N., Balkaya C., Cıtipioğlu E. (1991) Analysis of frames with nonprismatic members. Journal of Structural Engineering, ASCE 117(6) pp 1573-1592.

Funk R.R., Wang K.T. (1988) Stiffness of non-prismatic members. Journal of Structural Engineering, ASCE 114(2) pp 489-494.

Gere, J.M. and Timoshenko, S.P. (1993) Mechanics of Materials, Chapman & Hall, New York, N.Y.

Hibbeler, R. (2002) Structural Analysis, Fifth Edition, Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey 07548.

PCA (1958) Handbook of frame constants. Beam factors and moment coefficients for members of variable cross-section, Portland Cement Association, Chicago, Ill.

Tartaglione, L.C. (1991) Structural Analysis, University of Lowell, McGraw-Hill, Ins, United States of America.

Tena-Colunga A. (1996) Stiffness formulation for nonprismatic beam elements. Journal of Structural Engineering, ASCE 122(12) pp 1484-1489.

Timoshenko, S.P. and Young, D.H. (1965) Theory of Structures, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, USA.

Valderbilt M.D. (1978) Fixed-end action and stiffness matrices for non-prismatic beams. Journal of the American Concrete Institute, ACI 75(1) pp 290-298.

ABSTRACT

Single span historic bridges were commonly constructed with symmetrical parabolic haunches. Due to their non-prismatic geometrical configuration, their assessment, particularly computation of compression forces and support moments become a complex problem. This paper therefore is aimed to investigate the modeling, analysis and behavior of such bridges with the aid of finite element modeling. Fixed-end moments and forces due to uniformly distributed loads, point loads as well as due to their own weights are computed through a comprehensive parametric study. Under vertical loading condition, considerable amount of horizontal compression forces initiate in addition to bending moments. Unless detailed finite element modeling is utilized, conventional methods become deficient to compute such forces due to progressive change in centroidal axis due to non-prismatic section. Results of finite element analysis were compared with those of frame elements. It was proven that the frame element analysis results give erroneous results. As a result of detailed parametric study, the cause of errors and their magnitudes of the modeling by using frame elements were discussed. In addition, the important points while modeling and analyzing the single span historical bridges were explained.

Keywords: Historic bridge; non-prismatic member; finite element analysis; fixed end moments; Fixed-end forces.

Tarihi Yığma Minarelerin Deprem Güvenliklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi

Alemdar Bayraktar, Barış Sevim, Ahmet Can Altunışık, Temel Türker

Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon
Tel: (462) 377 26 53, (462) 377 40 20, (462) 377 40 19, (462) 377 40 20
alemdar@ktu.edu.tr, bsevim18@hotmail.com, ahmetcan8284@hotmail.com,
temelturker@ktu.edu.tr

Öz

Bu çalışmada, tarihi minarelerin doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak belirlenmiş ve deprem analizleri yapılarak güvenlikleri değerlendirilmiştir. Uygulama amacıyla, Trabzon il merkezinde bulunan tarihi İskenderpaşa camisinin minaresi seçilmiştir. Çalışma üç aşamadan oluşmaktadır: İlk aşamada, tarihi minarenin sonlu elemanlar yöntemi ile modal analizi yapılarak doğal frekansları ve mod şekilleri belirlenmiştir. İkinci aşamada, Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak yapılan ölçümlerle dinamik karakteristikler deneysel olarak elde edilmiştir. Operasyonel Modal Analiz yönteminde çevresel etkilerden yararlanılmıştır. Son aşamada ise, tarihi yığma minarenin sonlu eleman modeli deneysel sonuçlara göre iyileştirilerek, seçilen ivme kaydı için deprem güvenliği araştırılmıştır. Çalışmadan, tarihi yığma minarelerin sonlu eleman modellerinin deneysel sonuçlara göre iyileştirilmesi gerekliliği ortaya konulmuş ve minarelerde en çok zorlanan kesitlerin küp kısmından gövde kısmına geçiş bölgesi olduğu gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tarihi yığma minare, Deprem güvenliği, Operasyonel modal analiz, Sonlu elemanlar yöntemi.

Giriş

Tarihi yapılar deprem gibi beklenmedik doğal afetler karşısında zarar görmekte hatta yıkılmaktadırlar. Ancak, tarihi yapıların zarar görmesinin tek nedeni depremler değildir; yapıların maruz kaldığı farklı yüklemeler sonucu oluşan çatlama- lar, yapı malzemelerinin dayanımını yitirmesi, zamana bağlı deformasyonlar ve zemin oturmaları tarihi yapıların yavaş yavaş yok olma nedenleri arasında sayılabilir. Narin yapıları da dikkate alındığında zaman içerisinde çeşitli nedenlerden dolayı dayanım kaybına uğrayan ve günümüze kadar restore edilmemiş tarihi yığma minareler bu bağlamda oldukça önemli olmaktadır. Bu yapıların gelecek nesillere güvenle aktarılabilmesi, mevcut yapısal davranışlarının belirlenerek ge-

rekli önlemlerin alınması ve olası depremler karşısında göstereceği davranışın belirlenmesi ile mümkündür.

Yapıların mevcut dinamik davranışlarını yansıtan ve doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı olarak adlandırılan dinamik özelliklerinin deneysel ölçüm metodlarına bağlı olarak belirlenmesinde Deneysel ve Operasyonel Modal Analiz yöntemleri olmak üzere başlıca iki yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden Deneysel Modal Analiz yönteminde yapı bilinen bir etki ile uyarılmakta ve yapının bu etkiye verdiği tepki ölçülmekte, Operasyonel Modal Analiz yönteminde ise yapı taşıt yükü, rüzgâr veya yaya hareketi gibi bilinmeyen çevresel etkilerle uyarılmakta ve yapının bu etkilere verdiği tepki ölçülmektedir. Günümüz literatüründe önemli mühendislik yapılarının dinamik karakteristiklerinin deneysel ölçüm metodları kullanılarak belirlenmesi konusunda birçok çalışma mevcuttur. Chang ve diğ. (2001), Gentile ve Saisi (2007), Wang and Li (2007), Bayraktar ve diğ. (2007) yaptıkları çalışmalarda, köprülerin, barajların, tarihi yapıların, çelik sistemlerin vb. birçok yapının dinamik karakteristiklerini çeşitli metodlar kullanarak deneysel olarak belirlemişlerdir. Lord ve Ventura (2003) ve Jaishi ve Ren (2006) tarafından yapılan çalışmalarda ise dinamik karakteristikleri belirlenen yapıların gerçek davranışlarını yansıtan sonlu eleman modelleri malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki değişimler dikkate alınarak iyileştirilmiştir.

Bu çalışmada, Trabzon il merkezinde bulunan tarihi İskenderpaşa camii minaresinin dinamik davranışı teorik analizler ve deneysel ölçümlerle elde edilmiştir. Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen titreşim testlerinden elde edilen dinamik karakteristikler teorik analizden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçlar arasındaki fark en az olacak şekilde tarihi minarenin sonlu eleman modeli iyileştirilmiştir. Ayrıca seçilen ivme kaydı için minarenin zaman tanım alanında dinamik analizi yapılarak yerdeğiştirme ve gerilme dağılımları elde edilmiştir. Çalışma sonunda, tarihi minarenin mevcut durumunu yansıtan gerçek sonlu eleman modeli elde edilmiş ve deprem güvenliği belirlenmiştir.

Formülasyon

Teorik Modal Analiz

Doğal frekanslar ve mod şekilleri teorik modal analizde yapıya ait aşağıda verilen sönümsüz dinamik hareket denklemi kullanılarak belirlenmektedir.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (1)$$

Burada, $[M]$ ve $[K]$ kütle ve rijitlik matrislerini, $\{\ddot{x}(t)\}$ ve $\{x(t)\}$ zamana bağlı ivme ve yerdeğiştirme vektörlerini göstermektedir. Bu denklemin çözümünden sistemin serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal açısal frekans elde edilir. Her $(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n)$ bir doğal frekansa karşılık yapının almış olduğu şekil mod şekli olarak tanımlanır. Doğal frekansların küçükten büyüğe doğru sıralanması sonu-

cunda elde edilen en küçük frekans temel frekans ve bu frekansa karşılık gelen mod şekli birinci mod şekli olarak adlandırılır (Petyt, 1990).

Operasyonel Modal Analiz

Operasyonel Modal Analiz yönteminde yapının çevresel bir etki ile titreştirildiği kabul edilmekte ve yapının bu titreşime göstermiş olduğu tepki ölçülmektedir. Tepkilerin ölçülüp değerlendirilmesinde başlıca iki yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler frekans ortamında Piklerin Seçilmesi (Peak Peaking-PP) ve zaman ortamında Stokastik Altalan Belirleme (Stochastic Subspace Identification-SSI) yöntemleridir.

Piklerin Seçilmesi (PP) yöntemi frekans ortamına dayalı bir yöntemdir. Frekans ortamlı yöntemler basitlikleri, işlem hızları ve altyapı gibi nedenlerden dolayı daha çok tercih edilmektedirler. Ancak bu yöntemler geçici bilginin ortalamasını içerdiklerinden detaylar çoğunlukla ihmal edilmektedir. Piklerin seçilmesi yönteminin teorik olarak bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajlar;

- Piklerin seçilmesi her zaman subjektif bir konudur,
- Mod şekilleri yerine operasyonel defleksin şekilleri elde edilir,
- Sadece orantılı sönümlü yapıların gerçek modları elde edilebilir,
- Sönüm tahminleri güvenilir değildir,

şeklinde sıralanabilir (Peeters, 2000). Bütün dezavantajlara rağmen bu yöntem uygulama basitliği ve işlem hızı nedeniyle çevresel titreşim testlerine dayalı inşaat mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Piklerin Seçilmesi yönteminde bilinmeyen etki ve ölçülen tepki arasındaki bağıntı ve formülasyonlar literatürde detaylı olarak açıklanmıştır (Brincker ve diğ., 2003). Bu bağıntılar,

$$[G_{yy}(\omega)] = [H(\omega)]^* [G_{xx}(\omega)] [H(\omega)]^T \quad (2)$$

denkleminin açılımlarından elde edilmektedir. Burada, $[G_{xx}(\omega)]$ etki sinyaline ait Güç Spektral Yoğunluk Fonksiyonu'nu, $[G_{yy}(\omega)]$ tepki sinyaline ait Güç Spektral Yoğunluk Fonksiyonu'nu ve $[H(\omega)]^T$ ise Frekans Davranış Fonksiyonu'nu göstermektedir. (2) denklemindeki * ve T sırasıyla fonksiyonun eşleniğini ve transpozisini göstermektedir.

Stokastik Altalan Belirleme (SSI) yöntemi zaman ortamına dayalı bir yöntemdir. Bu yöntem zaman verileri ile hiçbir korelasyon veya spektra dönüşümüne gerek kalmaksızın direkt olarak çalışır. Bu yöntemde dikkate alınan bağıntı ve formülasyonlar literatürde detaylı olarak yer almaktadır (Ren ve diğ., 2004). Bu bağıntılar,

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (3)$$

hareket denkleminde elde edilmektedir. Burada, $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ kütle, sönüm

ve rijitlik matrislerini, $\{\ddot{x}(t)\}$, $\{\dot{x}(t)\}$, $\{x(t)\}$ ve $\{F(t)\}$ zamana bağlı ivme, hız, yerdeğiştirme ve dış kuvvet vektörlerini ifade etmektedir.

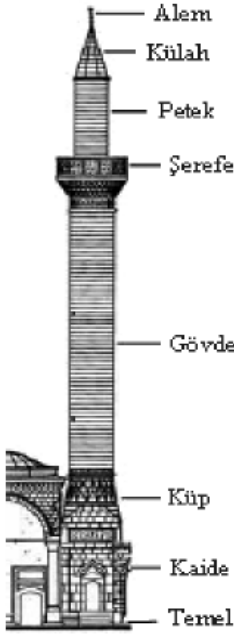
Uygulama

Bu çalışmada, Trabzon il merkezinde bulunan tarihi yığma minareli İskenderpaşa camisinin (Şekil 1) dinamik karakteristikleri Teorik ve Operasyonel Modal Analiz yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Trabzon Belediye binasının arka tarafında, Taksim Meydanında bulunan caminin XVI. yüzyılda (1529) Trabzon Valisi İskender Paşa tarafından yaptırıldığı bilinmektedir. Doğudaki tek şerefeli minarede taş ile tuğla bir arada kullanılmıştır. Caminin içerisinden çıkan minare, sekizgen bir kaide üzerine oturan bir sıra taş, beş sıra tuğladan meydana gelmiştir. Şerefe altlarında da tuğladan yapılmış bezemeler olup, korkuluklarında taşla işlenmiş dairevi motifler ve rozetlerle süslenmiştir (Şekil 1).

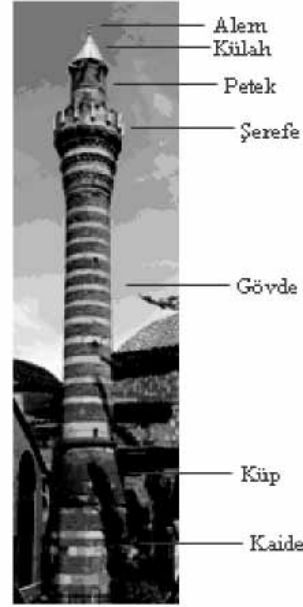


Şekil 1 İskenderpaşa Cami ve minaresi.

Osmanlı dönemine ait klasik tarihi yığma minareler gibi İskenderpaşa minaresi de temel üzerine oturan kaide, küp, gövde, şerefe, petek, kûlah ve alem gibi bölümlerden oluşmaktadır (Şekil 2).



a) Klasik Osmanlı minaresi
(Doğangün ve diğ., 2006)



b) Iskenderpaşa minaresi

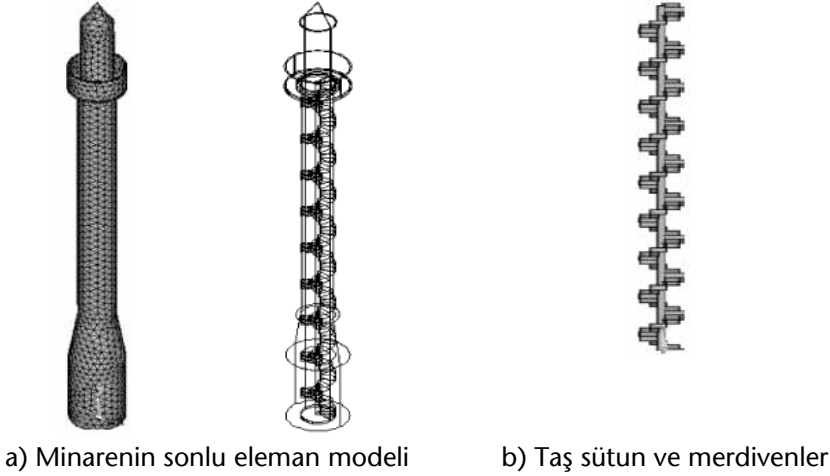
Şekil 2 Minare bölümleri.

İskenderpaşa minaresinin taban kısmında çapı 2.2m ve yüksekliği 3m olan sekizgen kaide bulunmaktadır. Kaide kısmının duvar kalınlığı 0.5m'dir. Kaidenin üstünde alt ve üst çapı sırasıyla 2.2m ve 1.5m olan 2m yüksekliğinde küp bulunmaktadır. Küp kısmının duvar kalınlığı alt bölgede 0.5m ve üst bölgede ise 0.15m'dir. Küpün üzerinde 1.5m çapında ve 11.5m yüksekliğinde gövde bulunmaktadır. Gövdenin duvar kalınlığı yükseklik boyunca sabit olup 0.15m'dir. Gövdenin bitim bölgesinde sahanlık genişliği 0.4m ve korkuluk yüksekliği 1m olan şerefe bulunmaktadır. Şerefenin sahanlık kalınlığı 0.1m'dir. Şerefenin üzerinde 1.3m çapında ve 3m yüksekliğinde petek bulunmaktadır. Petek bölgesinin duvar kalınlığı 0.05m'dir. Minarenin petek bölgesinin üzerinde kalan en üst kısmını 1m yüksekliğindeki külâh oluşturmaktadır. Minarenin iç kısmında çapı 0.2m olan taş sütun bulunmaktadır. Taş sütunun etrafında şerefe bölgesine kadar devam eden 0.2m basamak kalınlığında merdivenler yer almaktadır. Her bir merdiven iç ve dış çapı sırasıyla 0.10m ve 0.60m olan daire dilimlerinden oluşmaktadır. Minarenin toplam boyu ise 20.5m'dir.

Tarihi Minarenin Sonlu Eleman Modeli

Minarenin sonlu eleman modelinde 18712 adet 3-boyutlu katı eleman kullanılmıştır. Sınır şartları olarak minarenin kaide kısmının alt bölgesindeki bütün serbestliklerin tutulu olduğu kabul edilmiştir. Minarenin ANSYS sonlu eleman programı (ANSYS, 2003) kullanılarak oluşturulan 3-boyutlu sonlu eleman mo-

deli ve minarenin iç kısmını oluşturan taş sütun ve merdivenlere ait modeller Şekil 3'te verilmektedir.



Şekil 3 Tarihi minarenin 3 boyutlu sonlu eleman modeli.

Tarihi minareler gibi geçmişten günümüze uzanan yapıların teorik analizlerinde dikkate alınması gereken malzeme özelliklerinin doğru olarak belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu tür yapıların malzeme özelliklerinin tespit edilmesindeki zorluklar nedeniyle, literatürde tarihi yığma yapılar hakkında yapılmış benzer çalışmalar incelenmiş ve bu tür çalışmalar için dikkate alınan malzeme özellikleri belirlenmiştir (Frunzio ve diğ., 2001). Çalışma kapsamında, İskenderpaşa minaresi için malzeme özelliği olarak elastisite modülü $2E9N/m^2$ ve poisson oranı 0.2 olarak dikkate alınmıştır.

Çevresel Titreşim Testi

Tarihi yığma minarenin dinamik karakteristiklerinin titreşim testleri yapılarak belirlenmesinde Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılmıştır. Ölçümler dört adet üç eksenli ivmeölçer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İvmeölçerlerden elde edilen sinyaller 17 kanallı Brüel&Kjaer 3560 veri toplama ünitesinde birleştirilip PULSE yazılımına aktarılmıştır (Şekil 4). Burada sinyaller işlendikten sonra OMA yazılımı kullanılarak dinamik karakteristikler elde edilmiştir.



Şekil 4 Veri toplama ünitesi ve ivmeölçer.

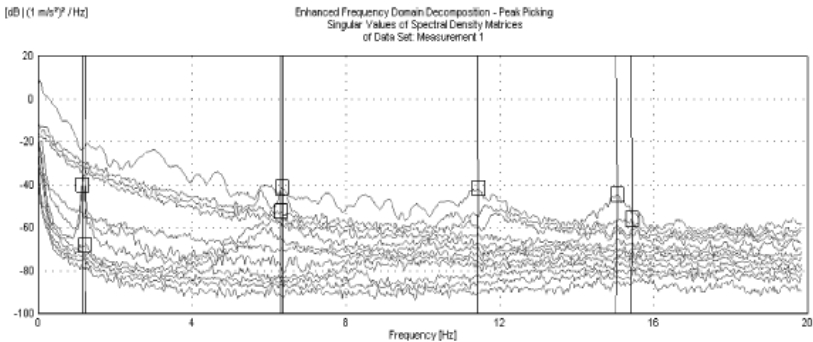
Minarenin doğal frekanslarını ve titreşim modlarını elde edebilmek amacıyla dört farklı noktadan üç eksenli ivmeölçerler kullanılarak minarenin titreşim verileri toplanmıştır. Ölçüm işleminde Şekil 5'te verilen ölçüm düzeneği oluşturulmuştur. Bu düzeneğe ivmeölçerler 1, 2, 3 ve 4 noktalarına yerleştirilmiş ve titreşim verileri toplanmıştır. Tarihi yığma minareyi titreştirmek amacıyla dışarıdan kuvvet uygulanmış, taşıt yükü ve rüzgâr gibi çevresel etkilerden yararlanılmıştır.



Şekil 5 İvmeölçerlerin yerleşim düzeni.

Teorik ve Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

Minarenin dinamik karakteristikleri, Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen titreşim testlerinden frekans ortamında Piklerin Seçilmesi (PP) yöntemiyle elde edilmiştir. Modal parametreler, Piklerin Seçilmesi yönteminde her bir titreşim sinyalinden tekil değerler olarak elde edilmiştir. Seçilen yöntem için bütün sinyallerden elde edilen değerler Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6 Piklerin Seçilmesi (PP) yönteminden elde edilen tekil değerler.

Minarenin ANSYS sonlu eleman programı (ANSYS, 2003) kullanılarak gerçekleştirilen modal analizinden ve deneysel ölçümlerden elde edilen ilk yedi frekans ve sönüm oranı değerleri Tablo 1’de karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Tablo 1 Teorik ve deneysel frekans değerleri.

Frekans No	Teorik Frekanslar (Hz)	Deneysel (PP)	
		Frekanslar (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	1.09	1.16	0.75
2	1.09	1.24	3.03
3	5.59	6.30	0.28
4	5.59	6.35	0.42
5	9.78	11.41	0.74
6	12.16	15.02	1.04
7	12.16	15.43	0.21

Minarenin sonlu eleman analizi sonucu elde edilen ilk yedi mod şekli incelendiğinde, ilk dört mod şeklinin yatay doğrultuda (x ve y) ötelenme olduğu görülmüştür. Beşinci mod burulma olarak elde edilirken, altı ve yedinci mod şekli yine yatay doğrultuda (x ve y) ötelenme olarak elde edilmiştir.

Teorik ve deneysel modal analiz sonuçları karşılaştırıldığında elde edilen sonuçlar arasında farklılıkların olduğu görülmüştür. Oluşan bu farklılıkların nedenleri arasında teorik analizler sırasında dikkate alınan malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki belirsizlikler yer almaktadır. Ayrıca tarihi yığma minareyi oluşturan taşların ve blokların zaman içerisinde tahrip olması ve özelliklerini yavaş yavaş yitirmesi dinamik karakteristikler arasında oluşan farklılıkların nedenlerindendir (Şekil 7).



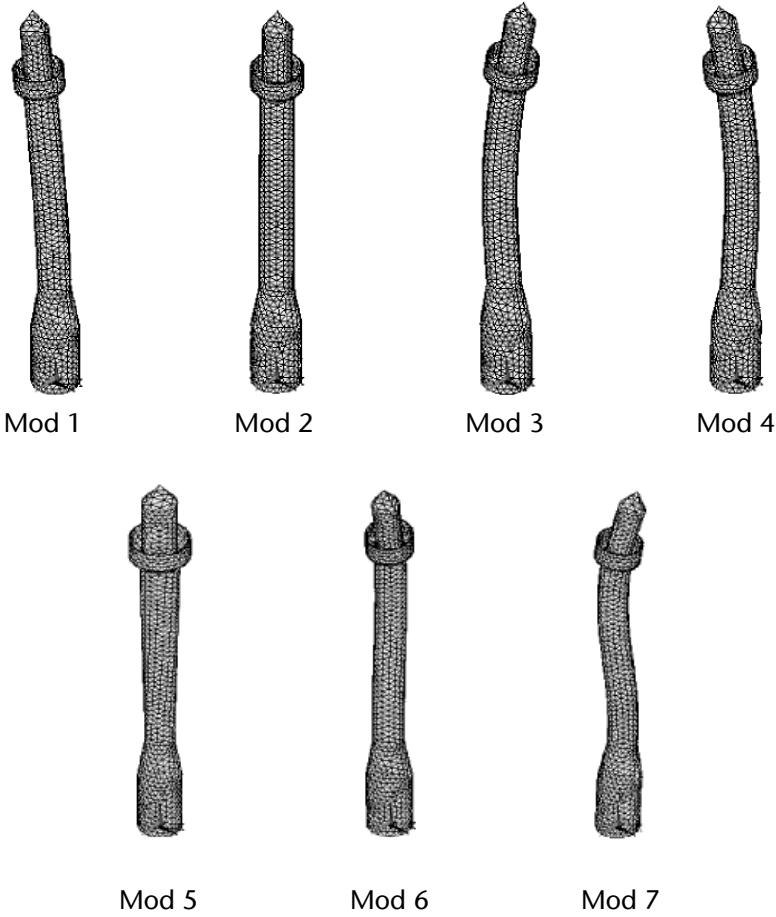
Şekil 7 Tarihi minarenin dış ve iç kısımlarında zamana bağlı gerçekleşen bozulmalar.

Bu nedenlerle tarihi minarenin analitik modelinin deneysel sonuçlara göre iyileştirilmesi gerekmektedir. Literatürde yapıların sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesinde malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki değişimlerden yararlanılmaktadır. Bu çalışmada da tarihi minarenin malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki değişimler göz önünde bulundurulmuştur. Bu amaçla, minarenin alt bölgesinde bulunan kaide kısmının yarısı cami duvarına bitişik olduğundan dolayı (Şekil 1) bu bölgedeki yer değiştirmeler tutulmuştur. Analizlerde dikkate alınan malzeme özelliklerinden elastisite modülünde %7,5 ve kütle yoğunluğunda ise %5 oranında azalma olduğu belirlenmiştir. Tablo 2’de malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki değişimler dikkate alınarak iyileştirilen sonlu eleman modelinden ve deneysel sonuçlardan elde edilen frekans değerleri verilmektedir.

Tablo 2 İyileştirilen modelin teorik frekansları ile deneysel frekanslar.

Frekans No	Teorik Frekanslar (Hz)	Deneyisel (PP)
		Frekanslar (Hz)
1	1.19	1.16
2	1.21	1.24
3	6.58	6.30
4	6.66	6.35
5	10.32	11.41
6	15.10	15.02
7	15.34	15.43

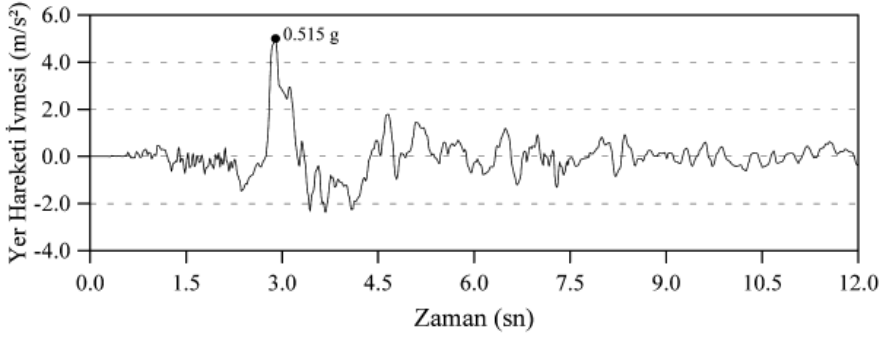
Tablo 2 incelendiğinde teorik ve deneysel sonuçların iyileştirmeden sonra birbirleriyle daha iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Mod şekilleri dikkate alındığında teorik ve deneysel olarak elde edilen mod şekillerinden ilk dört modun yatay doğrultuda ötelenme, beşinci modun burulma, altıncı ve yedinci modun da yine yatay doğrultuda ötelenme olduğu Şekil 8’de görülmektedir.



Şekil 8 Minarenin teorik olarak elde edilen ilk yedi mod şekli.

Dinamik Analiz

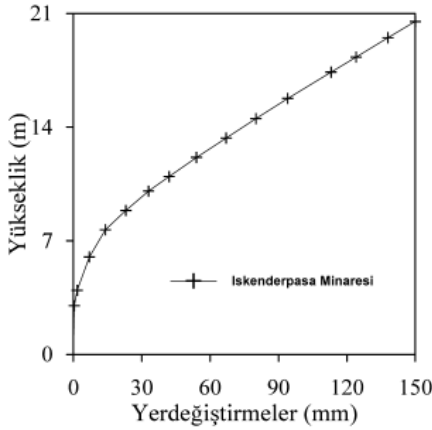
Sonlu eleman modeli iyileştirilen İskenderpaşa minaresi, 1992 yılında meydana gelen Erzincan depreminin Erzincan95 istasyonundan elde edilen ERZİKAN/ERZ-NS bileşeni (Şekil 9) kullanılarak zaman tanım alanında analiz edilmiştir (PEER, 2007). Pik değeri 0.515g olan ivme kaydı minare sistemine yatay doğrultuda uygulanmıştır.



Şekil 9 1992 yılında meydana gelen Erzincan depreminin ERZİKAN/ERZ-NS bileşeni.

Yerdeğiştirmeler ve Asal Gerilmeler

Minarenin dinamik analizi sonucunda elde edilen yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi ve maksimum yerdeğiştirmenin olduğu andaki sistemin yer değiştirmiş hali Şekil 10'da verilmektedir. Buradan, yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca arttığı görülmüştür. Maksimum yerdeğiştirme deprem yer hareketi kaydının 3.13sn'sinde, minarenin kule kısmının en üstünde, 150mm olarak elde edilmiştir.



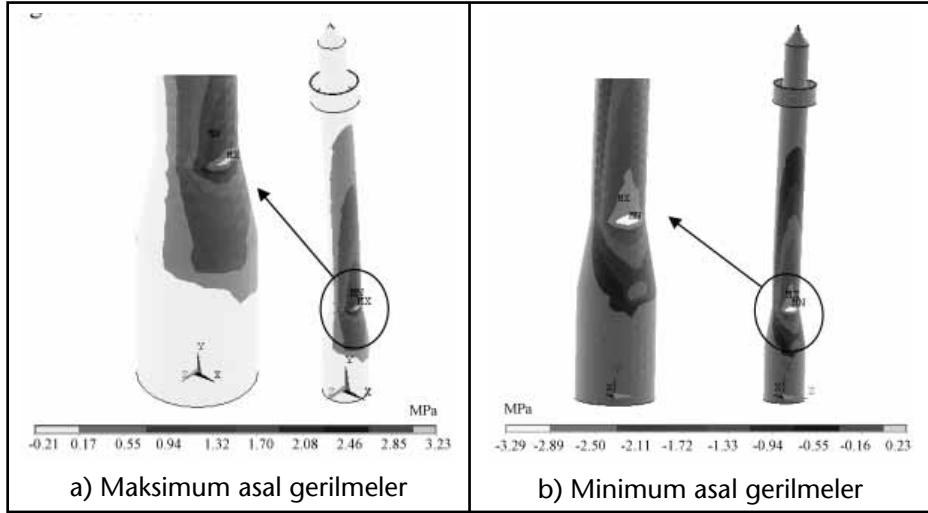
a) Yükseklik boyunca yerdeğiştirmeler



b) 3.13sn'de maksimum yerdeğiştirme

Şekil 10 Analizler sonucu elde edilen yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi.

Minarenin dinamik analizi sonucunda maksimum ve minimum asal gerilmelerin olduğu andaki sistemin gerilme diyagramı ve en çok zorlanan kesitlerin detaylı açılımları Şekil 11’de verilmektedir. Şekil 11’den görülebileceği üzere, özellikle minarenin küp kısmından gövde kısmına geçiş bölümünde büyük gerilmelerin olduğu görülmektedir.



Şekil 11 Analizler sonucu elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler.

Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, tarihi yığma minarelerin doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranları teorik ve deneysel yöntemlerle belirlenmiş ve sonlu eleman model iyileştirilmesi gerçekleştirilmiştir. İyileştirilen sonlu eleman modeli üzerinden minarenin zaman tanım alanında dinamik analizi gerçekleştirilmiş ve zorlanan kesit tesirleri belirlenmiştir. Uygulama amacıyla, Trabzon ili merkezinde bulunan ve XVI. yüzyılda (1529) yapılan İskenderpaşa minaresi seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmuştur.

- Teorik ve deneysel modal analiz yöntemleri ile elde edilen mod şekillerinin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu ve etkin ilk dört modun yatay doğrultuda ötelenme, beşinci modun burulma, altıncı ve yedinci modun yine yatay doğrultuda ötelenme olduğu görülmüştür.
- Teorik modal analizden elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında farklılıkların bulunduğu, teorik analizden elde edilen frekans değerlerinin daha düşük olduğu görülmüştür.
- Teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki farklılıkların giderilmesi için analitik model iyileştirilmesi yapılması gerekliliği ortaya konulmuş ve malzeme özellikleri ile sınır şartlarına göre yapılan iyileştirmenin sonuçlar arasındaki uyumu artırdığı görülmüştür.

- İyileştirilen sonlu eleman modeli üzerinden minarenin dinamik analizi gerçekleştirilmiş; yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca arttığı ve maksimum yerdeğiştirmenin 3.13sn'de minarenin en üst noktasında oluştuğu görölmüşür.
- Maksimum ve minimum asal gerilmeler incelendiğinde en çok zorlanan kesitlerin küp kısmından gövde kısmına geçiş bölümünde oluştuğu ve minarenin aktif ömrü içerisinde zamanla birlikte oluşabilecek muhtemel çatlakların bu bölgelerden başlayabileceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, 106M038 numaralı TÜBİTAK Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projesi kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

ANSYS, (2003). Swanson Analysis System, US.

Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A. C., Sevim, B. (2007) Düzlem Kafes Taşıyıcı Sistemlerin Operasyonel Modal Analizi, 2. Çelik Yapılar Ulusal Sempozyumu, 273-281, Eskişehir, Türkiye.

Brincker, R., Zhang, L., Andersen P. (2003) Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition, Proceedings 18th International Modal Analysis, 625-630, San Antonio, Texas, USA.

Chang, C. C., Chang, T. Y. P., Zhang, Q. W. (2001) Ambient Vibration of Long-Span Cable-Stayed Bridge, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 6, 1, 46-53.

Doğangün, A., Tuluk, Ö. İ., Livaoğlu, R., Acar, R. (2006) Traditional Turkish Minarets on the Basis of Architectural and Engineering Concepts, 1st International Conference on Restoration of Heritage Masonry Structures Cairo, Egypt, 1-10.

Frunzio, G., Monaco, M., Gesualdo, A. (2001) 3D F.E.M. Analysis of a Roman Arch Bridge, Historical Constructions, P.B.Lourenço, P.Roca (Eds.), Guimarães, 591-598.

Gentile, C., Saisi, A. (2007) Ambient Vibration Testing of Historic Masonry Towers for Structural Identification and Damage Assessment, Construction and Building Materials, 21, 1311-1321.

Jaishi, B., Ren, W.-X. (2006) Finite Element Model Updating Based on Eigenvalue and Strain Energy Residuals Using Multiobjective Optimisation Technique, Mechanical Systems and Signal Processing.

Lord, J. F., Ventura, C. E. (2003) FEM Updating Using Ambient Vibration Data from a 48-Storey Building in Vancouver, British Columbia, Canada, 32nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, South Korea.

PEER, <http://peer.berkeley.edu/smcat/data>, 24.06.2007.

Peeters, B. (2000) System Identification and Damage Detection in Civil Engineering, PhD thesis, K.U. Leuven, Belgium.

Petyt, M., (1990) Introduction to Finite Element Vibration Analysis, Cambridge University Pres, Cambridge.

Ren, W.-X., Zhao, T., Harik, I. E. (2004) Experimental and Analytical Modal Analysis of Steel Arch Bridge, Journal of Structural Engineering, ASCE, 130, 7, 1022-1031.

Wang, H., Li, D. (2007) Experimental Study of Dynamic Damage of an Arch Dam, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 36, 347-366.

Tarihi Yığma Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi

Alemdar Bayraktar, Ahmet Can Altunışık, Temel Türker, Barış Sevim

Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon
Tel: (462) 377 26 53, (462) 377 40 20, (462) 377 40 19, (462) 377 40 20
alemdar@ktu.edu.tr, ahmetcan8284@hotmail.com, temelturker@ktu.edu.tr,
bsevim18@hotmail.com

Öz

Bu çalışmada, tarihi bir yığma köprünün Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ve deneysel sonuçlara göre sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Trabzon'un Akçaabat ilçesi Şinik köyünde bulunan yaklaşık 100 yıllık geçmişe sahip Şinik köprüsü uygulama için seçilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, köprünün analitik modeli oluşturulmuş ve modal analizi yapılarak doğal frekansları ve mod şekilleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. İkinci aşamada, titreşim testleri yapılarak köprünün dinamik karakteristikleri deneysel ölçümlerden elde edilmiştir. Çevresel etkilerin uyarıcı olarak dikkate alındığı titreşim testlerinde Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılmıştır. Teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki farklılıkları en aza indirecek şekilde köprünün sonlu eleman modeli sınır şartlarındaki değişim göz önüne alınarak iyileştirilmiştir. Çalışmadan, tarihi yapıların gerçek davranışlarını elde etmede analitik modelin iyileştirilmesinin gerekliliği ortaya konulmuş ve iyileştirme sonucunda dinamik karakteristiklerin teorik ve deneysel olarak oldukça yakın elde edildiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tarihi yığma köprü, Operasyonel modal analiz, Dinamik karakteristik, Sonlu elemanlar yöntemi.

Giriş

Tarih boyunca insan eliyle üretilen ve kültürel miras olarak adlandırılan değerlerin korunup geçmiş uygarlıkların izleri olarak gelecek kuşaklara aktarılması hususu günümüzde dünya insanlığının evrensel görevi olarak değerlendirilmektedir. Bu çerçevede zengin kültür varlıklarına sahip bulunan ülkemizin de önemli sorumlulukları olduğu kuşkusuzdur (Sümerkan ve Okman, 1999). Taş kemer köprüler kültür mirasımız olarak kabul ettiğimiz tarihi yapıların başında gelmek-

tedir. Tarihimizde taş kemer köprülerin Anadolu'da yaygın olarak kullanıldığı ve özellikle de 19. yüzyılda Osmanlılar zamanında tek açıklıklı taş kemer köprü tipinin kullanıldığı bilinmektedir.

Binlerce yıllık geçmişe sahip olan tarihi yapılar deprem gibi beklenmedik doğal afetler karşısında zarar görmekte ya da yıkılmaktadırlar. Ancak, tarihi yapıların zarar görmesinin ya da yıkılmasının tek nedeni depremler değildir; yapı malzemelerinin dayanımını yitirmesi, zamana bağlı deformasyonlar, yanlış kullanımın neden olduğu aşırı ve düzensiz yüklemeler, zemin oturmaları, sel felaketleri, yangınlar ve savaşlar tarihi yapıların yavaş yavaş yok olmasının diğer nedenleridir (Toker ve Ünay, 2004). Ayrıca, kültür varlığı niteliğindeki köprülerimizin yeni yol ağlarının dışında kalmaları nedeniyle, zaman içinde kullanımlarını yitirmelerinden dolayı harap oldukları, kullanılanların da genişletme isteğiyle mimarisinin bozuldukları, su borusu geçirmek veya üstlerine gelişigüzel direk dikmek suretiyle tahrip edildikleri bilinmektedir. Gelecek nesillere aktarılabilmesi için kültür mirasımızı teşkil eden bu tür yapılarda, doğal afetlere karşı çeşitli önlemlerin alınması hususunda mevcut yapısal davranışlar ve karakteristikler çok iyi bilinmeli ve zaman içerisinde oluşabilecek farklılıklar belirlenerek gerekli önlemler alınmalıdır.

Yapıların dinamik karakteristiklerinin (doğal frekans, mod şekli, sönüm oranı) deneysel ölçümlere bağlı olarak belirlenmesinde yaygın olarak iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan ilki yapıya bilinen bir kuvvet uygulanması ve yapının bu kuvvete karşı gösterdiği tepkinin ölçülmesine dayalı Deneysel Modal Analiz yöntemi, diğeri ise çevresel etkilerden dolayı yapıda oluşan tepkilerin ölçülmesine dayalı Operasyonel Modal Analiz yöntemidir. Günümüzde mühendislik yapılarının dinamik karakteristiklerinin çevresel titreşimler kullanılarak belirlendiği birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda, tarihi yapıların, köprülerin, barajların, stadyumların, çelik sistemlerin vb. birçok yapının dinamik karakteristikleri belirlenmiştir (Chang ve diğ., 2001; Gentile ve Saisi, 2007; Wang, 2007; Bayraktar ve diğ., 2007; Reynolds ve diğ., 2004). Teorik ve deneysel olarak dinamik karakteristikleri belirlenen yapıların sonlu eleman modellerinin malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki değişimler dikkate alınarak iyileştirilmesi konusunda da yayınlanmış birçok çalışma mevcuttur (El-Borgi ve diğ., 2004; Jaishi ve Ren, 2005).

Bu çalışmada, Trabzon İli Akçaabat İlçesi sınırları içerisinde bulunan tarihi bir yığma köprünün dinamik karakteristiklerinin teorik analizler ve deneysel ölçümlerle elde edilmesi amaçlanmıştır. Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen titreşim testlerinden elde edilen dinamik karakteristikler teorik analizden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçlar arasındaki fark en az olacak şekilde tarihi köprünün sonlu eleman modeli sınır şartlarındaki değişim dikkate alınarak iyileştirilmiştir.

Formülasyon

Teorik Modal Analiz

Doğal frekanslar ve mod şekilleri teorik modal analizde yapıya ait aşağıda verilen sönümsüz dinamik hareket denklemi kullanılarak belirlenmektedir.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (1)$$

Burada, $[M]$ ve $[K]$ kütle ve rijitlik matrislerini, $\{\ddot{x}(t)\}$ ve $\{x(t)\}$ zamana bağlı ivme ve yerdeğiştirme vektörlerini göstermektedir. Bu denklemin çözümünden sistemin serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal açısal frekans ($\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$) elde edilir. Her bir doğal frekansa karşılık yapının almış olduğu şekil mod şekli olarak tanımlanır. Doğal frekansların küçükten büyüğe doğru sıralanması sonucunda elde edilen en küçük frekans temel frekans ve bu frekansa karşılık gelen mod şekli birinci mod şekli olarak adlandırılır (Petyt, 1990).

Operasyonel Modal Analiz

Operasyonel Modal Analiz yönteminde yapının çevresel bir etki ile titreştirildiği kabul edilmekte ve yapının bu titreşime göstermiş olduğu tepki ölçülmektedir. Tepkilerin ölçülüp değerlendirilmesinde başlıca iki yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler frekans ortamında Piklerin Seçilmesi (Peak Peaking-PP) ve zaman ortamında Stokastik Altalan Belirleme (Stochastic Subspace Identification-SSI) yöntemleridir.

Piklerin Seçilmesi (PP) yöntemi frekans ortamına dayalı bir yöntemdir. Frekans ortamlı yöntemler basitlikleri, işlem hızları ve altyapı gibi nedenlerden dolayı daha çok tercih edilmektedirler. Ancak bu yöntemler geçici bilginin ortalamasını içerdiklerinden detaylar çoğunlukla ihmal edilmektedir. Piklerin seçilmesi yönteminin teorik olarak bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajlar;

- Piklerin seçilmesi her zaman subjektif bir konudur,
- Mod şekilleri yerine operasyonel deflekşın şekilleri elde edilir,
- Sadece orantılı sönümlü yapıların gerçek modları elde edilebilir,
- Sönüm tahminleri güvenilir değildir,

şeklinde sıralanabilir (Peeters, 2000). Bütün dezavantajlara rağmen bu yöntem uygulama basitliği ve işlem hızı nedeniyle çevresel titreşim testlerine dayalı inşaat mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Piklerin Seçilmesi yönteminde bilinmeyen etki ve ölçülen tepki arasındaki bağıntı ve formülasyonlar literatürde detaylı olarak açıklanmıştır (Brincker ve diğ., 2003). Bu bağıntılar,

$$[G_{yy}(\omega)] = [H(\omega)]^* [G_{xx}(\omega)] [H(\omega)]^T \quad (2)$$

denkleminin açılımlarından elde edilmektedir. Burada, $[G_{xx}(\omega)]$ etki sinyaline ait Güç Spektral Yoğunluk Fonksiyonu'nu, $[G_{yy}(\omega)]$ tepki sinyaline ait Güç Spektral Yoğunluk Fonksiyonu'nu ve $[H(\omega)]$ ise Frekans Davranış Fonksiyonu'nu göstermektedir. (2) denklemindeki * ve T sırasıyla fonksiyonun eşleniğini ve transpozisini göstermektedir.

Stokastik Altalan Belirleme (SSI) yöntemi zaman ortamına dayalı bir yöntemdir. Bu yöntem zaman verileri ile hiçbir korelasyon veya spektra dönüşümüne gerek kalmaksızın direkt olarak çalışır. Bu yöntemde dikkate alınan bağıntı ve formülasyonlar literatürde detaylı olarak yer almaktadır (Ren ve diğ., 2004). Bu bağıntılar,

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (3)$$

hareket denkleminde elde edilmektedir. Burada, $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, $\{\ddot{x}(t)\}$, $\{\dot{x}(t)\}$, $\{x(t)\}$ ve $\{F(t)\}$ zamana bağlı ivme, hız, yerdeğiştirme ve dış kuvvet vektörlerini ifade etmektedir.

Uygulama

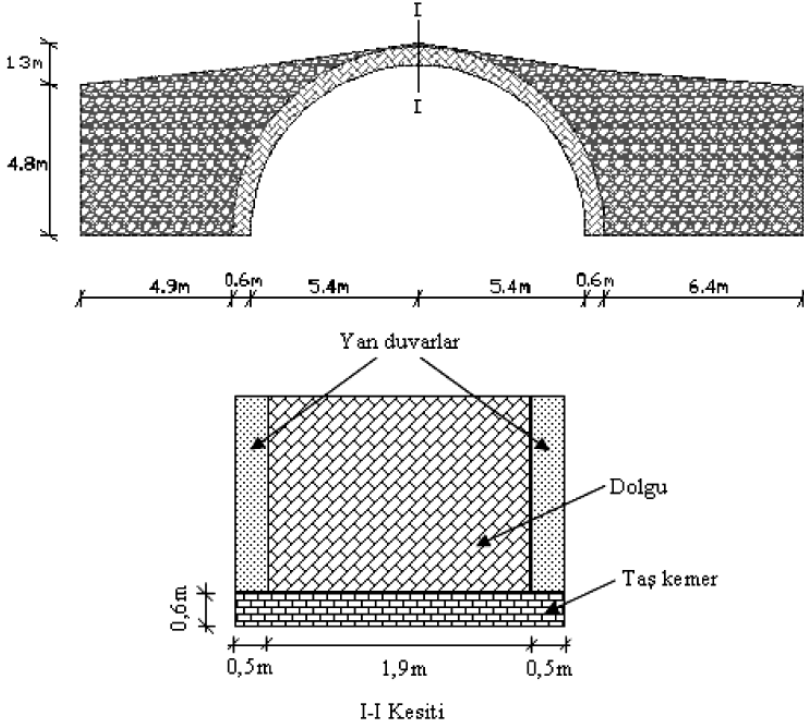
Bu çalışmada, Trabzon ili Akçaabat ilçesinde bulunan tarihi taş kemerli bir köprünün (Şekil 1) dinamik karakteristikleri teorik ve Operasyonel Modal Analiz yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Bölgenin geleneksel kemerli taş köprülerinden olan Şinik Köprüsü'nün yaklaşık 100 yıllık geçmişinin olduğu çevre halkından öğrenilmiştir. Sabit yarıçaplı tek açıklıklı kemere sahip köprünün üst kısmı kavisli olup kemer kısmı sarı renkli taş işçiliğine sahiptir. Köprü, taşıyıcı kemer kısım, yan duvarlar, dolgu malzemesi ve üst kısmında korkuluklardan oluşmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1 Şinik köprüsü.

Tarihi kemer köprüyü oluşturan malzemelerin kesit görünüşü ve özellikleri Şekil 2'de verilmektedir. Köprünün boyu 23.3m olup, toplam kemer açıklığı 10.8m ve kemer yüksekliği 5.4m'dir. Köprünün yan duvarları 0.5m kalınlığında taş du-

varlardan oluşmaktadır. Köprünün üst kısmının her iki tarafında 25x25cm boyunda taş bloklar korkuluk olarak köprü boyunca yer almaktadır.



Şekil 2 Şinik köprüsünün boyuna ve enine kesitleri.

Tarihi Kemer Köprünün Sonlu Eleman Modeli

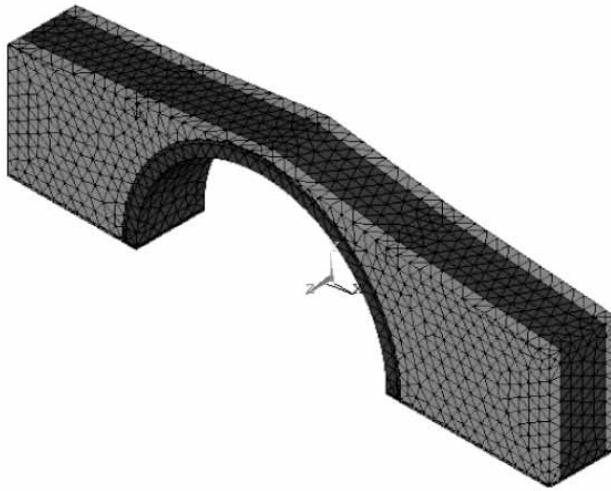
Tarihi köprü yarıçapı 5.4m ve kalınlığı 0.6m olan taş kemere sahiptir. Köprünün yan duvarlarının kalınlığı 0.5m olup, sağ ve sol taraftaki taban uzunlukları sırasıyla 7.0m ve 5.5m'dir. Yan duvarlar arasında 1.9m kalınlığında dolgu malzemesi yer almaktadır. Kemer köprünün üst kısmı eğimli olup tabliyenin en üst ve en alt kotları arasındaki mesafe 1.3m'dir. Köprünün üst kısmında her iki taraf da 25x25cm'lik elemanlar korkuluk görevindedir.

Tarihi köprüler gibi geçmişten günümüze uzanan yapıların teorik analizlerinde dikkate alınması gereken malzeme özelliklerinin doğru olarak belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu tür yapıların malzeme özelliklerinin tespit edilmesindeki zorluklar nedeniyle, literatürde benzer çalışmalar incelenmiş ve bu tür yapılar için dikkate alınan malzeme özellikleri belirlenmiştir (Frunzio ve diğ., 2001). Bu çalışmada Şinik Köprüsü için değerleri Tablo 1'de verilen malzeme özellikleri kullanılmıştır.

Tablo 1 Teorik analizlerde dikkate alınan malzeme özellikleri.

Malzeme	Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı
Taş Kemer	3.0E9	0.20
Yan duvarlar	2.5E9	0.20
Dolgu	1.5E9	0.05

Köprünün sonlu eleman modelinde 17852 adet 3-boyutlu katı eleman kullanılmıştır. Dolgu olarak kullanılan malzemenin, yapının yük taşıma mekanizmasına aktif olarak herhangi bir katkısı bulunmamaktadır (Toker ve Ünay, 2004). Sınır şartları olarak köprünün alt ve enine doğrultuda yan duvarlarında bütün serbestliklerin tutulu olduğu kabul edilmiştir. Köprünün ANSYS sonlu eleman programı (ANSYS, 2003) kullanılarak oluşturulan 3-boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 3'te verilmektedir.



Şekil 3 Tarihi yığma kemer köprünün 3 boyutlu sonlu eleman modeli.

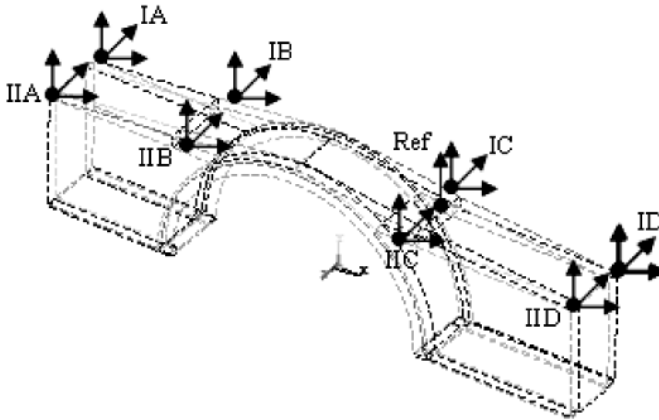
Çevresel Titreşim Testi

Tarihi yığma kemer köprünün dinamik karakteristiklerinin titreşim testleri yapılarak belirlenmesinde Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılmıştır. Ölçümler dört adet üç eksenli ve bir adet tek eksenli ivmeölçer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İvmeölçerlerden elde edilen sinyaller 17 kanallı Brüel&Kjaer 3560 veri toplama ünitesinde birleştirilip PULSE yazılımına aktarılmıştır (Şekil 4). Burada sinyaller işlendikten sonra OMA yazılımı kullanılarak dinamik karakteristikler elde edilmiştir.



Şekil 4 Veri toplama ünitesi ve ivmeölçer.

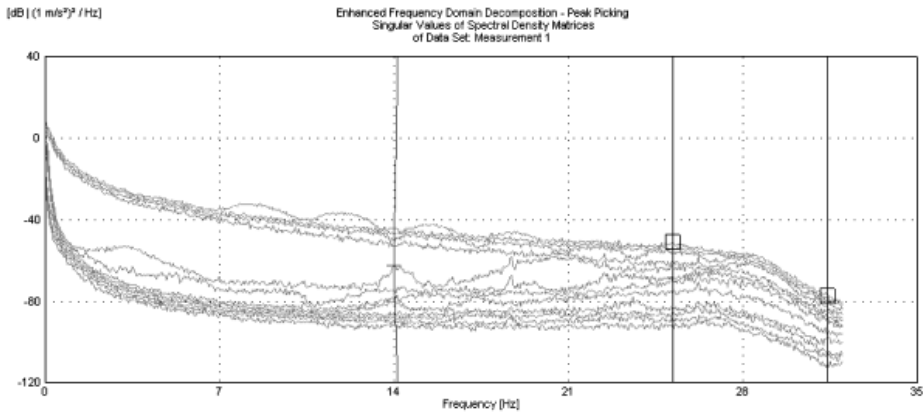
Köprünün doğal frekanslarını ve titreşim modlarını elde edebilmek amacıyla biri referans olmak üzere dokuz farklı noktadan üç eksenli ivmeölçerler kullanılarak köprünün titreşim verileri toplanmıştır. Ölçüm işleminde iki farklı ölçüm düzeneği oluşturulmuştur. Birinci ölçüm düzeneğinde ivmeölçerler Şekil 5'te gösterilen IA, IIA, ID ve IID noktalarına yerleştirilmiş ve titreşim verileri toplanmıştır. İkinci ölçüm düzeneğinde ise referanslı ölçüm yapılarak dörderli gruplar halinde üç ölçüm alınmıştır. Bu düzeneğin ilk ölçümünde ivmeölçerler IA, IIA, IB ve IIB noktalarına, ikinci ölçümünde IB, IIB, IC ve IIC noktalarına ve son ölçümünde IC, IIC, ID ve IID noktalarına yerleştirilmiştir. Bu üç ölçümdeki titreşim sinyalleri Ref. olarak gösterilen noktaya yerleştirilen tek eksenli ivmeölçer yardımıyla birleştirilmiştir. Tarihi kemer köprüyü titreştirmek amacıyla dışarıdan kuvvet uygulanmış, taşıt yükü ve rüzgâr gibi çevresel etkilerden yararlanılmıştır.



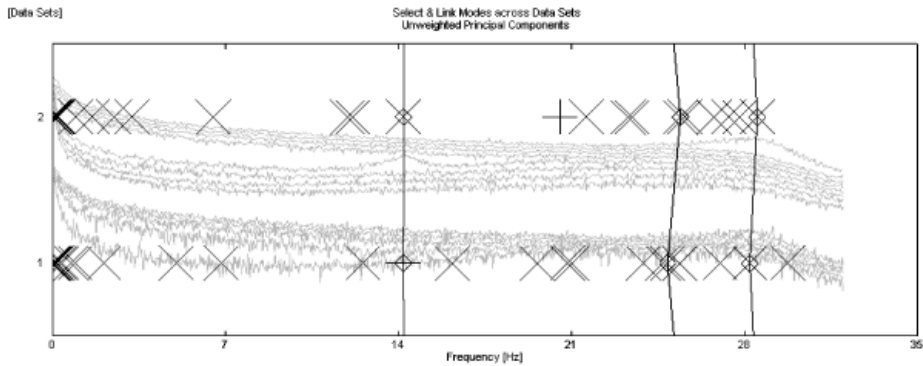
Şekil 5 İvmeölçerlerin yerleşim düzeni.

Teorik ve Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

Köprünün dinamik karakteristikleri, Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen titreşim testlerinden frekans ortamında Piklerin Seçilmesi (PP) ve zaman ortamında Stokastik Altalan Belirleme (SSI) yöntemleriyle elde edilmiştir. Modal parametreler, Piklerin Seçilmesi yönteminde her bir titreşim sinyalinden tekil değerler olarak elde edilirken, Stokastik Altalan Belirleme (SSI) yönteminde ise referanslı ölçümler sonucunda elde edilen sinyallerin yığılımlı toplamından tekil değerler olarak elde edilmiştir. Şekil 6 ve 7’de her iki yöntem için bütün sinyallerden elde edilen değerler gösterilmektedir.



Şekil 6 Piklerin Seçilmesi (PP) yönteminden elde edilen tekil değerler.



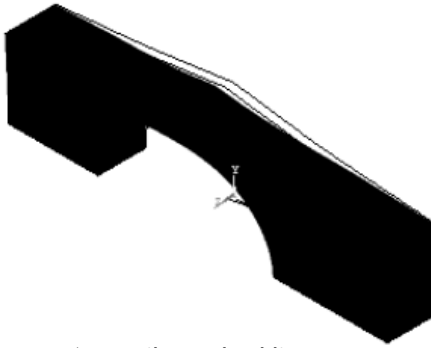
Şekil 7 Stokastik Altalan Belirleme (SSI) yönteminden elde edilen yığılımlı tekil değerler.

Köprünün ANSYS sonlu eleman programı kullanılarak gerçekleştirilen modal analizinden ve deneysel ölçümlerden elde edilen ilk üç frekans ve sönüm değerleri Tablo 2’de karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

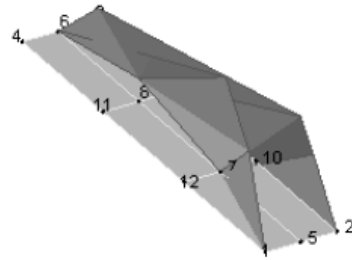
Tablo 2 Teorik ve deneysel frekans değerleri.

Frekans No	Teorik Frekanslar (Hz)	Deneysel		
		Frekanslar (Hz) PP	Frekanslar (Hz) SSI	Sönüm Oranı (%)
1	12.48	14.22	14.21	2.694
2	21.42	25.19	25.16	4.281
3	24.20	31.41	28.38	3.159

Köprünün birinci mod şekli teorik ve deneysel sonuçlardan enine doğrultuda ötelenme olarak elde edilmiş olup, Şekil 8’de gösterilmektedir.



a) Teorik mod şekli



b) Deneysel mod şekli

Şekil 8 Köprünün teorik ve deneysel birinci mod şekli.

Teorik ve deneysel modal analiz sonuçları karşılaştırıldığında elde edilen sonuçların birbirinden farklı olduğu görülmüştür. Oluşan bu farklılıkların nedenleri arasında teorik analizler sırasında malzeme özellikleri ve sınır şartlarında yapılan kabullerin gerçekte tam olarak sağlanamaması yer almaktadır. Bunlara ilaveten köprünün kemer kısmında bulunan taşlardan bazılarının zaman içerisinde kopması ve bozulması dinamik karakteristikler arasında oluşan farklılıkların nedenlerindendir (Şekil 9).



Şekil 9 Tarihi köprünün kemer bölgesinde zamana bağlı gerçekleşen bozulmalar.

Bu nedenlerle köprünün analitik modelinin deneysel sonuçlara göre iyileştirilmesi gerekmektedir. Literatürde yapıların sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesinde malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki değişimlerden yararlanılmaktadır. Bu çalışmada tarihi köprünün malzeme özellikleri literatüre uygun olarak dikkate alındığından, sadece sınır şartlarındaki değişimler göz önünde bulundurulmuştur. Bu amaçla köprünün boyuna doğrultuda yan duvarlarında zamanla biriken malzemelerin oluşturduğu mesnetleşmeler dikkate alınmıştır. Tablo 3'te sınır şartlarındaki değişimler dikkate alınarak iyileştirilen sonlu eleman modelinden ve deneysel sonuçlardan elde edilen frekans değerleri verilmektedir.

Tablo 3 İyileştirilen modelin teorik frekansları ile deneysel frekanslar.

Frekans No	Teorik Frekanslar (Hz)	Deneysel	
		Frekanslar (Hz) PP	Frekanslar (Hz) SSI
1	14.21	14.22	14.21
2	25.10	25.19	25.16
3	25.41	31.41	28.38

Tablo 3'ten teorik ve deneysel sonuçların birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Mod şekilleri dikkate alındığında teorik ve deneysel olarak yine enine doğrultuda ötelenme şekli elde edilmiştir.

Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, tarihi taş kemer köprülerin doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranları teorik ve deneysel yöntemlerle belirlenmiş ve sonlu eleman model iyileştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Uygulama amacıyla, Trabzon ili Akçaabat ilçesinde yaklaşık 100 yıllık geçmişi bulunan tarihi taş kemer köprü seçilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmaktadır:

- Teorik ve deneysel modal analiz yöntemleri ile elde edilen ilk mod şekillerinin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu ve etkin ilk modun enine doğrultuda öteleme olduğu görülmüştür.
- Geleneksel yaklaşımla gerçekleştirilen teorik modal analizden elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında farklılıkların bulunduğu, teorik analizden elde edilen frekans değerlerinin daha düşük olduğu görülmüştür.
- Teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki farklılıkların giderilmesi için analitik model iyileştirilmesi yapılması gerekliliği ortaya konulmuş ve sınır şartlarına göre yapılan iyileştirmenin sonuçlar arasındaki uyumu arttırdığı görülmüştür.

Teşekkür

Bu çalışma, 106M038 numaralı TÜBİTAK Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projesi kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

ANSYS, (2003) Swanson Analysis System, US.

Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A. C., Sevim, B. (2007) Düzlem Kafes Taşıyıcı Sistemlerin Operasyonel Modal Analizi, 2. Çelik Yapılar Ulusal Sempozyumu, 273-281, Eskişehir, Türkiye.

Brincker, R., Zhang, L., Andersen P. (2000) Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition, Proceedings 18th International Modal Analysis, 625-630, San Antonio, Texas, USA.

Chang, C. C., Chang, T. Y. P., Zhang, Q. W. (2001) Ambient Vibration of Long-Span Cable-Stayed Bridge, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 6, 1, 46-53.

El-Borgi, S., Smaoui, H., Cherif, F., Bahlous, S., Ghrairi, A. (2004) Modal Identification and Finite Element Model Updating of a Reinforced Concrete Bridge, Emirates Journal for Engineering Research, 9, 2, 29-34.

Frunzio, G., Monaco, M., Gesualdo, A. (2001) 3D F.E.M. Analysis of a Roman Arch Bridge, Historical Constructions, P.B.Lourenço, P.Roca (Eds.), Guimarães, 591-598.

Gentile, C., Saisi, A. (2007) Ambient Vibration Testing of Historic Masonry Towers for Structural Identification and Damage Assessment, Construction and Building Materials, 21, 1311-1321.

Jaishi, B., Ren, W.-X. (2005) Structural Finite Element Model Updating using Ambient Vibration Test Results, Journal of Structural Engineering, ASCE, 131, 4, 617-628.

Peeters, B. (2000) System Identification and Damage Detection in Civil Engineering, PhD thesis, K.U. Leuven, Belgium.

Petyt, M., (1990) Introduction to Finite Element Vibration Analysis, Cambridge University Pres, Cambridge.

Ren, W.-X., Zhao, T., Harik, I. E. (2004) Experimental and Analytical Modal Analysis of Steel Arch Bridge, Journal of Structural Engineering, ASCE, 130, 7, 1022-1031.

Reynolds, P., Pavic, A., Ibrahim, Z. (2004) A Remote Monitoring System for Stadia Dynamics, Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, 157, 385-393.

Sümerkan, M. R., Okman, İ. (1999) Kültür Varlıklarıyla Trabzon-Cilt 1: İlçeler ve Köyler, T.C. Trabzon Valiliği İl Kültür Müdürlüğü Yayınları, Trabzon.

Toker, S., Ünay, A. İ. (2004) Kemerli Taş Köprülerin Matematiksel Modellenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi, G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, 17, 2, 129-139.

Wang, H., Li, D. (2007) Experimental Study of Dynamic Damage of an Arch Dam, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 36, 347-366.

Kılıç Ali Paşa Hamamı Restorasyon Projesi: Uygulama Öncesi Planlama Süreci

Yavuz Suyolcu

Süleyman Seba Cad. BJK Plaza A blok No: 41 34357 Besiktas Istanbul Turkey
tel: +90 212 2603633, fax: + 90 212 2581240, ysuyolcu@kismak.com

Ergin İren

Süleyman Seba Cad. BJK Plaza A blok No: 41 34357 Besiktas Istanbul Turkey
tel: +90 212 2603633, fax: + 90 212 2581240, ergin@arier.com.tr

Öz

“Bir Mimari Anıt yapıldığı amaca hizmet edemiyorsa, korunması pratik bir gereklilik olmaktan çıkar, kültürel bir görev haline gelir.” Pierro Gazzola (Ahunbay, 1996)

Osmanlı Mimarisinin önemli özelliklerini yansıtan hamamlar, günümüzde fonksiyonel bir gereklilik olmaktan çıkmıştır. Bu değişim, hamamların gelir kaynağının azalmasına veya yok olmasına, yapının mimari özelliklerinin tahribatına, kullanım niteliklerinin değişmesine veya terk edilmelerine neden olmuştur. Geçmiş çok eskilere dayanan, çok çeşitli ve renkli öğeler barındıran hamam kültürünün bir çok unsuru unutulmuş, buna karşın gelişen turizm ile yeni bir boyut kazanmıştır. İstanbul Tophane semtinde, 1580 tarihli, Mimar Sinan’ın imzasını taşıyan Kılıç Ali Paşa Hamamı için yürütülen restorasyon çalışmalarıyla hedeflenen, yapısal restorasyonun beraberinde, kullanım planının ve yıkanma kültürünün unutulmuş öğeleri ile modern gereklilik ve yaşayış biçimlerini özümseyerek yeniden yorumlamak, hamamı kültürel bir cazibe merkezine dönüştürerek düzenli bir gelir akışına sahip olmasını sağlamaktır.

Zaman içerisinde maruz kaldığı kötü kullanım ve onarımlar ile hava kirliliği, trafik, doğal afetler ve uzun süreli doğal etkenler, Kılıç Ali Paşa Hamamı’nın duvarlarında ve kubbelerinde yer yer çatlak oluşumuna, taş ve tuğlalar üzerinde islenme ve bitkisellemeye neden olmuştur. Ayrıca kullanım süresi zarfında yapılan onarım ve eklemelerde hatalı malzeme kullanımı ile kötü işçilik ve detaylar sebebiyle yapının içindeki doğal hava sirkülasyonu çalışmaz hale gelerek, yapının rutubetten dolayı içten yosunlaşmasına ve çürümesine neden olmuştur. Bu tip yapısal bozulmalar ile beraber, camegah, ılıklik ve yıkanma bölümlerinde yapılan eklemeler, hem hamam kültüründeki oluşturan bazı ritüellerin yokolmasına neden olmuş, hem de yapının özgün ferahlığını hissedilir ölçüde azaltmıştır.

Bir zamanlar Avrupalı seyyahların ülkelerine döndükleri zaman imrenerek anlattıkları Türk hamamları, uğradıkları yapısal ve kültürel bozulmalar ile yaşadıkları finansal zorluklar sebebiyle, bir temizlik kurumunun sahip olması gereken sağlık koşullarından uzaklaşmış, kendi kültürüne yabancılaşmış, turistler için ise otantik bir durak olmaktan öteye geçememiştir.

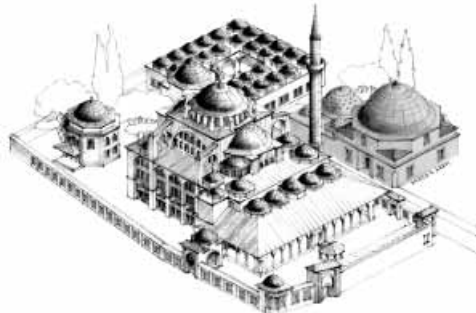
Kılıç Ali Paşa Hamamı Restorasyon Projesi adı altında yürütülen çalışmalara, geniş kapsamlı bir tarihi araştırma ile başlanmış, uzman tarihçilerin görüşleri alınmış, makaleler ile akademik yayınlar ve kütüphaneler taranmış, tarihi hamamlar yerinde gözlemlenmiştir. Mimari ve kültürel boyutta halen sürdürülen tarihi araştırmaların yanısıra, toplu yıkanma kültürünün çağdaş örnekleri de incelenerek günümüzün ihtiyaçlarına cevap verebilecek yeni bir hamam işletme modeli oluşturulmuştur. Bu işletme modelini baz alan mimari projelerin üretilmesi için uzman bir kadro ile rölöve, restitüsyon ve restorasyon projeleri tamamlanmış; oluşturulan koruma planı doğrultusunda, onarımların gerçekleşmesi için gerekli olan malzeme, işgücü ve tasarım organizasyonu yapılmıştır.

Kılıç Ali Paşa Hamamı, Türk Hamamlarının yüzyıllar boyunca maruz kaldığı yapısal ve kültürel erozyonların gözle görülebildiği, bu yüzyıla kadar ayakta kalmayı başarabilmiş bir Türk Hamamı örneğidir. Mimari Anıt olarak değerlendirilebilecek bu önemli yapının, yapıldığı amaç doğrultusunda hizmet vermesini sürdürerek, düzenli bir gelir akışına kavuşması, bu güzide eserin ve hamam kültürünün gelecek nesillere ulaşması için ilke edinilmiştir.

Anahtar sözcükler: Hamam, Restorasyon, Mimar Sinan, Kılıç Ali Paşa, Tophane

1. Giriş

İstanbul'da Tophane semtinde, Kılıç Ali Paşa Külliyesi'nin bir parçası olan Mimar Sinan yapısı, tek hamam olarak XVI. yy'ın son çeyreğinde, Kaptan-ı Derya Kılıç Ali Paşa tarafından yaptırılmıştır (Şekil 1). Asırlardır hamam olarak kullanılmış olan Kılıç Ali Paşa Hamamı, dönem dönem başka işlevler için kullanılmış olmasına ve maruz kaldığı fiziksel ve çevresel etkenler neticesinde oluşan yapısal hasarlara rağmen günümüze dek ayakta kalmayı başarabilmiştir.



Şekil 1 Kılıç Ali Paşa Külliyesi. (Necipoğlu,2005)

Maruz kaldığı çevresel etkenlerden dolayı, mevcut zemin kotundan aşağıda kalan yapıya merdivenlerle inilir. Dilimli dört adet tromp a oturan 14 metre çaplı, tepesinde aydınlık feneri bulunan büyük kubbenin üzerindeki kurşun örtü yer yer kaybolmuş ve kubbede çeşitli çatlaklar oluşmuştur. Yıkınma ve ılıklik bölümlerini örten kubbelerin üzerinde kurşun örtü yerine çimento harcı ve bitüm kaplama mevcuttur. Binanın dış cephesindeki taşlar üzerinde yer yer bozulma, islenme ve bitkisel örtü oluşumu vardır.

İç mekanda ise, sıcaklık (Şekil 2), ılıklik ve soyunmalık (Şekil 3) bölümlerinde yapılan eklemeler, hamam kültürünü oluşturan bazı öğelerin yok olmasına ve yapının özgün ferahlığının hissedilir ölçüde azalmasına neden olmuştur. Yapının nefes almasını sağlayan doğal havalandırma delikleri kapatıldığı için yosunlaşma ve çürümeler meydana gelmiştir.



Şekil 2 Sıcaklık.



Şekil 3 Soyunmalık (Camegah).

Kılıç Ali Paşa Hamamı restorasyon projesi kapsamında, 2005 senesinde yapı ile ilgili tarihi araştırma başlatılmış, 2006 senesinin Aralık ayı itibariyle Rölöve, Restitüsyon ve Restorasyon projeleri tamamlanarak, Anıtlar Yüksek Kurulu onayına sunulmuştur.

2. Restorasyonun Amacı

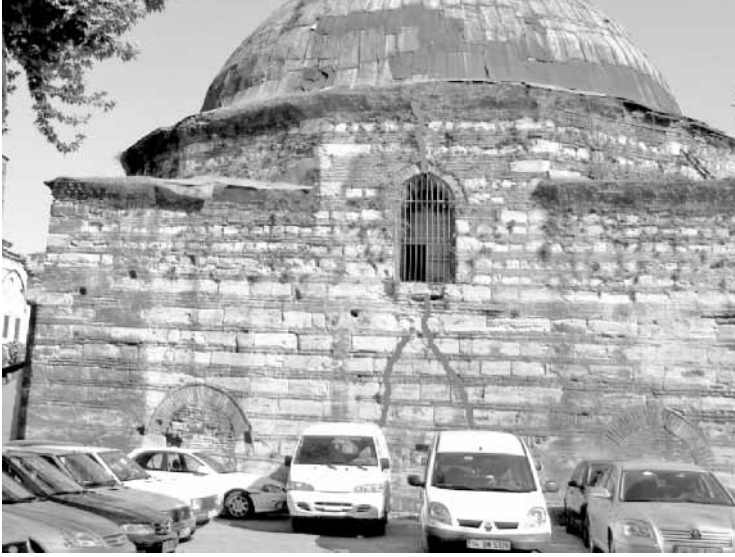
Kılıç Ali Paşa Hamamı restorasyon projesi ile hedeflenen, unutulmuş yıkınma kültürümüzün öğelerini, çağımızın getirdiği modern gereklilikler ve yaşayış biçimlerini çözümseyerek yeniden yorumlamak olacaktır. Restorasyon projesi üç ana başlıkta incelenebilir:

- Yapısal restorasyon
- Mekanik sistemlerin restorasyonu
- Hamam fonksiyonların günümüze yorumlanması

2.1 Yapısal Restorasyon

Zaman içerisinde maruz kaldığı kötü kullanım, onarımlar, hava kirliliği, trafik, doğal afetler ve uzun süreli doğal etkenler, Kılıç Ali Paşa Hamamı'nın duvarlarında ve kubbelerinde çatlaklar oluşmasına, taş ve tuğlalar üzerinde ise bitkilenme, islenme ve bozulmalara neden olmuştur.

Cephelerde bitki oluşumu ile beraber, karbonlaşmadan kaynaklanan yoğun bir yüzey kirliliği, farklı derinliklerde yüzey bozulmaları ve taşlarda erime mevcuttur. Zemin kotunda bulunan pencereler doldurulmuş, pandantiflerin üzerini örten kurşun kaplamalar ise bozulmuş durumdadır. Ayrıca sağ yan cephenin ortasında kubbe eteğinden başlayıp zemine doğru devam eden düşeye yakın bir çatlak bulunmaktadır.



Şekil 4 Sağ yan cephe.

Kılıç Ali Paşa Hamamı'nın üzerini örten kubbelerde, restorasyon süresi boyunca statik açıdan tehlike arz etmeyecek yapısal çatlaklar mevcuttur. Soyunma bölümünün kubbesi 14 metre çapında ve 60-83 cm kalınlığındadır. Ilıklık ve sıcaklık bölümlerini örten diğer yedi kubbe ise; 2,4 metre ile 7,2 metre arasında değişen çapta ve 30-50 cm kalınlıktadır.

Tüm kubbeler içten ve dıştan sıvalı olup, soyunma bölümünün kubbesi (Şekil 5) dıştan kurşun, diğer kubbeler çimento harç üzeri bitüm kaplı durumdadır. (Şekil 6)



Şekil 5 Kurşun kaplama.

Orijinalinde fil gözleriyle kaplı, hamamın içine aydınlık veren, kubbe üzerindeki deliklerin bir kısmı harç ile doldurulmuş, bir kısmı ise gelişigüzel camlar ile kapatılmış durumdadır. Kubbelerin iç yüzeyleri ile duvarlarda, buhar ve zaman etkisi ile yoğun yosunlaşma ve kirlenme açıkça gözlemlenmektedir. Soyunma bölümünün kubbe eteğinin yaklaşık olarak 1,5 metre üst kotunda, tüm kubbeyi kateden yatay bir çatlak bulunmaktadır.



Şekil 6. Harç ve bitüm kaplı kubbeler

Kılıç Ali Paşa Hamamı cephesi kaba yonu küfeki taşı ve üç sıra halinde ince tuğla ile ardışık örülmüştür. Yapının duvar örgüsünde kullanılan doğal taş, İstanbul Bakırköy çevresinden çıkarılan, Bakırköy taşı, Maktralı Kireç taşı veya Küfeki taşı diye adlandırılan taştır. Hamamın önündeki dükkânların parapeti ise Malta taşı olarak bilinen sarı renkli, killi kumlu ithal bir taş olup, su emmesi fazladır ve nemli olduğu durumlarda işlenmesi kolaydır. Yapıda kullanılan tuğlalar ise yassı Osmanlı tuğlasıdır. Hatıl ve kemerlerde aynı boyuttaki ince topraktan, iyi sıkıştır-

rılmış ve iyi pişirilmiş tuğlalar kullanılmış olup, kalınlıkları ortalama 35 milimetre, uzunlukları ise 350 milimetredir. Yapının duvarlarında değişik zamanlarda yapılan müdahaleler sonucunda çok katmanlı sıvalar, sıva üzeri mozaik, fayans ve mermer kaplamalar mevcuttur. Mevcut mermer döşeme üzerine ise mermer ve mozaik kaplama yapılmıştır (Şekil 7).



Şekil 7 Mermer döşeme.

Yapısal restorasyon ile hedeflenen ana iş kalemlerini aşağıdaki gibi özetleyebiliriz:

- Cephe duvarlarını örten çimento katkılı tüm sıvaların kaldırılarak yapısal durumunun incelenmesi
- Kubbelerdeki kurşun ve sıvaların kaldırılmasından sonra, soyunma bölümünün üzerini örten kubbedeki çatlağın nedenlerinin araştırılması ve uygun tekniklerle onarılması (Şekil 8)

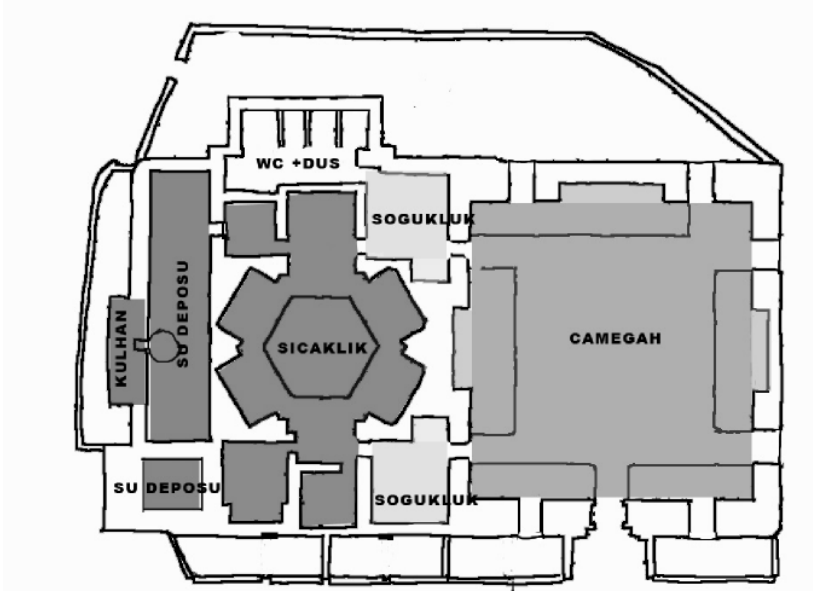


Şekil 8 Soyunmalık kubbesindeki çatlak

- Tüm kubbelerin tekniğine uygun onarımı sonrası kurşun kaplama yapılması.
- Cephelelerdeki bitkisel oluşumun temizlenmesinin ardından atomize su, kâğıt hamuru ve/veya mikro kumlama ile cephe temizliği yapılması.
- Taşların yüzeyindeki bozulma derinliğine bağlı olarak, yerine göre olduğu gibi bırakılması veya plastik onarım yapılması, yerine göre çürütme sonrası kaplama yapılarak onarılması veya mevcut taşın benzer fiziksel, mekanik ve fotografik özellikli taşlarla değiştirilmesi.
- Duvar örgüsünde kullanılan Bakırköy taşının yenilenmesinde, benzer özellikte, dokuda ve jeolojik yaşa sahip İstanbul Sefaköy, Edirne ve Pınarhisar kireç taşlarının kullanılması.
- Yassı Osmanlı tuğlalarının, özel olarak imal ettirilecek aynı ölçülerde tuğlalar kullanılarak onarılması.
- Sağ yan cepheledeki çatlağın mevcut yapı harcı ile benzer özelliklerdeki bir harcın düşük basınç altında enjeksiyon ile onarılması veya çatlak genişletilerek mevcut yapı harcı ile benzer özelliklerdeki harç ve malzemeler kullanılarak onarılması.
- Yapıda kullanılacak sıva ve örgü harçlarının, yerinde alınan numunelerden elde edilecek analizler doğrultusunda doğru oranda söndürülmüş ve dinlendirilmiş kireç hamuruna, doğru oranda puzzolan madde, tuğla tozu ve tuğla kırığı ile yeteri kadar suyu karıştırarak yapıya özgün sıva reçetelerinin hazırlanması.

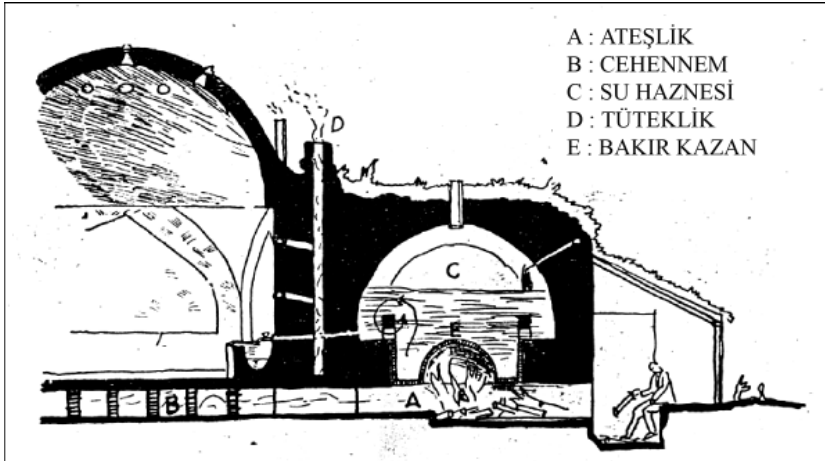
2.2 Mekanik Sistemin Dönüşümü

Geleneksel Türk hamamlarında sıcaklık ve ılıkılık adı verilen mekanlar ıslak ve sıcak mekanlar iken camegah adı verilen soyunma bölümü kuru ve serin bir mekandır. Külhan adı verilen bölümde genellikle odun vb katı yakıt kullanılarak hamamların ve yıkanma suyunun ısıtılması sağlanır. Külhan bölümünün hemen üzerinde bulunan bakır bir kazan ve bu kazanı çevreleyen bir su deposu bulunur.



Şekil 9 Kılıç Ali Paşa Hamamı planı.

2005 senesine kadar uzun bir süre hamam olarak kullanılan Kılıç Ali Paşa Hamamı'nın külhan bölümünde ısıtma için odun kullanılmakta idi (Şekil 9). Sıcaklık ve ılıklik bölümünün altında uzanan cehennemlik adı verilen galeriler vasıtası ile külhanda yanan yakıttan çıkan karbonmonoksit gazının bu kanallarda dolaşması ile hamamın ısıtılması sağlanmaktadır. Dolaşan hava daha sonra duvarlarda gömülü olan tüeklük adı verilen bacalar ile dışarı atılmaktadır (Şekil 10). Hamamın soyunma bölümünün ısıtılması ise sadece kış aylarında ve soba ile yapılmakta idi.



Şekil 10 Külhan Tesisatı. (Aru, 1949)

Kılıç Ali Paşa Hamamı'nda mekanik tesisatın dönüşümü ile ilgili adımlar aşağıda sıralanmıştır:

- Cemeğah bölümünün yerden ısıtma sistemi ile ısıtılması,
- Cemeğah dışında kalan bölümlerde mevcut mermerlerin kaldırılarak, cehennemlik galerilerinin onarılması,
- Günümüz teknolojileri kullanılarak doğal gaz dönüşüm sistemlerinin araştırılarak yapıya adapte edilmesi,
- Külhan bölümünün yeniden yapılandırılarak kullanılması,
- Yapının özgünlüğünü bozmayacak şekilde kapatılan doğal havalandırma kanallarının açılması ve yeni havalandırma tekniklerinin uygunluğunun araştırılması,
- Yıkama suyu olarak depolanan suyun arıtılması ile ilgili sistemlerin araştırılması,
- Temiz hava sirkülasyonun sağlanması amacıyla filgözleri ve havalandırma pencerelerinin ıslah edilmesi,
- Çağdaş havalandırma ve iklimlendirme koşullarının tarihi yapıya zarar vermeden oluşturulması için yeni çözümlerin araştırılması,

2.3 Hamam fonksiyonlarının günümüze yorumlanması

Osmanlı Mimarisinin önemli özelliklerini yansıtan hamamlar, günümüzde fonksiyonel bir gereklilik olmaktan çıkmıştır. Bu değişim, hamamların gelir kaynağının azalmasına veya yok olmasına, yapının mimari özelliklerinin tahribatına, kullanım niteliklerinin değişmesine veya terk edilmelerine neden olmuştur. Geçmiş çok eskilere dayanan, çok çeşitli ve renkli öğeler barındıran hamam kültürünün bir çok unsuru unutulmuş, buna karşın gelişen turizm ile yeni bir boyut kazanmıştır. İstanbul Tophane semtinde, 1580 tarihli, Mimar Sinan'ın imzasını taşıyan Kılıç Ali Paşa Hamamı için yürütülen restorasyon çalışmalarıyla hedeflenen, yapısal restorasyonun beraberinde, kullanım planının ve yıkama kültürünün unutulmuş öğeleri ile modern gereklilik ve yaşayış biçimlerini özümseyerek yeniden yorumlamak, hamamı kültürel bir cazibe merkezine dönüştürerek düzenli bir gelir akışına sahip olmasını sağlamaktır.

Bu amaç doğrultusunda, Kılıç Ali Paşa Hamamı'nın kullanım alan ve amaçlarının yeniden yorumlanması, çağdaş çözüm ve tasarımlar üretilmesi için hedeflenen adımlar

- Detaylı koruma planının oluşturulması
- İşletme planının oluşturulması ve koruma planına uyumunun sağlanması
- 5 Yıllık bakım onarım planlarının oluşturulması ve işletme planında bütçelenmesi

- Yapılacak müşteri akış ve kapasite planına uygun olarak kullanım alanlarının detaylarının planlaması.
- Elektrik, su, doğalgaz ve havalandırma idare merkezinin hamamı çevreleyen bahçe alanında yönetilmesi
- Mimari yapıyı ön plana çıkaran dış ve iç aydınlatma tekniklerinin araştırılması
- Camegah bölümünde soyunma alanlarının azaltılarak; ark, mukarnas, tromp ve kalem işlerini ön plana çıkaracak şekilde yapılandırılması. Bu bölümün ortasında olması gereken, şadırvanın yeniden tasarlanması
- Camegah bölümünün dinleti, konferans, gösterim ve sergi amacıyla da faaliyet gösterebilmesi için soyunmalık ve balkon bölümlerinin modüler, hafif malzemeler kullanılarak tasarım planlarının oluşturulması
- Nalınlık ve sedirlerin ıslahı, dinlenme amacıyla tekrar kullanımı ve düzenlenmesi
- Hamamın cephesindeki dükkanların yeniden düzenlenerek, tarihi dokuyla örtüşmesinin sağlanması. Hamam malzemeleri, kültürel yayınların tanıtımı, teşhiri ve satışı ile berber alanı olarak hizmet etmesi amacıyla planlanması
- Ilıklık alanlarının kurnalarının tanzimi, 16 yy daki kullanım amacına uygun olarak gerekli tasarım ve düzenlemelerin yapılması.
- Uluslararası hijyen ve sağlık standartlarının sağlanması için gerekli düzenlemelerin yapılması
- Hamamı çevreleyen parsellerin tarihi dokuyu zedeleyici kullanımı engellemek için gerekli yasal mercilerle yapılacak görüşmelerin ve yazışmaların planlanması
- İç mimari tasarımların mimari ve tarihi dokuyla örtüşen şekilde planlanması
- Restorasyon sırasında ve sonrasında gerekli bütçe ve nakit akış planlarının yapılması
- Restorasyon esnasında ve sonrasında oluşturulacak kadroların eğitimi oryantasyonu

3. Sonuç

Kılıç Ali Paşa Hamamı, Türk Hamamlarının yüzyıllar boyunca maruz kaldığı yapısal ve kültürel erozyonların gözle görülebildiği, bu yüzyıla kadar ayakta kalmayı başaramamış bir Türk Hamamı örneğidir. Mimari Anıt olarak değerlendirilebilecek bu önemli yapının, yapıldığı amaç doğrultusunda hizmet vermesini sürdürerek, düzenli bir gelir akışına kavuşması, bu güzide eserin ve hamam kültürünün gelecek nesillere ulaşması için ilke edinilmiştir.

Yapısal ve mekanik sistemlerin restorasyonu ile hamam kullanım amaçlarının günümüze uyarlanması için öngörülen planlamalar tamamlanmış, işgücü ve maddi kaynak yaratılmış, yasal mercilerden gelecek onay beklenmektedir.

4. Kaynaklar

Ahunbay, Z. (1996) Tarihi çevre Koruma ve Restorasyon 3. baskı, Yapı Yayın, İstanbul, Türkiye

Aru, K.A. (1941) Türk hamamları Etüdü Doçentlik Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul

Necipoğlu, G. (2005) The Age of Sinan:Architectural Culture in the Ottoman Empire Princteon University Press, USA

