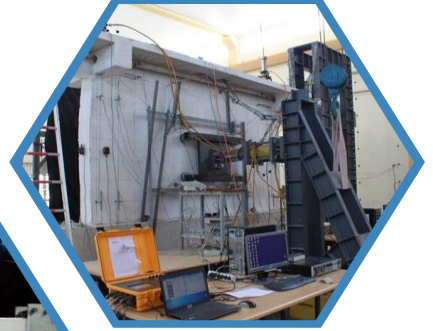
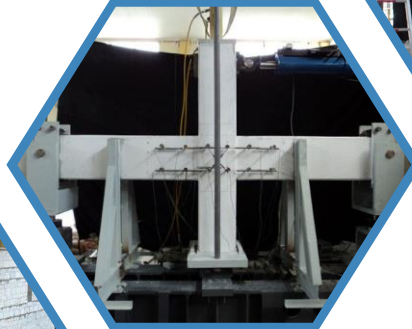




ULUSAL 10. YAPI MEKANİĞİ LABORATUVARLARI ÇALIŞTAYI

Prof. Dr. Tuğrul Tankut Onuruna

BİLDİRİLER KİTABI



8-9 MAYIS
2026

Editörler
Prof. Dr. Sinan ALTIN
Doç. Dr. Sadık Can GİRĞİN

**Dokuz Eylül Üniversitesi
İZMİR**



**ULUSAL
10. YAPI MEKANİĞİ
LABORATUVARLARI
ÇALIŞTAYI**

EDİTÖRLER

**Sinan ALTIN
Sadık Can GİRGIN**

**8-9 MAYIS 2026
DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
İZMİR**

İYİ OLAN HER PROJEDE SİKA ÇÖZÜMLERİ VAR!



Bölge Distribütörü

İZMER
ege
YAPI KİMYASALLARI

BUILDING TRUST





Sika

BUILDING TRUST

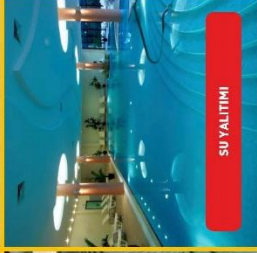


İZMER

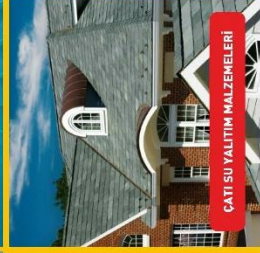
ege



YAPISAL GÜÇLENDİRME ÜRÜNLERİ



SU YALITIMI



ÇATI SU YALITIM MALZEMELERİ



BETON ÜRÜNLERİ



DERZ DOLU VE
YAPILTIYMA ÜRÜNLERİ



BUILDING TRUST



GRÜT VE ANKRAJ ÜRÜNLERİ



TAMİR VE KORUYUCU
KAPLAMA MALZEMELERİ



ENDÜSTRİYEL ZEMİN
KAPLAMA MALZEMELERİ

BÖLGE DİSTRİBÜTÖRÜ

İZMER

ege

YAPI KİMYASALLARI

İZMER EGE YAPI KİMYASALLARI İNŞ. İTH. İHR. SAN. TİC. LTD. ŞTİ.

Mersinli Mah. 2821 Sk. No:İ 88/B Oto Plaza Yenışehir / İZMİR
Tel: 0 232 375 30 00 Fax: 0 232 375 80 10

www.izmerege.com info@izmerege.com

PREKAST YAPILAR İÇİN YAZILIM PROJE İNŞAAT ÇÖZÜMLERİ

FAB2018 + PrecastStructures + PrecastCAD
IFC Viewer + ŞİRKET PRO KURUMSAL ERP

AI DESTEKLİ
UÇTAN UCA
ÇÖZÜM



Statik Hesap
TBDY2018
uyumlu analiz



İmalat Çizimi
Hızlı, standart
detay



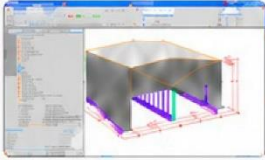
Proje Takip
Revizyon ve
süreç yönetimi



ERP + AI
Finans, stok,
rapor

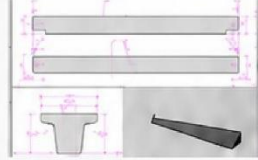
TASARIMDAN YÖNETİME TEK PLATFORM

SAMYAP GLOBAL; prefabrik betonarme yapı üreticileri, proje ofisleri ve mühendislik firmaları için yazılım, mühendislik ve ERP çözümleri sunar. FAB2018, PrecastStructures, PrecastCAD, IFC Viewer ve ŞİRKET PRO KURUMSAL ERP ile tasarım, statik analiz, 3D modelleme, imalat çizimi, proje takibi ve raporlama süreçlerini tek platformda yönetirsiniz.



FAB2018

Prefabrik betonarme binalar için 3D analiz, tasarım ve imalat çizimi.



PrecastCAD

Bağımsız prekast eleman ve temel çizimlerinde hızlı, standart üretim.



ŞİRKET PRO KURUMSAL ERP

Proje, üretim, stok, bütçe, hakediş, sözleşme ve rapor modülleri.



Ardgerme İnşaat

Prekast ve ardgerme süreçlerinde mühendislik, planlama ve teknik destek.



PrecastStructures

Gerçek fizik 3D model yap plan, görünüş, kesit ve eleman imalat çizim programı.



IFC Viewer

IFC dosyalarını tarayıcıda açın, elemanları inceleyin ve modeli 3D olarak görüntüleyin.

SAMYAP GLOBAL

Prekast betonarme yapılar için proje, mühendislik ve yazılım çözümleri

Web: samyap.global | sirketpro.com

E-posta: satis@samyap.global

Telefon: +90 312 803 37 77

Adres: Seğmenler Mah. 984. Sk. Meva Suit B Blok No:21 B/3 Gölbaşı - ANKARA

Demo ve teknik görüşme için
QR kodu okutun.





DEPREM VE MÜHENDİSLİK ADINA **TEK ÇÖZÜM**

Besmak, gelişmiş sarsma masası sistemleri, hidrolik servo aktüatörleri ve test çözümleriyle yapıların dayanıklılığını gerçeğe en yakın şekilde test eder, güvenli yarınlar inşa etmenize yardımcı olur.



HİDROLİK SERVO AKTÜATÖRLER


 **YÜKSEK DİNAMİK
PERFORMANS**


 **DAYANIKLI YAPI**


 **GENİŞ KAPASİTELİ
SEÇENEKLER**

 **KOLAY ENTEGRASYON**

SARSMA MASASI


 **GERÇEĞE EN YAKIN SİMÜLASYON**

 **6 EKSENE KADAR GELİŞTİRİLEBİLİR**

 **GÜVENLİ & DAYANIKLI**

**SERVO HİDROLİK VE
SERVO ELEKTROMEKANİK
ALTYAPI**



 **YÜKSEK KAPASİTELİ
DEPREM İZOLATÖRÜ TEST CİHAZI**



BUILDING TRUST

İZMER
ege
YAPI KİMYASALLARI



SAMYAP

İNŞAAT MÜHENDİSLİK LTD. ŞTİ.

BESMAK
Material Testing Machines

ALFA
PREFABRİK


BATIPREFABRİK


çimentaş
CEMENTIR HOLDING

FİBROBETON


MEGAS

RETRFIT




BATIANADOLU


GKMC
GK Global B.V. - Maeda Corporation
Yenilikçi Güçlendirme Çözümleri

OTS
PROJE MÜŞAVİRLİK

Rijit
YAPISAL ÇELİK

TDG
Deprem ve Yapı Sağlığı
İzleme Sistemleri

tis
Deprem Teknolojileri


YLD yıldırım
'knowledge is the power'

BATIANADOLU


Beto Kont
Yapı Mühendisleri Kulübü Kontrol Laboratuvarı

DERE
BETON


FER AY ANALİZ
Proje - Mühendislik-Kontrol Değerlendirme

GENİSER
YAPI MÜHENDİSLİĞİ OFİSİ

ide**CAD**

İTA MÜHENDİSLİK
VAZİLM
"Structural Solutions"


TUKSAD
TURGUTLU
TUĞLA VE KİREMIT
SANAYİCİLERİ BİRLİĞİ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	xi
KURULLAR.....	xv
TOPLANTIYA KATILAN ÜNİVERSİTELER	xvi
TOPLANTIYA KATILAN DİĞER KURUMLAR	xvii
PROF.DR. TUĞRUL TANKUT'UN KURDUĞU GAZİ ÜNİVERSİTESİ MÜH. FAK. YAPI MEKANİĞİ LABORATUVARININ DÜNÜ VE BUGÜNÜ Bengi AYKAÇ	1
LİF KATKILI BETONARME PANELLERİN PATLAMA YÜKÜ ALTINDA YAPISAL DAVRANIŞLARI Selçuk SAATCI, Mohammed Jalal ALKABBANI, Tahir Kemal ERDEM.....	6
MEVCUT RÜZGAR TÜRBİNLERİ KULE-TEMEL BAĞLANTISI İÇİN GÜÇLENDİRME YÖNTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ Mert GENÇ, Ayhan NUHOĞLU	12
İKİ KATLI HAFİF ÇELİK DUVARLARIN YATAY YÜK DAVRANIŞI Eray BARAN, Cem TOPKAYA, Barış Mert PEHLİVAN.....	18
DEPREM ETKİSİ ALTINDA BETONARME MERDİVEN SİSTEMLERİNDE HASARIN ÖNLENMESİNE YÖNELİK DENEYSEL ARAŞTIRMA GEREKSİNİMİ Murat BİKÇE, Engin EMSEN, M. Musab ERDEM	24
KİŞİN BETONARME PLAK İMALATINDA KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON KULLANIMINA İLİŞKİN DENEYSEL BİR İRDELEME Sefa TALAY, Ahmet Ferhat BİNGÖL, Dilek OKUYUCU, Muhammet ŞAHİN, Burak GEDİK.....	30
HAFİF ÇELİK DUVAR PANELLERİNİN BETONARME ÇERÇEVELERİN DAVRANIŞLARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ Hussien Alkasim SOALIH, Fatih CEBİR, Serhat DEMİR, Metin HÜSEM, Ramazan LİVAOĞLU.....	36
DEĞİŞTİRİLEBİLİR KURU BİRLEŞİMLİ PREKAST BETONARME ÇERÇEVENİN DEPREM DAVRANIŞI Hasan ÖZKAYNAK, Cihan SOYDAN, Melih SÜRMELE, Ercan YÜKSEL	42
LP SARGILI SIVALI KOLONLARIN DÜŞEY VE YATAY YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞI Ali Gürkan GENÇ, Medine İspir ARSLAN, Alper İLKİ.....	50
DOĞRUSAL ÇALIŞMAYAN YENİLİKÇİ BİR VİSKOZ DEPREM SÖNÜMLEYİCİSİNİN ÜRETİLMESİ VE ÖN TESTLERİ İbrahim Utku DEMİRBAŞ, Eray ÖZBEK, Sabahattin AYKAÇ.....	58

NEODİMYUM MIKNATISLI PASİF BİR DAMPERİN TASARIMI VE DENEYSEL DEĞERLENDİRME YAKLAŞIMI Gazi ÇİÇEK, Osman KAYA.....	64
MERKEZİ ÇAPRAZLI ÇERÇEVELER İÇİN KAYNAKLI BİRLEŞİMLİ EĞİLME LEVHALI SÖNÜMLEYİCİLERİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ Süleyman Eren DURSUN, Cem TOPKAYA, Mehmet Bakır BOZKURT	70
BURKULMASI ÖNLENMİŞ ÇAPRAZLARIN DEPREM YÜKLERİ ALTINDAKİ SİSMİK PERFORMANSLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ Fatma Esra UZ, Barış SERİN, Mehmet Bakır BOZKURT.....	76
PARAMETRİK YAPI ARAŞTIRMALARINDA CCD-RSM TABANLI SAYISAL DENEY PLANLAMASI Erkan POLAT, Elifcan GÖÇMEN POLAT.....	82
DONATILI BETON NUMUNELERİN ADERANS TESPİTİ İÇİN PUSH-OUT DENEY DÜZENEGİ Orhan DOĞAN, Melek AKGÜL.....	89
LİFLİ BETONLARIN KARIŞIK MOD (MOD-I-II GEÇİŞİ) KIRILMASINDA BETON DAVRANIŞININ STATİK VE DİNAMİK YÜKLEME ALTINDA İNCELENMESİ A. Samet ARSLAN, Hüseyin KALKAN, Çağatay M. BELGİN, Yousra A. M. MUSTAFA, Yousef M. F. ALWINDAWI.....	95
KOROZYONA MARUZ BIRAKILMIŞ HİBRİT FRP-ÇELİK DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞI Hayrettin KARACA, Saruhan KARTAL, Handan ADIBELLİ, İlker KALKAN.....	101
KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ EPOKSİNİN DENİZ SUYUNA MARUZ GFRP SARGILI BETONUN DAVRANIŞINA ETKİSİ Ahmed Adan MOHAMUD, Emre AKIN, Alper GÜNÖZ.....	109
YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİM ÇALIŞMALARINI İÇİN TASARLANAN LAMİNER ZEMİN TANKININ SARSMA MASASI DENEYİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ Esin ERTÜRK ATMACA, Berk DİKMENOĞLU, Burak AKÇAY, Muhammet Cihat ŞAHİN, Fezayil SUNCA, Fatih Yesevi OKUR, Murat GÜNAYDIN, Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU, Esra Ece ESELLER-BAYAT, Kemal Önder ÇETİN, Ertuğrul TACIROĞLU, Osman SİVRİKAYA, Ahmet Can ALTUNIŞIK.....	115
HAFİF ÇELİK PANELLERDE ANKRAJIN YÜK TAŞIMA KAPASİTESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ Nefya SOYSAL, Zeynep FIRAT ALEMDAR, Sena KAPICIOĞLU, Houssein ALEİT, Fatih ALEMDAR	122
İZMİR'DE ÇOKLU AFET RİSKLERİNİN AZALTILMASI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA VİZYONU Uğur DEMİR, Nefise AKDAĞ, Yavuz Selim KARAVİN.....	128

DOĞAL LİF TAKVİYELİ KOMPOZİT ŞERİTLERLE BETONARME KİRİŞLERİN KESME DAYANIMININ ARTIRILMASI Hasan Murat TANARSLAN, Cihan KARADEMİR, Hasan ATEŞ, Mustafa Furkan GÜLER, Çağlar YALÇINKAYA, Mehmet KORKMAZ, Faruk OGÜN	134
AHŞAP KİRİŞLERİN CFRP ŞERİTLERLE GÜÇLENDİRİLMESİ Şule BAKIRCI ER, İlker ELMAS, Aytuğ Talha YILDIZ.....	140
GÜÇLENDİRMEDE KULLANILAN ON ADET CFRP DOKUMANIN DENEYSEL DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ Servet DEMİRDAĞ, Murat BİKÇE.....	145
AHŞAP-ÇELİK HİBRİT KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞI Ömer ALDEMİR, Sabahattin AYKAÇ.....	151
BETONARME ÇERÇEVELERDE ORTA KOLON KALDIRILMASI SENARYOSU ALTINDA AŞAMALI GÖÇME DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ Bedirhan KEÇECİ, Fezayil SUNCA, Muhammed Cihat ŞAHİN, Omair MOHİELDİN, Adem DOĞANGÜN, Ahmet Can ALTUNIŞIK.....	157
BETONARME KİRİŞLERDE BURULMA DENEYLERİ İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ YÜKLEME DÜZENİĞİ O. Kağan KESKİN, Mehmet KAMANLI, Abdulkadir SOLAK, Salih CENGİZ, Alptuğ ÜNAL.....	163
İÇTEN BAĞLI ADERANSSIZ ARDGERMELİ ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETON KİRİŞLERİN TEK YÖNLÜ KESME DAVRANIŞI Tosif GHAZİ, Furkan ÇAKMAK.....	170
KÖPRÜ ÜSTYAPI KİRİŞLERİNİN ENİNE DOĞRULTUDAKİ ÇEVİRİMSSEL DAVRANIŞI VE GÜÇLENDİRME ÖNERİLERİ Serenay ATEŞ, Onur TUNABOYU, Özgür AVŞAR.....	177
BETONARME KİRİŞLERİN GÜÇLENDİRİLMESİNDE YENİ BİR YÖNTEM OLARAK 3B YAZDIRILMIŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN UYGULANMASI Mustafa Furkan GÜLER, Hasan Murat TANARSLAN, Çağlar YALÇINKAYA, Ali MARDANI.....	183
TARİHİ YIĞMA MİNARELERDE DENETİMSİZ HASAR TESPİTİ İÇİN ÇOK KAMERALI BİR YAKLAŞIM Cemile DUMAN, Kemal HACİFENDİOĞLU, Tunahan ASLAN, Tekin GÜLTOP.....	189
BOŞLUK GEOMETRİSİ OPTİMİZASYONU İLE YAPISAL PERFORMANSI ARTIRILMIŞ YENİ BİR YIĞMA YAPI TUĞLASI: TASARIM, ÜRETİM VE PLANLANAN DENEYLER Alper ÇELİK, Ömer MERCİMEK.....	195
KAPI VE PENCERE BOŞLUĞU İÇEREN KAYAR DOLGU DUVAR SİSTEMLERİ İÇİN SİSMİK OLARAK GÜVENLİ DETAYLANDIRMANIN GELİŞTİRİLMESİ İbrahim Serkan MISIR, Ali Cihan DEMİR, Çağrı ÇETİK, Sadık Can GİRGIN.....	201

EKSENEL YÜK VE BURULMANIN BETONARME KOLONLARIN EĞİLME DAVRANIŞINA ETKİSİ Salih CENGİZ, Mehmet KAMANLI, Alptuğ ÜNAL, Abdulkadir SOLAK.....	207
SÜRTÜNME Lİ SARKAÇ TİPİ İZOLATÖRLERDE DEPLASMAN KAPASİTESİNİN AŞILMASI DURUMUNUN İNCELENMESİ Ahmet VARIŞLI, Gökhan ÖZDEMİR.....	214
BİÇAK PLAKALI BİRLEŞİMLERDE FARKLI PARAMETRELERİN YORULMA PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ Elif AYDIN, Fatih ALEMDAR.....	220
İNCE CİDARLI ÇELİK LEVHA-BULON BAĞLANTILARINDA ÖN GERİLMENİN ÇEKME VE KAYMA HASARI ÜZERİNE ETKİSİ Mert ÜSTÜN, Orhan Gazi ODACIOĞLU, Orhan DOĞAN.....	225
PREKAST BETONARME SANAYİ YAPILARININ ENERJİ SÖNÜMLEYİCİLERLE GÜÇLENDİRİLMESİ Ahmet GÜLLÜ, Furkan ÇALIM, Cihan SOYDAN, Hasan ÖZKAYNAK, Ercan YÜKSEL.....	231
ŞAFT BOŞLUĞU OLAN-OLMAYAN HASARLI-HASARSIZ KİRİŞSİZ PLAK DÖŞEMELERİN EQM-PUNCH KAMALARI İLE ZİMBALAMAYA KARŞI GÜÇLENDİRİLMESİ Kerem ÇAVUR, Erkan AKPINAR, Onur ERTAŞ, Şevket ÖZDEN.....	235
ÖNGERİLME MİKTARININ KURŞUN EKSTRÜZYON SÖNÜMLEYİCİ DAVRANIŞINA ETKİSİ Furkan ÇALIM, Cihan SOYDAN, Ahmet GÜLLÜ, Ercan YÜKSEL.....	239
BURKULMASI ÖNLENMİŞ ÇAPRAZLARIN SABİT GENLİKLİ DÜŞÜK ÇEVİRİMSSEL YORULMA PERFORMANSLARI Selin TAŞKIN ERKARSLAN, Barış SERİN, Mehmet Bakır BOZKURT.....	245
TARİHİ TAŞ YIĞMA DUVARLARIN DÜZLEM DİŞİ DEPREM DAVRANIŞININ İYİLEŞTİRİLMESİ: LABORATUVAR TESTLERİ VE YAPI ÖRNEĞİ ÜZERİNDE DEĞERLENDİRME İbrahim Serkan MISIR, Gökhan YÜCEL, Fikret KURAN, Cansu Beril ESER, Ali Cihan DEMİR.....	250
YAPISAL DİNAMİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİNDE VİDEO ÇÖZÜMLEME YÖNTEMİ UYGULAMALARI Furkan ÇALIM, Emre GÖNÜLCÜ, Mehmet Ali TOPRAK, Ercan YÜKSEL.....	256
YAPISAL DENEYLER İÇİN KAPALI ÇEVİRİM HİDROLİK AKTÜATÖR SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ Hüseyin ÇİLSALAR, Oğuz DÜĞENCİ.....	262
DEPREM SONRASI BETONARME BİNALARDA ONARIM VE GÜÇLENDİRMEDE SIK GÖRÜLEN HATALAR: SAHA BULGULARI Gökhan FIRINCIOĞULLARI, Murat BİKÇE.....	268

ÖNSÖZ

Ülkemizde yapı mekaniği alanında yürütülen deneysel çalışmalar, teorik bilginin doğrulanması, geliştirilmesi ve uygulamaya aktarılması açısından hayati bir öneme sahiptir. Deprem etkisi altındaki yapı sistemlerinin doğrusal olmayan davranışları yalnızca hesaplamalı modellerle tam anlamıyla temsil edilemediğinden, deneysel çalışmalara duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Deneysel çalışmalar, yeni tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesine ve güvenli yapıların inşa edilmesine önemli katkılar sunmaktadır.

Ulusal Yapı Mekaniği Laboratuvarları Çalıştayları, 2001 yılından bu yana ülkemizde bu alanda çalışan araştırmacıları bir araya getiren; bilgi ve deneyim paylaşımını teşvik eden; ortak bir araştırma kültürünün oluşmasına katkı sağlayan ve özellikle genç araştırmacılara yol gösteren önemli bir platform haline gelmiştir. Yıllar içinde artan katılım ve çeşitlenen araştırma konuları ile sürekli gelişim gösteren bu çalıştaylar, üniversitelerimizde yürütülen deneysel araştırmaların niteliğinin yükseltilmesine kayda değer katkılar sağlamıştır.

Farklı üniversitelerde düzenlenen önceki toplantılar, araştırmacılar arasında güçlü bir iş birliği ağının oluşmasına imkân tanımış; deneysel çalışmaların planlanması, yürütülmesi ve değerlendirilmesine ilişkin kritik bilgilerin paylaşılması için verimli bir zemin oluşturmuştur. Bu süreçte elde edilen kazanımlar, ülkemizde yapı mekaniği alanında deneysel araştırma kültürünün yerleşmesine ve yaygınlaşmasına önemli ölçüde katkı sağlamıştır.

Ulusal Yapı Mekaniği Laboratuvarları Çalıştayları, bu birikim üzerine inşa edilerek araştırmacılar arasındaki etkileşimi daha da güçlendirmeyi, disiplinlerarası çalışmaları teşvik etmeyi ve yeni araştırma alanlarına yönelik farkındalığı artırmayı amaçlamaktadır. Çalıştay kapsamında gerçekleştirilecek sunum ve tartışmaların; yapı mekaniği alanındaki güncel gelişmelerin değerlendirilmesine, yeni araştırma konularının ortaya konmasına ve gelecekteki ortak projelerin şekillenmesine katkı sağlayacağına inanıyoruz.

Çalıştayın gerçekleştirilmesine verdikleri desteklerden dolayı Dokuz Eylül Üniversitesi Rektörü Sayın Prof. Dr. Bayram YILMAZ'a teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca çalıştayın düzenlenmesine katkı sağlayan sponsorlarımıza da içten teşekkür ederiz.

Doç. Dr. Sadık Can GİRGİN
Yerel Yürütme Kurulu Adına

YOL ARKADAŞIM TUĞRUL TANKUT

Uğur Ersoy

Tuğrul Tankut'u altmışlı yılların başında öğrencim olarak tanıdım. O yıllarda ODTÜ barakalardan oluşan bir yerleşkede eğitim veriyordu. Profesör ve doçent sayısı yok denecek kadar azdı. Öğretim üyelerinin yaş ortalaması 35 dolaylarındaydı.

Tuğrul iyi bir öğrenciydi. İdealistti ve çalışkandı. Genç öğretim üyelerini dikkatle dinler, sürekli sorular sorardı. Ben onun kadar soru soran bir öğrenciye rastlamadım! Bu sorgulama, kafasındaki soru çözümleninceye kadar devam ederdi. Uzun öğretim hayatımda Tuğrul kadar soru sorana rastlamadım.

Yepyeni bir anlayışla oluşturulan laboratuvar da deneysel araştırmalara başlanacaktı. Betonarmede taşıma gücü, ülkemiz koşullarına göre şekillendirilecek ve bu şehir şehir gezilerek öğrenci ve mühendislerle tanıtılacaktı. Betonarme, taşıma gücü esas alınarak yeniden kaleme alınacaktı. Tüm bu hedefler betonarme çalışmalarında bir devrim olarak tanımlanabilir. Bu hedefler ancak bir takım çalışması ile gerçekleştirilebilirdi. Bu takım için ilk akla gelen isim Tuğrul oldu ve hedeflere varıldı.

Yirminci yüzyılın sonlarında yapıların onarımı ve güçlendirilmesi ile ilgili uygulama ve araştırmalar ön plana çıkmaya başlamıştı. Başlangıçta, Türkiye de öncü ülkelerden biri olmuştu. Bu aşamada Tuğrul Tankut'un katkıları büyük oldu.

Deneysel araştırmada hatalar affedilemez. Deneyin herhangi bir aşamasında yapılan hata büyük felaketlere neden olabilir. Dr. Tankut'un onarım-güçlendirme projelerinde en büyük katkısı detaylarda olmuştur. O, en ufak detayları bile gözden kaçırmamıştır. Tuğrul'un titiz çalışmaları sayesinde deneylerde hata oranları en alt düzeye indirilebilmiştir.

Tuğrul Tankut yıllar önce ODTÜ'de yeni bir ders açtı: "Laboratuvar ve Ölçüm Teknikleri". Deneysel araştırmalara yeni başlayan bir ülke için büyük önem taşıyordu bu ders. Böyle bir dersi ancak o verebilirdi...

Sorunlu bir yapıya çözüm ararken, laboratuvar da yepyeni ufuklara yelken açarken Tuğrul ile bir projede birlikte çalışmanın keyfini çok özlüyorum.

Tuğrul'a güzel yeni ufuklar, sağlık ve mutluluklar dilerim.

6 Mart 2026

Prof. Dr. Uğur ERSOY

YAPI MEKANİĞİNDE DENEYSEL ARAŞTIRMA

Tuğrul Tankut
ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü

GİRİŞ

İlk Yapı Mekaniği Laboratuvarları Toplantısı doksanlı yıllarda, TÜBİTAK'ta yönetici olduğum sırada gerçekleştirildi, yapı mekaniği alanında deneysel araştırmayı teşvik ve yaygınlaştırma amacıyla. İzleyen yıllarda tekrarlandı, giderek bir düzene oturdu, zamanla belli bir format gelişti. Bugün iki yılda bir gerçekleştirilen, düzenli bir akademik etkinlik olarak sürdürülüyor. Bu minik notun amacı, bu çalışmanın temel ilkelerini, gelişimini, ve etkilerini kısaca gözden geçirmektir.

Son çalıştayda daha önce yapılmamış bir uygulama gerçekleştirildi. O çalıştay, bu dizinin başlatılmasına ve geliştirilmesine büyük bir katkı yapmış olan Prof. Dr. Uğur Ersoy onuruna düzenlendi, galiba benim önerimle. Öğrendim ki, Düzenleme Kurulu 10. Çalıştayı da benim adımla anmaya karar vermiş. Alçak gönüllü olmayı bir yana bırakacağım izninizle, yarım yüzyılı aşan akademik hayatının tamamını Yapı Mekaniği Laboratuvarında deneysel araştırmayla uğraşarak geçirmiş bir hoca olarak, bundan onur duyduğumu itiraf etmeliyim. Sevincimin yanı sıra duyduğum bir kaygıyı da Düzenleme Kurulu'na ilettim, umarım dikkate alırlar.

GELİŞMELER

Türkiye'de Yirminci Yüzyıl ortalarına kadar yapı mekaniği konularında deneysel araştırma kavramı gelişmemişti, tüm uygulama ve araştırma çalışmalarında elastisite teorisi uygulanır ve ona güvenilirirdi. Deneysel araştırmanın önemi yüzyılın ikinci yarısında fark edildi ve bu doğrultuda çabalar başlatıldı. Yüzyılın üçüncü çeyreği içinde bir-iki üniversitede laboratuvar kuruldu ve deneysel araştırma başlatıldı; diğerlerinde ise bir heves, bir laboratuvar sahibi olma isteği uyandı. Ancak, henüz sağlam bir araştırma kültürü oluşmadığından, ne laboratuvarlar bilinçli bir biçimde kurulabildi, ne araştırmalar bilinçli biçimde planlanabildi. Örneğin, "İngiliz Kredisi" programı çerçevesinde, birçok üniversiteye "scientific instrument" adı altında tonlarla profil demiri satılmasını unutamıyorum.

YÖK sisteminin o yıllarda başlattığı yayın yapma zorunluluğu, yeni kurulan üniversitelerde laboratuvar sahibi olma isteğini kamçıladi. Sanıldı ki, adamın elinin altında gelişmiş araç-gereç olursa, araştırmalar ve yayınlar kolayca, hatta kendiliğinden peş peşe geliverecek. Öyle olmadı tabii, ama içeriği, niteliği, özellikle bilimselliği tartışılabilir düzeyde yayınlar üreilmeye başlandı. Bu seviyenin yükseltilmesine katkısı olabilir düşüncesiyle, üniversiteler arasında etkileşim sağlamak amacıyla, TÜBİTAK'tan alınan bir destek ile Ankara'da bir Yapı

Mekaniği Laboratuvarları Toplantısı gerçekleştirildi. İlk toplantının yararlı olduğu görüldüğünden, katılımcı üniversitelerden birinin ev sahipliğinde, önceleri düzensiz aralıklarla yapılan birkaç toplantıdan sonra, belli bir formata oturan toplantılar, iki yılda bir dönüşümlü olarak düzenlenmeye başladı. Son yıllarda “Yapı Mekaniği Laboratuvarları Çalıştayı” adı altında sürdürülüyor. Aradan geçen çeyrek yüzyılda araştırmaların bilimsel niteliğinin önemli oranda yükseldiği görülmektedir. Bu iyileşmede pek çok faktörün katkısı olduğu kuşkusuzdur. Ancak, bu toplantıların da araştırmalarda görülen nitelik iyileşmesine olumlu katkılar yaptığını söylemek sanırım yanlış olmaz. Özetle, amacına ulaştığı görülen bu toplantıların sürdürülmesi kuşkusuz yararlı olacaktır.

GELECEĞE DAİR DÜŞÜNCELER

Teknolojideki, özellikle yapay zekâdaki hızlı gelişme sonucunda, tüm meslekler gibi, inşaat mühendisliğinin de özellikle uygulamalar bakımından, yakın gelecekte büyük değişikliklere uğraması kaçınılmaz görünmektedir. Beklenen bu gelişmeler “Yapı Mekaniği Laboratuvarları Çalıştaylarının anlam ve önemini azaltabilir mi?” sorusunu akla getirebilir. Uzun vadeli gelişmeler düşünülürse bu kaygı yerinde olabilir. Ancak, yapay zekâ etkisiyle, mühendisin uygulamaya yaptığı katkı önemini yitirirken, araştırmanın, özellikle deneysel araştırmanın uzunca bir süre daha önem taşıması beklenir. Bu nedenle, tümüyle deneysel araştırmalarla ilgili olan bu toplantıların yararlı ve gerekli olacağı söylenebilir.

Kısacası, giderek daha düzenli, daha başarılı, daha etkili, daha düzeyli olduğu görülen Yapı Mekaniği Laboratuvarları Çalıştayları uzunca bir süre daha sürdürülmelidir.

Bu çalıştayların düzenlenmesini yıllardır başarıyla gerçekleştiren ve önümüzdeki yıllarda da gerçekleştireceğini umduğum Yürütme Kurulunu yürekten kutlar, kendilerine teşekkür ederim.

Ankara, 12 Temmuz 2025
Prof. Dr. Tuğrul TANKUT

Yürütme Kurulu

Sinan ALTIN,
Alper İLKİ
Erdem CANBAY
Yaşar KALTAKÇI
Kutay ORAKÇAL
Şevket ÖZDEN

Prof. Dr.,
Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr.,
Prof. Dr., Boğaziçi Üniversitesi
Prof. Dr., Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi

Yerel Yürütme Kurulu

Sadık Can GİRGİN,
İbrahim Serkan MISIR
Mehmet Bakır BOZKURT
Çağlar YALÇINKAYA
Onur ÖZTÜRKOĞLU
Çağrı ÇETİK
Atakan Emin AKSOY

Doç. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi
Doç. Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Doç. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi, Dokuz Eylül Üniversitesi
Araş. Gör., Dokuz Eylül Üniversitesi
Araş. Gör., Dokuz Eylül Üniversitesi

İletişim

Yürütme Kurulu Adına

Prof. Dr. Sinan ALTIN
e-posta: ymlcinfo26@gmail.com

Yerel Yürütme Kurulu Adına

Doç. Dr. Sadık Can GİRGİN
Dokuz Eylül Üniversitesi Müh. Fak. İnş. Müh. Bölümü
e-posta: sadik.girgin@deu.edu.tr
Tel: +90 505 480 03 07

Toplantıya Katılan Üniversiteler

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
ANKARA ÜNİVERSİTESİ
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
ARTVİN ÇORUH ÜNİVERSİTESİ
AYDIN ADNAN MENDERES ÜNİVERSİTESİ
BOĞAZIÇI ÜNİVERSİTESİ
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
EGE ÜNİVERSİTESİ
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
ESKİŞEHİR TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
İSTANBUL BEYKENT ÜNİVERSİTESİ
İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
İZMİR YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
İZMİR EKONOMİ ÜNİVERSİTESİ
İZMİR KONAK MESLEK YÜKSEKOKULU
KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
MUĞLA SITKI KOÇMAN ÜNİVERSİTESİ
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ
MERSİN ÜNİVERSİTESİ
ORTA DOĞU TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
OSMANİYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
UNIVERSITY OF CALIFORNIA, LOS ANGELES
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

Toplantıya Katılan Diğer Kurumlar

GENOSER YAPI MÜHENDİSLİĞİ OFİSİ
ORMAN GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
OTS PROJE MÜŞAVİRLİK
PROMER MÜŞAVİRLİK MÜHENDİSLİK
TİS DEPREM TEKNOLOJİLERİ

PROF.DR. TUĞRUL TANKUT'UN KURDUĞU GAZİ ÜNİVERSİTESİ MÜH. FAK. YAPI MEKANİĞİ LABORATUVARININ DÜNÜ VE BUGÜNÜ

THE PAST AND PRESENT OF THE STRUCTURAL MECHANICS LABORATORY AT THE FACULTY OF ENGINEERING, GAZİ UNIVERSITY, FOUNDED BY PROF. DR. TUĞRUL TANKUT

Bengi AYKAÇ¹

ÖZET

Bu bildiriye değerli hocamız Prof. Dr. Tuğrul Tankut'un Gazi Üniversitesi Müh. Fakültesinde kurmuş olduğu yapı mekaniği laboratuvarının başlangıçtan günümüze kadar olan gelişimi ve hocamızın önderliğinde yetişen araştırmacıların çalışmalarından bahsedilecektir.

Anahtar Kelimeler: Yapı Mekaniği Laboratuvarı

ABSTRACT

This paper will discuss the development of the structural mechanics laboratory established by our esteemed professor, Prof. Dr. Tuğrul Tankut, at the Faculty of Engineering at Gazi University, from its inception to the present day, as well as the research conducted by the scholars trained under his guidance.

Keywords: Structural Mechanics Laboratory

GİRİŞ

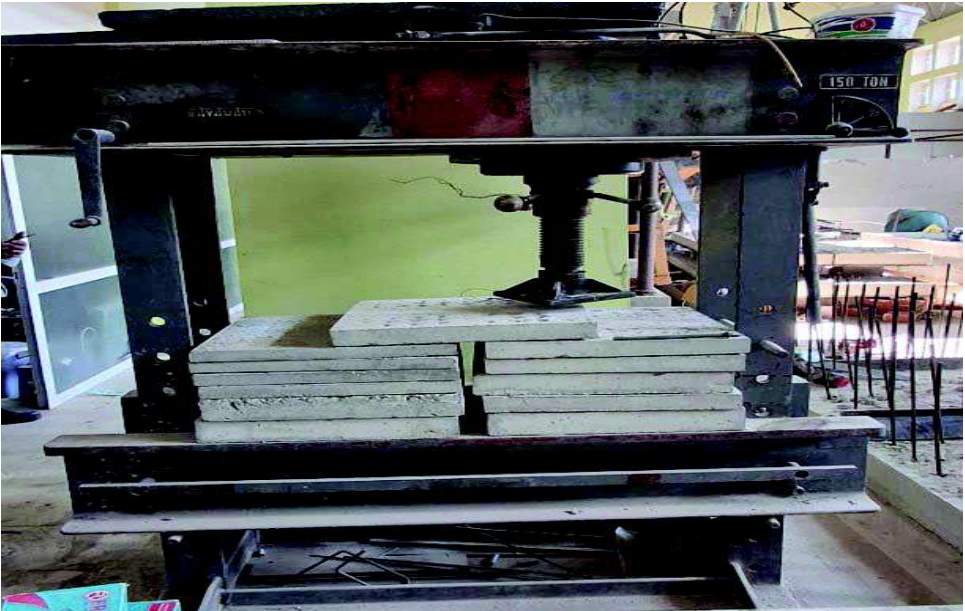
Aslında hikayemiz Prof. Dr. Tuğrul Tankut hocamızın rotasyon sonucu, 1980 li yılların ortalarında ODTÜ' den Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne gelmesiyle başlamıştır. Hocamız üniversitemizde betonarme derslerini verirken, bu alanda ciddi bir laboratuvar eksiği olan bölümümüze nasıl laboratuvar kurup, akademik hayata katkı sağlanabileceği sorusuna cevap aramıştır. Bu arayışlar sürerken, fakültenin hurdalarının arasında 150 tonluk kapalı çelik çerçevenin (Şekil 1.) atıldığını fark ederek, arızalı çerçeveyi, başlangıçta sadece boş bir salon olan (içerisinde hiçbir teknik cihazın bulunmadığı) yapı mekaniği laboratuvarımıza getirtmiştir. Ufak tefek revizyonlar yaptırarak, çerçeveyi kullanılabilir hale getirerek, (1980'lerin sonlarında) laboratuvardaki ilk deneysel çalışmalardan bazılarını bu çerçeve içerisinde yaptırmıştır. Ne yazık ki o tarihte, laboratuvar hâlâ yapılması planlanan deneysel çalışmaları yapma kapasitesinde değildir ve pek çok eksiği vardır. Bu nedenle, hocamız bir deney platformu tasarlanmış, eksik ekipmanları da ödünç alarak, yapmayı hedeflediği deneysel çalışmaların çoğunu bu platformda gerçekleştirmiştir. Zaman ilerledikçe, TÜBİTAK destekli pek çok proje alınarak hem ekipmanların sayısı hem de kalitesi artırılmıştır. Bu esnada ve sonrasında laboratuvarımızda pek çok genç araştırmacı farklı konularda çok sayıda deneysel çalışma yapmıştır. O tarihlerde hocamızla çalışan genç araştırmacıların bazıları hem yüksek lisans hem de doktora çalışmalarını tamamlayarak, daha sonraki tarihlerde üniversitemizde öğretim üyesi olarak görev yapmaya başlamışlardır. Kıymetli hocamızın kendi üniversitesine (ODTÜ'ye) dönmesinin ardından, geride kalan öğretim elemanları, hocamızın

¹ Prof. Dr., Gazi Üniversitesi Müh. Fak, Ankara, baykac@gazi.edu.tr

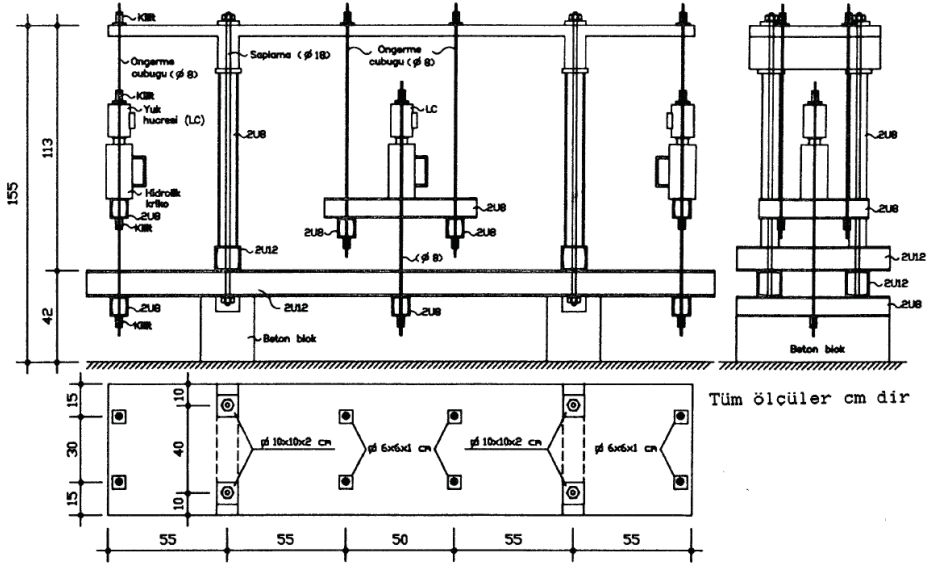
kendilerine açtığı yolu takip ederek, deneysel çalışmalara devam etmiş ve laboratuvarın gelişmesi için ellerinden geleni en iyi şekilde yapmaya çalışmışlardır.

1.Laboratuvarın Kuruluşu

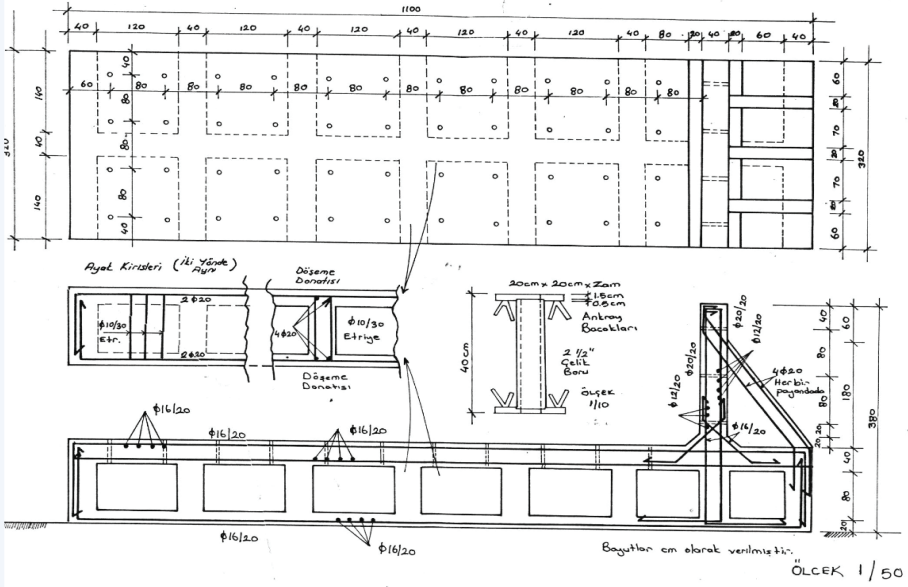
Daha önce de bahsedildiği üzere 80'li yılların sonlarında kurulmaya başlanan Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Mekaniği laboratuvarında, hurdalıktan bulunan kapalı bir çelik çerçeve ile kirişler üzerine (sadece monotonik yükler altında) kısıtlı çalışmalar yapılmıştır. Daha sonra aynı laboratuvar da Prof. Dr. Tuğrul TANKUT'un danışmanlığında betonarme döşemeler üzerine bir başka deneysel çalışma yapılmış [Aykaç S. (1993)] ve bu çalışmaya da özel bir yükleme sistemi oluşturulmuştur (Şekil 2.). Bu çalışmadan sonra her deneysel çalışma için yeni bir yükleme sistemi oluşturmak yerine, tüm çalışmaların tek bir sistemde yapılabileceği bir yükleme sisteminin oluşturulması fikri ağırlık kazanmıştır. Bu amaçla tüm deneysel çalışmaların üzerinde yapılabileceği güçlü bir duvar ve döşeme sistemine ihtiyaç duyulmuştur. Hocamız bu kez de laboratuvarımız için güçlü betonarme bir duvar ve döşemeden oluşan bir deney platformu (Şekil 3.) tasarlamışsa da eldeki imkânların yetersizliği yüzünden bu platform da bire bir aynen yapılamamıştır. Aynıysa olmasa da, 1991 yılında tasarlanandan 2 göz eksik bir platform yapılabilmıştır. Bu hali ile bile oluşturulan duvar-döşeme sistemi laboratuvarımız için büyük bir kazanım olmuştur. Aynı tarihlerde, eldeki imkânlar zorlanarak, 2 adet (100 tonluk ve 30 tonluk) loadcell ve birkaç tane de komparatör saati alınarak, laboratuvardaki ekipmanların sayısı da artırılmaya başlanmıştır. Bu platformun üzerinde yapılan ilk deneysel çalışma İsmail Özdemir'in yüksek lisans tezi [Özdemir İ. (199)] olmuştur (Şekil 4.). Bu çalışmada kullanılan ekipmanların çoğu ODTÜ'den ödünç alınırken, kısıtlı imkânlarla da olsa çok güzel bir çalışma ortaya konulmuştur. Bir süre sonra hocamızın bölümümüzdeki görev süresi sona ermiş ve kendi üniversitesine dönmüştür. Buna rağmen, Gazi Üniversitesi Müh. Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümünde yetişmekte olan 3 genç akademisyenin danışmanlıklarına devam edip, onların yüksek lisans ve doktora çalışmalarını (Şekil 5.) tamamlattırıştır. Bu akademisyenlerin ikisinin doktora çalışması (Tablo 1.) TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Desteklenen bu çalışmalarla, laboratuvar da acil ihtiyaç duyulan pek çok ekipman alınarak hem dışa bağımlılık azalmaya başlamış hem de laboratuvar değerli araştırmaların yapılmaya başlandığı bir çalışma ortamı olmaya başlamıştır.



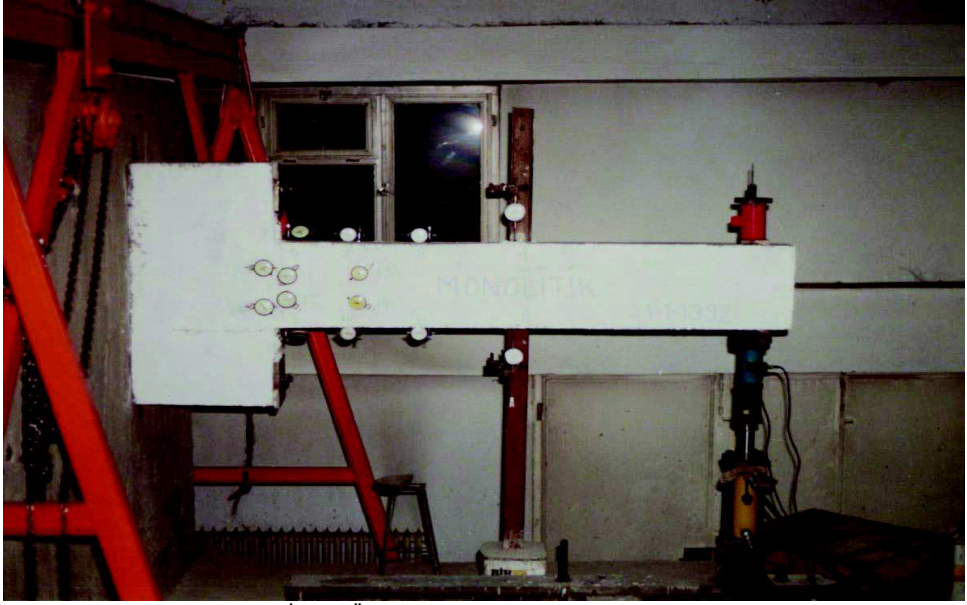
Şekil 1. 150 ton kapasiteli kapalı çerçeve



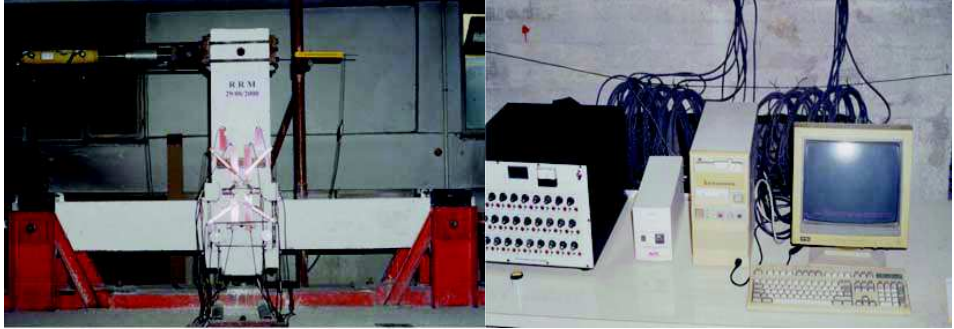
Şekil 2. Sabahattin Aykaç'ın yüksek lisans tezi yükleme düzeni



Şekil 3. Tasarlanan Deney Platformu



Şekil 4. İsmail Özdemir'in yüksek lisans tezi deney elemanı



Şekil 5. Sabahattin Aykaç'ın doktora tezi deney elemanı ve kullanılan ölçüm cihazları

2.Yönetilen Tezler

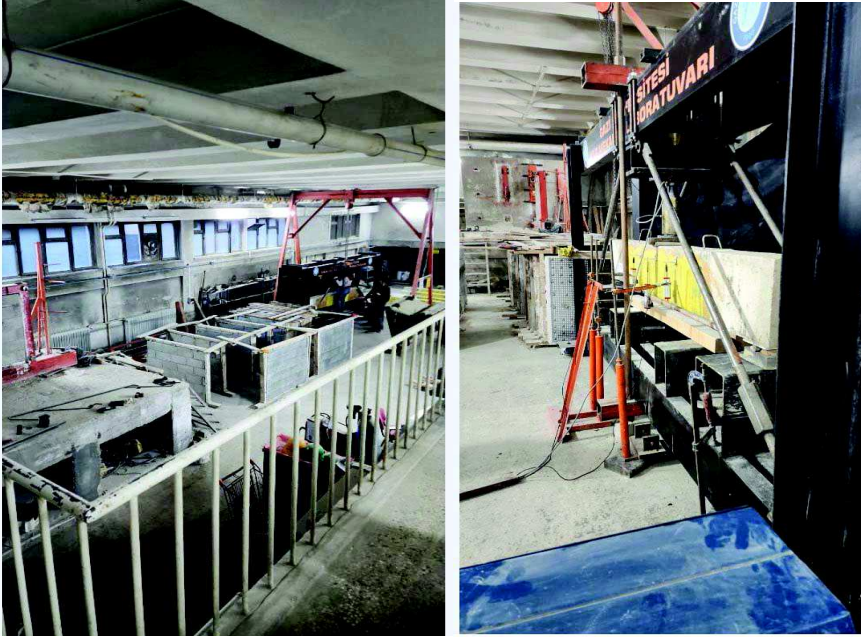
Prof. Dr. Tuğrul Tankut Gazi Üniversitesi'nde bulunduğu kısa süre zarfında 9'dan fazla yüksek lisans, 3 adet de doktora tezi yönetmiştir. Yönetilen 3 adet doktora tezi ve konusu Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1.Prof. Dr. Tuğrul Tankut'un Gazi Üniversitesinde Danışmanı Olduğu Doktora Öğrencileri

Yazar	Tez Adı	Tübitak Desteği
Dr. Öğretim Üyesi Yusuf Demirel	Onarılmış / Güçlendirilmiş Çift Eğrilikli Betonarme Kolonların Davranış ve Dayanımı	Var
Prof. Dr. Sabahattin Aykaç	Onarılmış/güçlendirilmiş betonarme kirişlerin deprem davranışı	Var
Prof. Dr. Bengi Aykaç	Mantolama tekniği ile güçlendirilmiş betonarme kolonların davranışını etkileyen parametreler	Yok

3.Laboratuvarın Son Durumu

Zaman ilerledikçe, laboratuvarında çalışma yapan yeni hocalar da ekibe katılarak, laboratuvarın daha da aktif kullanımına vesile olmuşlardır (Şekil 6.). Yaklaşık olarak, kurulduğundan bu yana, toplamda 125 adet yüksek lisans ve doktora öğrencisi mezun edilmiştir. Bölümümüzden emekli olmuş Prof. Dr. Sinan Altın ve Prof. Dr. Hüsnü Can hocalarımızın da laboratuvarımızda çok sayıda çalışmaları olup, çalışmalarıyla laboratuvarımıza önemli katkılarda bulunmuşlardır.



Şekil 6. Gazi Üniversitesi İnşaat Müh. Yapı Mekaniği Laboratuvarının Son Durumu

SONUÇ

Kurulduğu tarihte bomboş olan ve hiçbir zaman yer sıkıntısı çekilmeyeceği düşünülen yapı mekaniği laboratuvarı, Şekil 5'te de görüleceği gibi artık fiziksel olarak yetmemektedir. Buna rağmen büyük özveri ve emeklerle kurulmuş olan laboratuvarımızda hâlâ çok sayıda deneysel çalışma devam etmektedir. Bu durum “başlamak bitirmenin yarısıdır” sözü için en güzel örneklerden biri olduğu düşünülmektedir.

Teşekkür

Laboratuvarımızı kurup, bizlere bu yolda ışık tutarak, örnek olmuş kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. TUĞRUL TANKUT'a emekleri için, üniversitem ve meslektaşlarım adına teşekkürü bir borç bilirim.

KAYNAKLAR

- Aykaç S. (1993) Onarılmış veya Güçlendirilmiş Betonarme Döşemelerin Davranış ve Dayanımları, Y. Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Özdemir İ. (1994) Onarılmış Betonarme Kirişlerin Tersinir Yük Altında Davranış ve Dayanımları, Y. Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Aykaç S. (2000) Onarılmış/Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Deprem Davranışı, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

LİF KATKILI BETONARME PANELLERİN PATLAMA YÜKÜ ALTINDA YAPISAL DAVRANIŞLARI

STRUCTURAL BEHAVIOR OF FIBER REINFORCED CONCRETE PANELS UNDER BLAST LOADS

Selçuk SAATCI¹, Mohammed Jalal ALKABBANI², Tahir Kemal ERDEM³

ÖZET

Betonarme binalar terör saldırıları neticesinde patlama yüklerine maruz kalabilmektedir. Bu tür patlama yükleri genellikle askeri mühimmatla yapılan saldırılara kıyasla daha düşük patlama basınçları oluşturmakta ve çoğu zaman betonarme taşıyıcı sisteme önemli bir hasar vermemektedir. Ancak taşıyıcı nitelikte olmayan tuğlalardan imal edilen binaların dış cephe duvarları oluşan patlama dalgası etkisiyle parçalanarak dağılabilmekte ve oluşan parçalar şarapnel etkisi yaratarak ciddi hasar ve can kaybına yol açabilmektedir. Sunulan bu çalışmada patlama yükleri altında dayanım sağlayabilecek ve binaların dış cephelerinde veya iç mekanlarda bölme duvar olarak kullanılabilir hafif, ön üretilmiş ve çelik lif katkılı beton paneller geliştirilmiştir. Üretilen paneller, şok tüpü düzeneği kullanılarak deneysel olarak test edilmiş ve patlama yükleri altındaki davranışları incelenmiştir. Deneysel sonuçları, lif katkılı beton panellerin patlama etkisi altında çatlak kontrolü, panel bütünlüğünün korunması ve şarapnel oluşumunun engellenmesi açısından başarılı bir performans sergilediğini göstermektedir. Bu bulgular, söz konusu panellerin betonarme binalarda patlama yüklerine karşı etkin bir çözüm olarak kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, lif özelliklerinin panel davranışı üzerinde belirleyici bir rol oynadığı; özellikle daha uzun liflerin daha yüksek dayanım ve daha etkin çatlak kontrolü sağladığı gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, panellerde düşük oranlarda dahi olsa geleneksel donatı kullanımının, panellerin patlama yükleri altında performanslarını önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Patlama yükleri, betonarme paneller, bölme duvarlar, lif katkılı beton

ABSTRACT

Reinforced concrete buildings may be subjected to blast loads as a result of terrorist attacks. Such loads generally produce lower blast pressures compared to attacks involving military munitions and, in most cases, do not cause significant damage to the primary reinforced concrete structural system. However, non-load-bearing exterior walls made of brick can fragment and disperse under the effect of the blast wave, and the resulting debris may act as shrapnel, leading to severe damage and loss of life. In this study, lightweight, prefabricated, steel fiber-reinforced concrete panels were developed to provide resistance under blast loading and to be used as exterior façade elements or interior partition walls in buildings. The manufactured panels were experimentally tested using a shock tube setup, and their behavior under blast loading was investigated. The experimental results indicate that the fiber-reinforced concrete panels exhibit satisfactory performance in terms of crack control, preservation of panel integrity, and prevention of shrapnel formation under blast effects. These findings demonstrate that such panels can be effectively used in reinforced concrete buildings as a protective solution against blast loads. Furthermore, it was observed that fiber characteristics play a decisive role in panel behavior; in particular, longer fibers provide higher strength and more effective crack control.

¹ Doç. Dr., İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, selcuksaatci@iyte.edu.tr

² Yüksek Lisans Öğrencisi (mezun), İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, jalalrose12@gmail.com

³ Prof. Dr., Marmara Üniversitesi, İstanbul, kemal.erdem@marmara.edu.tr

In addition, even the use of conventional reinforcement at low ratios was found to significantly enhance the performance of the panels under blast loading.

Keywords: Blast loads, reinforced concrete panels, infil walls, fiber reinforced concrete

GİRİŞ

Ülkemizde de dönem dönem görülen terör olayları yüksek sayıda can kaybına yol açmakta ve ulusal güvenliğimizi tehdit etmektedir. Bu terör eylemleri daha çok intihar saldırısı şeklinde, bomba yüklü araçların askeri veya emniyet binaları yakınında patlatılması sonucu gerçekleştirilmekte, bu tür saldırılar doğrudan patlayıcı etkisi yanında yıkılan veya ağır hasar gören binalardan dolayı da can kaybına yol açabilmektedir. Bu tür terör eylemlerine hedef olan betonarme binalarda patlamaya doğrudan maruz kalan dış cephe tuğla duvarlar tamamen geçerek içeride bulunan kişileri yaralayabilmekte, bina ise hasar alarak onarılmadan kullanılamaz hale gelmektedir. Ancak genel olarak binanın betonarme taşıyıcı sistemi önemli bir hasar görmemekte, görülen tüm hasar geçmişte bu tür bir risk gözetilerek inşa edilmemiş olduklarından taşıyıcı olmayan unsurlarda gerçekleşmektedir (Şekil 1).

Binaların patlama yüklerine karşı tasarımı özellikle askeri birimlerce uzun yıllardır üzerinde çalışılan bir konu olup yapıların hem mimari hem de taşıyıcı sistemlerinin patlama yüklerine karşı tasarımı konusunda yayınlanmış çok sayıda kılavuz kaynak bulunmaktadır (UFC 3-340-02, 2008; BIPS 06/FEMA 426, 2011; ACI 370R-14, 2014). Yapıların döşeme, kolon, kiriş, perde duvar gibi taşıyıcı elemanları ile cephe kaplaması, kapı ve pencere gibi taşıyıcı olmayan elemanlarının patlama yüklerine karşı güçlendirilmesi ve bu yüklerle karşı özel tasarımlar geliştirilmesi araştırmacıların yaygın olarak çalıştığı konular arasında yer almaktadır (Bewick vd., 2008; Carriere vd., 2009; Tanapomraweekit vd., 2011; Drdlova vd., 2015). Sunulan bu çalışmada ise patlama etkilerine dayanıklı, hafif, ön üretimli betonarme paneller geliştirilmesi ve bu panellerin patlama yükleri altında davranışlarının incelenerek klasik tuğla duvar yerine dış cephe duvarı veya iç bölme duvar olarak kullanım potansiyellerinin irdelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla çeşitli lif katkılı betonarme paneller üretilmiş ve bu paneller şok tüpü test düzeneği yardımıyla laboratuvar ortamında patlama yükleri altında test edilerek davranışları incelenmiştir.



(a) Diyarbakır Çınar İlçe Emniyet Müdürlüğü (14.01.2016)



(b) Mardin Midyat İlçe Emniyet Müdürlüğü (08.06.2016)

Şekil 1. Patlayıcı yüklü araçlarla yapılan saldırılar sonrası betonarme binalar

ŞOK TÜPÜ DÜZENEGİ

Patlama yüklerini laboratuvar ortamında oluşturabilmek amacıyla tasarlanıp ve imal edilen şok tüpü (Şekil 2) üç bölümden oluşmaktadır (Şekil 3). İlk bölüm, tahrik tüpü, birbirine eklenebilen parçalardan oluşan, en uzun halinde 6,3 m uzunluğa sahip çelik bir tüpten oluşmaktadır. Bu tüp bir ucundan çelik bir kör flanşla kapalı olup diğer ucuna ise değişen kalınlıklarda alüminyum plakalar sıkıştırılarak hava geçirmeyecek şekilde kapatılabilmektedir. Şok tüpünün ikinci bölümü ise genişleme bölümüdür. Bu bölüm, alüminyum diyaframın patlamasıyla aniden serbest kalan yüksek basınçlı havanın genişleyerek numuneye ilerlemesini sağlayan konik bir tüptür. Genişleme bölümünün ucunda ise numune çerçevesi yer almaktadır (Şekil 4). Beton plaka numuneler 2x2 m boyutlarına sahip bu çerçeveye oturmaktadırlar.

Deneysel süreç şu sıra ile gerçekleştirilmektedir:

- 1) Numune, çerçeve içine oturtularak sabitlenir.
- 2) Tahrik tüpünün çıkışına istenilen basınçta patlayacak alüminyum diyafram yerleştirilir ve sıkıştırılarak kapatılır.
- 3) Kompresör çalıştırılarak tahrik tüpü doldurulmaya başlanır.
- 4) Patlama basıncına ulaşan tahrik tüpünün ucundaki alüminyum diyafram yırtılarak patlar.
- 5) Patlama anında oluşturulan tetik mekanizması ile veri toplama sistemi ve hızlı kamera devreye girer.
- 6) Yüksek basınçlı hava genişleme bölgesinden geçerek numuneye çarpar ve deney gerçekleşmiş olur.

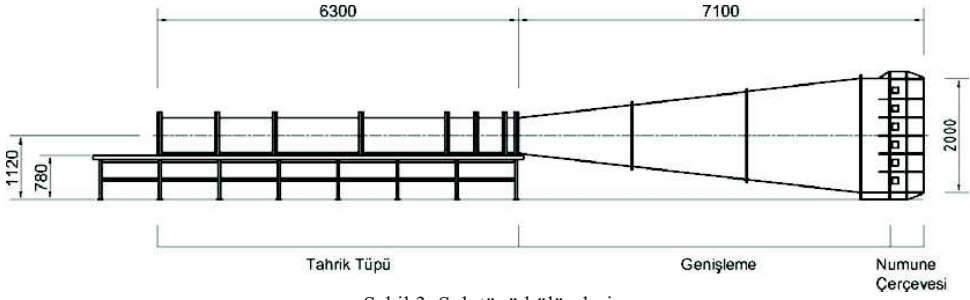


(a) Arka görünüş



(b) Üst görünüş

Şekil 2. Şok tüpü



Şekil 3. Şok tüpü bölümleri



Şekil 4. Şok tüpü numune çerçevesi

PANEL DENEYLERİ

Gerçekleştirilen deneysel çalışmada çeşitli donatı, lif tipi ve oranlarına sahip 11 farklı panel patlama yükleri altında test edilmiştir. Burada özet olarak çelik lif içeren 5 panele ait elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Tüm panellere ait deney sonuçları ve daha ayrıntılı bilgi Alkabbani (2021)'de verilmektedir. Sonuçları burada sunulan panellere ait numune özellikleri Tablo 1'de verilmektedir. Paneller 1900 x 1900 x 50 mm boyutlarında olup şok tüpü numune çerçevesine kenarlarından 12 noktada 24 mm çapında bulonlarla sabitlenmişlerdir.

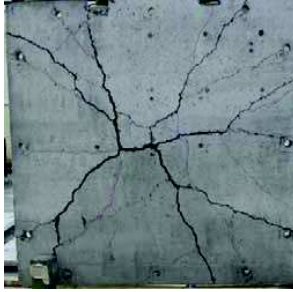
Deneylerde 12 noktada mesnet tepkisi, 5 noktada yer değiştirme, 8 noktada ivme, 2 noktada ise yüzey basıncı ölçülmüştür. Mesnet tepkileri mesnetlere yerleştirilen 5 ton kapasiteli S tipi yük hücreleri ile, ivmeler 5000g kapasiteli PCB şok ivme ölçerleri ile, yer değiştirmeler RLPT'ler ile ölçülmüştür. Panel üzerinden yansıyan şok dalgasının basıncını ölçmek amacıyla 2 adet şok basıncı ölçer kullanılmıştır. Bu basıncı ölçerleri yerleştirmek için panel içinde delikler açılmış ve basıncı ölçerler panelin arkasından sokularak sensörün ölçüm alan yüzeyi panelin yüzeyinden okuma alacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Panelden alınan bu ölçümler haricinde tahrik tüpünün basıncını ölçmek amacıyla tahrik tüpünün kör flanşı üzerine bir basıncı ölçer yerleştirilmiş ve deneyler sırasında bu basıncı ölçerden de kayıt alınmıştır. Tüm ölçümler tüm kanallardan paralel olarak 250000 veri/kanal/saniye hızla veri kaydedebilen yüksek hızlı bir veri toplama cihazıyla kayıt altına alınmıştır. Ayrıca 1000 fps hızında kayıt alabilen bir hızlı kamera panel arkasına kurulmuş ve patlama anında kayıt alacak şekilde ayarlanmıştır. Deneyler normal video kamerayla da ayrıca kayıt altına alınmıştır.

Tablo 1. Panel Numune Özellikleri

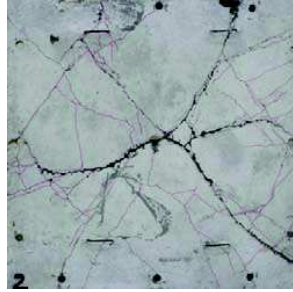
Numune Adı	Çelik Lif Tipi	Çelik Lif Oranı, hacimce (%)	Çelik Donatı
JA1-075	45/35 3D	0.75	-
JA2-075	65/60 3D	0.75	-
JA3-075	65/60 5D	0.75	-
JA2-125	65/60 3D	1.25	-
JA2-075-RF	65/60 3D	0.75	φ5/150 mm hasır

DENEY VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Yapılan deneyler sonucunda şok tüpünün tipik bir patlama olayında yapılar üzerinde etki etmesi beklenen formda şok dalgası üretilebilmiş, 3.5 bar civarı tahrik tüpü basıncı ile numunede patlama sırasında 50 kPa civarında maksimum basınç ve 600-800 kPa-ms aralığında impuls oluşturulmuştur. Deneyler sonucunda panellerde görülen hasar durumu Şekil 5'te verilmektedir. Sunulan fotoğraflar panellerin arka yüzlerine (patlama dalgasının geldiği yüzün arkası) aittir.



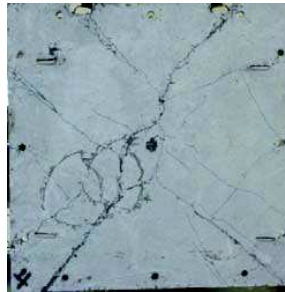
(a) JA1-075



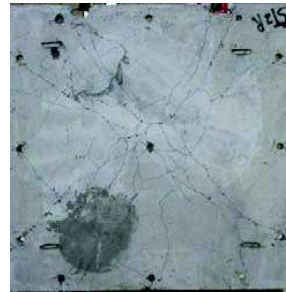
(b) JA2-075



(c) JA3-075



(d) JA2-125



(e) JA2-075-RF

Şekil 5. Panellerin deneyler sonrası arka yüz hasar durumları

Deney sonuçları değerlendirildiğinde kullanılan çelik lif tipi ve oranı patlama yüklerinde panellerin performansı üzerinde en önemli etken olmuştur. 35 mm'lik kısa çelik fiber içeren JA1-075 numunesi en fazla hasar alan numune olmuştur. Ancak 60 mm'lik daha uzun çelik liflerin

kullanıldığı numunelerde hasar düzeyi daha düşük olmuş, bu numunelerde çatlak kontrolü çok daha etkin gerçekleşmiştir.

Çelik hasır donatılı numune ise tüm numuneler içinde en düşük yer değıştirmeleri yapan ve en az hasar gören numune olmuştur. Kullanılan $\phi 5/150$ mm çelik hasırın 0,0026 ile düşük sayılabilecek bir donatı oranı sağladığı düşünülürse düşük oranda bir çelik donatı varlığının bile patlama dayanımına önemli bir katkı sağladığı söylenebilir. Çelik hasır donatı dayanımı arttırırken aynı zamanda geniş çatlakların kontrolü ile parçalanmayı da sınırlayarak patlama davranışına önemli bir katkı sağlamaktadır.

SONUÇ

Sunulan çalışmada patlama yükleri oluşturmak üzere tasarımı ve imalatı yapılan bir şok tüpü düzeneği tanıtılmış ve bu düzenek kullanılarak yapılan beton plaka deneyleri ile elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Kullanılan şok tüpü deney düzeneği ile beton plakalar üzerinde ideal patlama dalgası formuna benzer bir formda basınç oluşturabilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda lif katkılı beton panellerin patlama yükleri altında çatlak ve hasar kontrolü sağlayabildiği, panellerin patlama yükleri altında parçalanmadan bir bütün olarak kalabildiği görülmüştür. Dolayısıyla bu tür panellerin patlama yüklerine maruz kalma riski taşıyan binalarda taşıyıcı olmayan dış cephe veya iç bölme duvarı olarak kullanılmasının mümkün olduğu, düzlem dışı dayanımı çok düşük olan ve patlamalarda parçalanıp dağılarak şarapnel etkisi ile ağır hasar ve can kayıplarına yol açan tuğla duvarlara karşı uygun bir alternatif olduğu değerlendirilmiştir.

Teşekkür

Sunulan çalışma TÜBİTAK tarafından 217M442 no'lu bilimsel araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- ACI 370R-14 (2014) Report for the Design of Concrete Structures for Blast Effects, American Concrete Institute, A.B.D.
- Alkabbani MJ (2021) Structural behavior of hybrid fiber reinforced concrete panels under blast loads, M.A.Sc. Thesis, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Türkiye
- Bewick BT, Salim HA, Hoemann J (2008) "Prefabricated Tilt-up Concrete Panels for Blast Resistant Design", *78th Shock and Vibration Symposium*, Philadelphia, A.B.D.
- BIPS 06/FEMA 426 (2011) Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings, US Department of Homeland Security, A.B.D.
- Carriere M, Heffernan PJ, Wight RG, Braimah A (2009) "Behaviour of steel reinforced polymer (SRP) strengthened RC members under blast load," *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36(8): 1356-1365
- Drdlova M, Buchar J, Ridky R, Kratky J (2015) "Blast resistance characteristics of concrete with different types of fibre reinforcement," *Structural Concrete*, 16(4): 508-517
- Tanapornaweekit G, Haritos N, Mendis P (2011) "Behavior of FRP-RC Slabs under Multiple Independent Air Blasts," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 25(5):433-440
- UFC 3-340-02 (2008) Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Department of Defence, A.B.D.

MEVCUT RÜZGAR TÜRBİNLERİ KULE-TEMEL BAĞLANTISI İÇİN GÜÇLENDİRME YÖNTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

DEVELOPMENT OF A STRENGTHENING METHOD FOR THE TOWER-FOUNDATION CONNECTION OF EXISTING WIND TURBINES

Mert GENÇ¹ ve Ayhan NUHOĞLU²

ÖZET

Rüzgar enerjisine dayalı elektrik üretim tesislerinde yer alan türbin kulesi taşıyıcı sistemlerinde, gömülü çelik halka ile teşkil edilmiş temel bağlantısı yöntemi sektörün gelişim aşamasında sıklıkla uygulanmıştır. Bu bağlantı yönteminin uygun şekilde çalışabilmesi gömülü halka ile temel arasındaki sürtünme yüzeyi kalitesine bağlıdır. İnşa veya işletme koşullarındaki olası kusurlar, bu türbinleri yapısal olarak hassas hale getirmektedir. Gömülü çelik halka-temel bağlantıları, yükleri kuleden temele aktarmak için kara üzerinde kurulu olan rüzgar türbinlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Gömülü çelik halka-temel bağlantısının yük taşıma davranışı, nihai yükler altında rüzgar türbinlerinin yapısal bütünlüğünü büyük ölçüde etkilemektedir. Eğilme yüklerinin yaklaşık %90'ı gömülü halka taban flanşı ve gömülü halka-beton temas yüzeyleri tarafından taşınmaktadır. Bu bölgelerde meydana gelebilecek hasarlar kule stabilitesini önemli ölçüde etkilemekte ve kuleyi devrilmeye götürebilmektedir. Bu bölgelerde oluşabilecek hasarlar rüzgar türbini yapılarında meydana gelebilecek en tehlikeli hasarlardır. Hali hazırda hasar oluşumu başlamış kule-temel bağlantıları, boşluk enjeksiyonu ile onarılmakta ancak belirli işletme süresi sonrası problem tekrar nüksetmektedir. Bu çalışma kule-temel bağlantısı hasarlı veya hasar almaya başlamış rüzgar türbini temelleri için yay tipi sönmüleyicilerin kullanıldığı bir güçlendirme yöntemi önermektedir. Geliştirilen güçlendirme yönteminin kule-temel bağlantısının yatay yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini araştırmak ve ayrıca nümerik modellerin doğrulanmasını yapabilmek için mevcut bir rüzgar türbini ve temelini 1/15 ölçeğinde modelleri oluşturulmuştur. Prototiplerin laboratuvar ortamında yapılan testlerinde, geliştirilen güçlendirme yönteminin, mevcut kule yatay yük taşıma kapasitesinde %33 oranında artış sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca hasar verilen kule-temel modeli üzerinde, epoksi esaslı boşluk enjeksiyonu uygulanıp, bu yöntemin yatay yük – deplasman üzerindeki etkisi test edilmiştir. Böylece geliştirilen güçlendirme yöntemi ile uygulamada sıklıkla tercih edilen boşluk enjeksiyonu yöntemi karşılaştırabilmiştir. Gerçekleştirilen ölçekli model testleri yay tipi sönmüleyiciler içeren yöntemin, rüzgar türbinlerinin güçlendirilmesinde etkin olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar türbini, Yay tipi sönmüleyici, Rüzgar türbini güçlendirme, Gömülü halka

ABSTRACT

In wind energy-based electricity generation facilities, the foundation connection method using embedded steel rings has been frequently used in the development phase of the industry for turbine tower support systems. The proper functioning of this connection method depends on the quality of the friction surface between the embedded ring and the foundation. Embedded steel ring connections are widely used in onshore wind turbines to transfer loads from the tower to the foundation. The structural behavior of the embedded steel ring connection greatly affects the structural integrity of wind turbines under ultimate loads. Approximately 90% of the bending loads (bending moments) are carried by base flange of the embedded ring and the embedded ring-concrete contact surfaces. Damage that may occur in these areas significantly affects the

¹ Dr., Genoser Yapı Mühendisliği Ofisi, İzmir, mert@genoser.com

² Doç. Dr., Doç. Dr., Ege Üniversitesi, İzmir, ayhan.nuhoglu@ege.edu.tr

tower stability and may lead to the tower overturning. Currently, tower-foundation connections are repaired using void injection, but the problem recurs after a certain operational period. This study proposes a strengthening method involving the use of spring-type dampers for wind turbine foundations with damaged tower-foundation connections. In order to investigate the effect of the developed strengthening method on the structural behavior of the tower-foundation connection and also to verify the analytical models, 1/15 scale models of an existing wind turbine and its foundation were created. Laboratory tests on the prototypes revealed that the developed strengthening method significantly increases (33 %) the existing tower's horizontal load-carrying capacity. Additionally, epoxy-based void injection was applied to the damaged tower-foundation model, and the effect of this method on horizontal load-displacement was tested. Thus, the developed strengthening method could be compared with the void injection method, which is frequently preferred in practice. The scaled model tests and numerical analyses conducted demonstrate that the method incorporating spring-type dampers can be effectively utilized in the reinforcement of wind turbines.

Keywords: Wind turbine, Spring type damper, Wind turbine strengthening, Embedded ring

GİRİŞ

Rüzgar türbini, rüzgardaki kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren sistemdir. Rüzgar türbini genellikle kule, kanatlar, rotor, dişi kutusu, jeneratör (alternatör), elektrik-elektronik elemanlardan oluşur. Rüzgar türbinleri operasyon durumunda her yönde tekrarlanan ve eksantrik yüklere maruz kalırlar. Temele aktarılan bu yükler, çeşitli yüklerin (eksenel yük, yatay yük, eğilme-burulma momentleri) karmaşık bir kombinasyonunu oluştururlar. Bu nedenle, rüzgar türbini temelini güvenliği/stabilitesi, rüzgar türbininin yapısal bütünlüğü ve güvenli bir şekilde çalışması açısından büyük önem taşımaktadır (Mohamed vd., 2018). Çevresel ve operasyon durumundaki etkilerden dolayı rüzgar türbini kulesinde oluşan kuvvetler, kule ile temel arasındaki bağlantıyı sağlayan bağlantı parçaları ile temele aktarılmaktadır. Rüzgar türbinlerinde iki farklı kule-temel bağlantısı uygulanmaktadır. Kule ile temel arasındaki bağlantı, yaygın olarak kullanılan ve temelin içine yerleştirilen gömülü halka (embedded ring) veya ankraj sepeti (anchor cage) bağlantı parçaları ile sağlanmaktadır (Jeong vd., 2020). Eski imalat modeli olarak Gömülü Halka (embedded ring) Yöntemi, yeni imalat modeli olarak ise Çubuk Ankraj Kule-Temel Bağlantı Yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak adaptör (Hibrit) bağlantı yöntemi de uygulanmaktadır (Genç, 2017).

Kule temel bağlantıları, üst yapıdan gelen yükleri, temele aktaran bağlantı elemanları olduğundan, burada oluşabilecek bir hasar, tüm kulenin göçmesine neden olabilmektedir. Gömülü halka bağlantılı rüzgar türbin temelleri kurulum ve uygulama kolaylığı nedeniyle bu türbinlerin kullanılmaya başlandığı erken dönemlerde çok sık uygulanmıştır (Chen vd., 2021). Gömülü halka bağlantı şekli, kolay inşa edilmesi ve yüksek eğilme rijitliği nedeniyle tercih edilen bir sistemdir (Chen vd., 2020). Diğer bağlantı şekilleri ile kıyaslandığında bu bağlantı şeklinde yapısal hasarların daha sık ortaya çıktığı zamanla görülmüştür. Gömülü halka ve beton arasındaki farklı büzülme oranları halka ile temel ara yüzeyinde çatlakların oluşmasına neden olmakta ve gömülü halka üst yapıdan gelen yükler nedeniyle temel içerisinde küçük deplasmanlara maruz kalmaktadır (Bai vd., 2017). Oluşan bu çatlaklara zamanla su girişi olmakta ve halka etrafında boşlukların ve ayrışmanın artmasıyla çatlaklar giderek büyümektedir (Hassanzadeh, 2012). Rüzgar yükü etkisi altında kulenin salınım hareketinden dolayı gömülü halka ile beton ara yüzeyi arasında çatlağın başlaması, genişlemesi, uzaması ve bunun sonucunda temel betonunda kırılmaların meydana geldiği gözlenmektedir. Rüzgar türbini temellerinde kule ile temel arasındaki bağlantıyı sağlamak için sıklıkla kullanılan gömülü halkalar, üzerinde bulunan çelik kule ile temel betonu ara yüzeyinde oluşan kaldırma ve basınç kuvvetlerine direnç gösteren önemli bir elemandır. Zamanla bu tür bağlantılarda oluşan çeşitli hasarlar nedeniyle, temelin yük taşıma kapasitesi ciddi oranda azalmakta, kulenin göçmesi ile sonuçlanabilecek durumlar ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, hali hazırda kule-temel bağlantısı gömülü halka olan rüzgar türbinleri için güçlendirme yöntemlerinin geliştirilmesi konusu önemli görülmektedir.

Gömümlü halka bağlantı tipine sahip temellerde en yaygın olarak kullanılan güçlendirme yöntemi, temelın üst yüzeyinde delikler açılarak boşlukları ve çatlakları doldurmak için çimento harcını enjekte etmektir. Bu yöntemin yanında bir güçlendirme etkisi olabilir, ancak çelik gömümlü halka ile beton arasındaki kuvvet aktarım mekanizması değışmediği için boşluklar ve çatlaklar kısa sürede tekrar ortaya çıkmaktadır. Gömümlü halka bağlantı tipine sahip rüzgar türbini kule – temel ara yüzeyinde oluşan hasarlar için uygulanan güçlendirme yöntemleri yapıyı güçlendirmeden ziyade onarmaya yönelik olarak yapılmaktadır. Yapılan bu onarım işleminde genellikle enjeksiyon, izolasyon yenileme gibi yöntemler kullanılmaktadır. Uygulanan bu yöntemlerin kule-temel bağlantısını ne kadar güçlendirdiği, hedeflenen performans seviyesine çıkarıp çıkarmadığı ise uygulanan prosedür sonrasında ölçülemediği için bilinmemektedir.

Bu çalışma, kaldırma yüklerine direnmek ve betonu çekme kuvvetlerine karşı kuvvetlendirmek için yay tipi sönümleyiciler kullanılarak mevcut rüzgar türbini temellerini güçlendirmek için yeni bir iyileştirme çözümü sunmaktadır. 1/15 ölçeğinde 2 adet rüzgar türbini temelleri ile birlikte imal edilmiştir. Bu modellerden birisi referans numune olarak kabul edilmiş diğereine ise sönümleyiler yerleştirilerek her iki modele de çevrimsel yükleme testi (Quasistatic Test) yapılmıştır. Yapılan testler sonucu her iki modele ait kuvvet – deplasman ilişkileri elde edilmiştir. Ayrıca mevcut rüzgar türbini temellerinin güçlendirilmesinde sıklıkla tercih edilen enjeksiyon yöntemi de hasar verilen modele uygulanıp testleri tekrarlanarak bu yöntemin de etkisi geliştirilen güçlendirme yöntemiyle karşılaştırılmalı bir şekilde araştırılmıştır. Çalışma sonrasında referans ve güçlendirilen modellerin deplasmana bağlı yatay yük taşıma kapasiteleri deneysel olarak ortaya konulmuş ve geliştirilen güçlendirme yönteminin verimliliği değerlendirilmiştir.

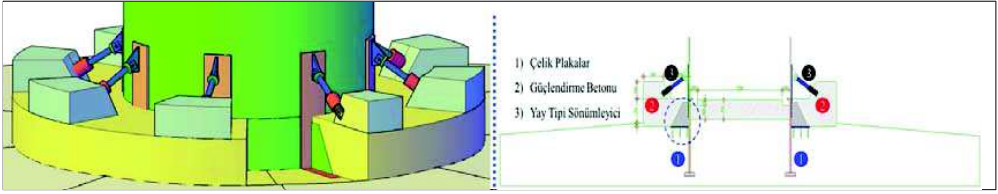
Yapılan testler sonucunda yay tipi sönümleyiciler ile güçlendirilen modelin yük taşıma kapasitesinde referans modele göre %33 oranında artış olduğu tespit edilmiştir. Yapılan testler neticesinde enjeksiyon yöntemi ile yapılan işlemin mevcut çatlakları güçlendirdiği fakat sistemin geneli üzerinde kapasite artışı sağlamadığı belirlenmiştir.

GELİŞTİRİLEN GÜÇLENDİRME YÖNTEMİ

Mevcut rüzgar türbini temellerini iyileştirmek, kaldırma yüklerine direnmek ve betonu çekme kuvvetlerine karşı kuvvetlendirmek için yay tipi sönümleyicilerin kullanıldığı yeni bir güçlendirme önerisi / çözümü geliştirilmiştir. Önerilen güçlendirme tasarımındaki temel amaç; gömümlü çelik halka ve betonarme temel arasındaki basınç gerilmesi dağılımını iyileştirerek yapıyı istenilen performans düzeyine çıkarmak ve ayrıca gömümlü halka ile beton arasındaki kuvvet aktarımı mekanizmasını da değıştirerek oluşan çatlakları kapatarak betonda yeni çatlak oluşumunu önlemektir. Önerilen bu çözüm, betonun çatlamasını önleyerek servis yüklerinin neden olduğu gerilmelere dayanma yeteneği sağlayacak ve sonrasında döngüsel gerilim genliği azaldığı için betonun yorulma ömrü artırılmış olacaktır.

Geliştirilen güçlendirme tasarımı, kule-temel bağlantısını oluşturan gömümlü halka-temel birleşim bölgesi etrafına uygulanan ve planda halka şeklinde olan güçlendirme betonundan, çelik plakalarından ve yay tipi sönümleyicilerden oluşmaktadır. Tasarım esas olarak üç ana uygulamadan oluşmaktadır: (i) kule-temel birleşim bölgesine çelik plakaların (bayrak plakaları/feder/berkitme) yerleştirilmesi, (ii) yerleştirilen çelik plakaların güçlendirme betonu ile kapatılması ve (iii) sonrasında yay tipi sönümleyicilerin eklenmesi ile güçlendirme tasarımı tamamlanmaktadır (Şekil 1). Kuletemel bağlantısını güçlendirmek için geliştirilen yay tipi sönümleyicide disk yaylar kullanılmıştır. Disk yaylar, küçük hacimlerde büyük yükler taşıyabilme ve aynı zamanda yay ekleyip çıkarılarak istenilen kapasiteye getirilebilme özelliklerinden dolayı tercih edilmiştir.

Geliştirilen bu güçlendirme sisteminde bulunan güçlendirme betonu, gömümlü halkanın temel içerisindeki gömülme derinliğinin artırılmasını sağlamakta ve halkanın moment taşıma kapasitesinin iyileştirilmesine olumlu katkıda bulunmaktadır. Güçlendirme sisteminin ana elemanları olan yay tipi sönümleyiciler ile de gömümlü halka ile beton arasındaki kuvvet aktarım mekanizmasının değıştirilerek oluşan çatlakların kapatılması ve betonda yeni çatlak oluşumunun önlenmesi sağlanmış olacaktır. Rüzgar türbini kulesi rüzgar, deprem vb. gibi çevresel yük etkilerinden kaynaklanan devrilme momenti etkisi altında devrilme eğilimindedir ve geliştirilen bu güçlendirme yöntemi ile kulenin devrilmesinin önüne geçilmesi de sağlanmış olacaktır.



Şekil 1. Önerilen güçlendirme yöntemi

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Gömülü halka bağlantı tipine sahip rüzgar türbinlerinde gömülü halka – temel bağlantısının yük taşıma davranışını araştırmak için büyük ölçekli testler, bağlantının çeşitli bileşenlerinin devasa boyutları nedeniyle son derece pahalı ve zaman alıcı olacaktır. Bu zorluk göz önünde bulundurularak, kule, temel ve bağlantının küçük ölçekli (1/15 ölçekli) modelleri geliştirildi (Şekil 2) ve Ege Üniversitesi Yapı Mühendisliği Laboratuvarında ACI 374.1.05 (ACI Committee, 2005), şartnamesinde belirtilen test prosedürüne uygun şekilde çevrimsel (Quasistatic) yükleme koşulları altında test edildi. Testin amacı, geliştirilen güçlendirme yönteminin bağlantının yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini araştırmak ve ayrıca sonraki analitik modellerin doğrulanması için veri sağlamaktır.



Şekil 2. Test numuneleri ve test sistemi akış şeması

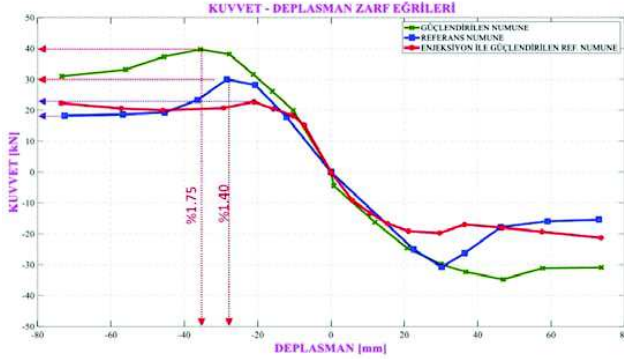
ACI 374.1.05 (ACI Committee, 2005), şartnamesinde tariflenen test prosedürüne göre referans numune (güçlendirilmeyen numune) üzerinde çevrimsel yükleme testleri yapılmış ve referans numuneye ait karakteristik kuvvet – deplasman eğrisi elde edilmiştir. Testler tamamlandıktan sonra referans numune enjeksiyon reçinesini ile güçlendirilmiş ve testler tekrarlanarak enjeksiyon ile yapılan güçlendirme işleminin temel üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu sayede mevcut rüzgar türbini temellerinin güçlendirilmesinde sıklıkla tercih edilen enjeksiyon yönteminin de etkisi belirlenmiştir. Yay tipi sönümleyiciler ile güçlendirilen numuneye de aynı test prosedürü uygulanmış ve her iki güçlendirme yönteminin temel üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak elde edilmiştir. Yapılan test işlemleri Şekil 3’ te özetlenmiştir.



Şekil 3. Test özeti

DENEY SONUÇLARI

Testler, hem geliştirilen güçlendirme yönteminin hem de rüzgar türbini temellerinin güçlendirilmesinde sıklıkla tercih edilen güçlendirme yönteminin temel yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Referans ve güçlendirilmiş numune üzerinde çevrimsel yükleme testleri (toplam 3 adet test) sonucunda elde edilen histeretik kuvvet - yer değiştirme eğrilerinden oluşturulan omurga eğrileri karşılaştırılarak uygulanan güçlendirme yöntemlerinin etkisi belirlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Karşılaştırmalı kuvvet – deplasman omurga eğrileri

Yaylar ile güçlendirilen numune, referans numuneye kıyasla yanar yük taşıma kapasitesini yaklaşık %33 artırmış ve yük taşıma kapasitesine ulaşılan ötelenme oranı değerini %1.40'tan %1.75'e ötelemiştir. Enjeksiyon reçinesi ile yapılan güçlendirme işleminde ise referans numuneye kıyasla yanar yük taşıma kapasitesinde bir artış gözlenmemiştir. Enjeksiyon reçinesi ile yapılan güçlendirme işlemi referans numunenin %3.50 ötelenme oranı sonundaki yük taşıma kapasitesini (yaklaşık 20 kN) korumasını sağlamıştır (yani sistem kaldığı noktadan kapasite düşüşü olmadan çalışmaya devam edebilmektedir). Ayrıca enjeksiyon reçinesi ile yapılan güçlendirme işleminin sisteme ilave süneklik kazandırdığı da omurga eğrilerinden açıkça görülebilmektedir. Enjeksiyon reçineleri vb. kimyasallar ile yapılan işlemlerin rüzgar türbini temelleri üzerinde güçlendirmeden ziyade onarıcı etkisinin olduğu yapılan çevrimsel yükleme testleri sonuçlarından görülmektedir. Çevrimsel yükleme testi sonuçlarına ilişkin her numune için çıkarılan sayısal bilgiler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Test Sonuçları İçin Belirlenen Sayısal Bilgiler

Test	Dayanım [kN]		Rijitlik [kN/mm]			Azalma/Bozulma [%]	
	En Büyük	%3.5 Ö.O.	%0.20 Ö.O.	%3.5 Ö.O.	Dayanım	Rijitlik	
1	30 (%1.4)	18	1.6170	0.2038	40.00	87.40	
2	22.75 (%1)	22.00	2.0194	0.2769	3.30	86.29	
3	40 (%1.75)	31	2.1122	0.4142	22.50	80.39	

Test-1 : Referans Numune
Test-2 : Enjeksiyon İle Güçlendirilen Referans Numune
Test-3 : Yaylar İle Güçlendirilen Numune

Referans numune en büyük yanar yük taşıma kapasitesine %1.40 ötelenme oranında ulaşmakta ve %3.50 ötelenme oranına ulaşıldığında %40 dayanım kaybetmektedir. %3.50 ötelenme oranında ise başlangıç rijitliği %87.40 değerinde azalmaktadır. Enjeksiyon ile güçlendirilen referans numune en büyük yanar yük taşıma kapasitesine %1.00 ötelenme oranında ulaşmakta ve %3.50 ötelenme oranına ulaşıldığında %3.30 dayanım kaybetmektedir. %3.50 ötelenme oranında ise başlangıç rijitliği %86.29 değerinde azalmaktadır. Yay elemanlar ile güçlendirilen numune en büyük yanar yük taşıma kapasitesine %1.75 ötelenme oranında ulaşmakta ve %3.50 ötelenme oranına ulaşıldığında %22.50 dayanım kaybetmektedir. %3.50 ötelenme oranında ise başlangıç rijitliği %80.39 değerinde azalmaktadır.

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Çalışmada, deneysel yöntemler ile yay tipi sönümleyiciler kullanılarak geliştirilen güçlendirme yönteminin rüzgar türbini temeline ait gömülü halka-temel bağlantısı yapısal davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Ayrıca mevcut rüzgar türbini kule-temel bağlantısını güçlendirmek için sıklıkla tercih edilen boşlukların enjeksiyon ile doldurulması yöntemi de hasar verilen referans numuneye uygulanmış ve sonrasında testler tekrarlanarak enjeksiyon ile yapılan güçlendirme işleminin temel üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Bu araştırma çalışmasının temel katkıları ve önemli bulguları aşağıda başlıklar halinde sıralanmıştır:

- Tüm ötelenme oranları için yay elemanlar ile güçlendirilen numunenin rijitliği diğer iki duruma göre daha fazladır.
- Enjeksiyon reçinesi ile yapılan güçlendirme işlemi referans numunenin %3.50 ötelenme oranı sonundaki yük taşıma kapasitesini (yaklaşık 20 kN) korumasını sağlamıştır (yani sistem kaldığı noktadan kapasite düşüşü olmadan çalışmaya devam edebilmektedir).
- Enjeksiyon reçinesi ile güçlendirilen numunede %2.75 ötelenme oranına kadar bir önceki testte oluşan mevcut çatlaklarda herhangi bir açılma ve yeni çatlak oluşumu gözlenmemiştir. %3.50 ötelenme oranına ulaşıldığında bir önceki deneyde oluşan ve enjeksiyon ile kapatılan çatlaklarda açılmalar gözlenmiştir.
- Enjeksiyon reçinesi ile yapılan işlemin mevcut çatlakları güçlendirdiği fakat sistemin geneli üzerinde kapasite artışı sağlamadığı belirlenmiştir.
- Enjeksiyon reçineleri vb. kimyasallar ile yapılan işlemlerin rüzgar türbini temelleri üzerinde güçlendirmeden ziyade onarıcı etkisinin olduğu yapılan çevrimsel yükleme testleri sonuçlarından görülmektedir.
- Yay elemanlar kullanılarak geliştirilen güçlendirme yönteminin sistem rijitliğini, sünekliğini ve yük taşıma kapasitesini arttırdığı yapılan çevrimsel yükleme testleri sonucunda belirlenmiştir.

Teşekkür

GENOSER Yapı Mühendisliği Ofisi'nin laboratuvar testleri süresi boyunca sağladığı finansal ve teknik destek için çok teşekkür ederiz. Test hazırlıklarında yardımları için Prof. Dr. Emre ERCAN' na, İnşaat Teknikeri Recep GÖZTEPE' ye, Dr. Recep SUK'a ve İnşaat Yüksek Mühendisi Özgür GİRGIN'ne teşekkür ederiz. Ayrıca 1507-KOBİ AR-GE Başlangıç Destek Programı kapsamında çalışmayı destekleyen TÜBİTAK' a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- ACI Committee (2005) Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary, American Concrete Institute, Michigan ABD
- Bai X, He M, Ma R, Huang D (2017) "Structural Condition Monitoring of Wind Turbine Foundations", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*, 170(3), 116-134
- Chen J, Xu Y, Li J (2020) "Numerical Investigation of the Strengthening Method by Circumferential Prestressing to Improve the Fatigue Life of Embedded-Ring Concrete Foundation for Onshore Wind Turbine Tower", *Energies*, 13(3), 533
- Chen J, Li J, Li Q, Feng, Y (2021) "Strengthening Mechanism of Studs for Embedded-ring Foundation of Wind Turbine Tower", *Energies*, 14(3), 710
- Genç M, (2017) "Rüzgar Enerji Sektöründe Kule ve Temel Teknolojileri", *Proceedings of the 4 İzmir Rüzgar Sempozyumu ve Sergisi*, İzmir, Türkiye, 28-30
- Hassanzadeh, M (2012) "Cracks in Onshore Wind Power Foundations: Causes and Consequences", *Elforsk*, 11(56), 68
- Jeong Y J, Park M S, Song S H, Kim J (2020) "Numerical Evaluation of Structural Safety for Aged Onshore Wind Foundation to Extend Service Life", *Applied Sciences*, 10(13), 4561
- Mohamed W, Austrell P E (2018) "A Comparative Study of Three Onshore Wind Turbine Foundation Solutions", *Computers and Geotechnics*, 94, 46-57

İKİ KATLI HAFİF ÇELİK DUVARLARIN YATAY YÜK DAVRANIŞI

SEISMIC BEHAVIOR OF TWO-STORY COLD-FORMED STEEL SHEAR WALLS

Eray BARAN¹, Cem TOPKAYA², Barış Mert PEHLİVAN³

ÖZET

Hafif çelik yapı sistemlerinin deprem davranışlarının değerlendirilmesi konusunda yürütülmüş olan bir proje kapsamında, OSB levhalarla kaplanmış iki katlı hafif çelik duvarların yatay yük altındaki davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Sekiz adet tam ölçekli duvar numunesi çevrimsel yükleme altında test edilmiştir. Ülkemizde ve dünyada hafif çelik yapılarda kullanılan iskelet sistemlerini temsil etmek üzere alt ve üst kat duvar panelleri arasında üç farklı detay deney numunelerinde kullanılmıştır. Deney sonuçları, katlar arası bağlantı bölgesinin sistem davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Hafif çelik duvar, Deprem performansı

ABSTRACT

As part of an extensive research project conducted to evaluate the seismic behavior of cold-formed steel structural systems, the lateral load response of two-story cold-formed steel shear walls sheathed with OSB panels was experimentally investigated. Eight full-scale wall specimens were tested under reversed cyclic loading. In an attempt to represent the framing systems commonly used in cold formed steel structures, three different detailing configurations between the lower- and upper-story wall panels were incorporated into the test specimens. The experimental results demonstrate that the inter-story connection region has a significant influence on the overall system behavior.

Keywords: Cold-formed steel wall, Seismic performance

GİRİŞ

Hafif çelik yapı sistemleri, özellikle düşük ve orta katlı yapıların inşasında giderek artan bir hızda tercih edilmektedir. Bu sistemlerin hafifliği, yüksek dayanım/ağırlık oranı ve önüretimli yapım yöntemine uygunluğu önemli avantajlar sunmaktadır. Hafif çelik yapılar, farklı kesit şekillerine sahip çelik profillerden oluşturulan çerçevelerin birleştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Genellikle C-kesitli olan bu profiller, kalınlığı 0.8 ile 2.0 mm arasında değişen çelik sac malzemenin makinalar tarafından bükülmesi ile oluşturulmaktadır. Hafif çelik profillerin birleştirilmesiyle oluşturulan çerçeveler kaplama levhaları ile kaplanarak duvar panelleri oluşturulmaktadır. Dünya genelinde sektörde en yaygın olarak kullanılan kaplama malzemesi OSB (oriented strand board) olarak adlandırılan ve temel olarak işlenmiş ve sıkıştırılmış ahşap parçalarından oluşan bir malzemedir. Kaplamaların hafif çelik elemanlara sabitlenmesi için yaygın olarak kullanılan yöntem vidalamadır.

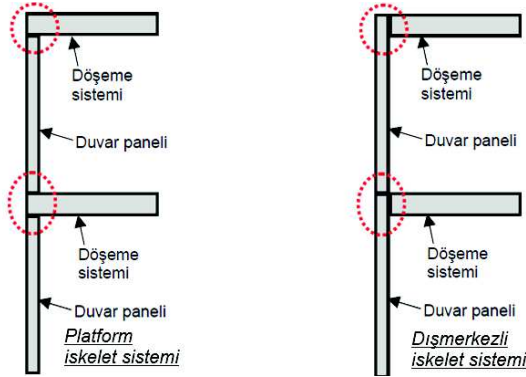
¹ Prof. Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, erayb@metu.edu.tr

² Prof. Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, ctopkaya@metu.edu.tr

³ Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, pmert@metu.edu.tr

Diğer yapı sistemlerinde olduğu gibi, hafif çelik yapı sistemlerinde de temel prensip, döşeme düzleminde oluşan yatay ve düşey yüklerin düşey taşıyıcı elemanlara (duvar panellerine) ve daha sonra da temel sistemine güvenli bir şekilde aktarılmasıdır. Duvar panellerini oluşturan hafif çelik dikme elemanları yatay yük taşıyıcı sistemin parçası olmakla birlikte düşey yüklerin taşınmasından da sorumludur. Bunun yanında kaplama plakaları yatay yüklerin karşılanmasında etkin rol oynamaktadır. Yapıya etki eden yatay yükler, duvar panellerinin tabanında yatay kesme kuvvetleri ve düşey çekme kuvvetleri oluşturur. Bu kesme ve çekme kuvvetlerinin temel sistemine aktarılması için ankraj elemanları kullanılmaktadır.

Hafif çelik yapı sistemlerinin bileşenleri arasında kullanılan bağlantı detayları yapı sisteminin deprem performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu bağlantılardan bir tanesi komşu katlardaki duvar panelleri arasında kullanılan bağlantılardır. Döşeme düzleminde oluşan yatay yüklerin ve döşemeye dik düzlemde oluşan düşey yüklerin duvar panellerine aktarılabilmesi için döşeme ile duvar panelleri arasındaki bağlantı bölgesinde yeterli bir yük aktarma mekanizmasının sağlanmış olması gerekmektedir. Üst üste yerleştirilmiş duvar panelleri ve döşeme sisteminin oluşturulmasında dünyada genel olarak kullanılan iki farklı iskelet sistemi mevcuttur. Şekil 1’de gösterilen bu sistemler platform ve dışmerkezli iskelet sistemleri olarak adlandırılmaktadır. Türkiye’de faaliyet gösteren firmalar tarafından yaygın olarak platform iskelet sistemi kullanılırken, özellikle ABD’de dışmerkezli iskelet sistemi sık tercih edilen sistemdir. Bu iki sistem arasındaki başlıca fark, platform iskelet sisteminde duvar panelleri kat seviyelerinde süresiz olup her bir kat seviyesindeki döşeme sistemi duvar panelinin üzerine otururken, dışmerkezli iskelet sisteminde ise döşemenin taşıyıcı hafif çelik elemanları duvar panellerine yandan bağlanmakta ve bu durum bir dışmerkezlik oluşturmaktadır. İki çerçeve sistemi arasındaki bu farklılıklar yapısal sistem içerisinde yük aktarım mekanizmalarını doğrudan etkileyerek yapının yatay yük altındaki davranışında önemli değişimlere yol açabilmektedir.



Şekil 1. Hafif çelik bina sistemlerinde kullanılan iskelet sistemleri

Hafif çelik yapı sistemlerinin deprem davranışlarının değerlendirilmesi konusunda Orta Doğu Teknik Üniversitesinde yürütülmüş olan geniş kapsamlı bir proje içerisinde, OSB levhalarla kaplanmış iki katlı hafif çelik duvarların yatay yük altındaki davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, hem duvarın hem de dışmerkezli iskelet sistemi göz önüne alınarak kurgulanmış iki katlı duvar paneli numuneleri test edilmiş ve duvarların yatay yük altındaki davranışları incelenmiştir. Bu deneysel çalışmanın temel amacı, iki katlı hafif çelik duvar sistemlerinde iskelet sistemi, kaplama düzeni ve katlar arası bağlantı detaylarının sistem davranışı üzerindeki etkilerini deneysel olarak ortaya koymaktır. Özellikle katlar arası bağlantı bölgesinde oluşan yük aktarım ve deformasyon mekanizmaları detaylı olarak incelenmiştir.

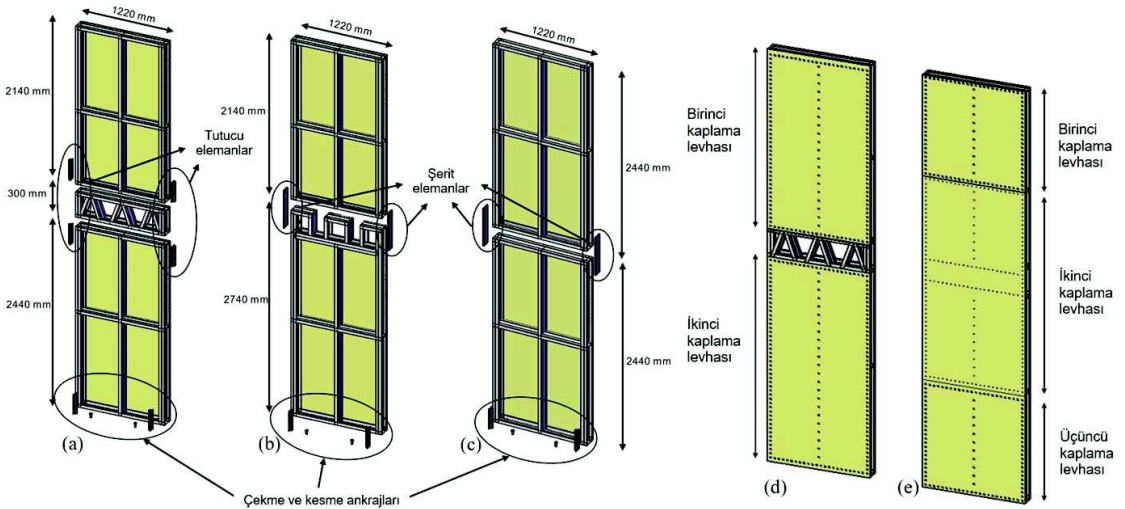
DENEYSEL PROGRAM

İki katlı duvarların incelendiği deney programı kapsamında sekiz adet 1.22 m genişliğinde ve 4.88 m yüksekliğinde tam ölçekli iki katlı duvar numunesi test edilmiştir. Numunelerde kullanılan deney değişkenleri Tablo 1’de özetlenmiştir. Numuneler, Şekil 2’de gösterilen üç farklı iskelet düzenlemesi kullanılarak üretilmiştir. P1-1, P1-2 ve P1-3 numunelerinde platform iskelet detayı ile birlikte birinci

ve ikinci kat duvar panelleri arasında hafif çelik profillerden üretilmiş bir kafes dolgu kirişi kullanılmıştır. Ülkemizde hafif çelik yapılarda kullanılmakta olan bir döşeme bağlantısı detayı P2-1, P2-2 ve P2-3 numunelerinde kullanılmıştır. Bu detayda, birinci kat duvar panelinin üst kısmında döşeme kirişlerinin yerleştirilmesi için yuvalar bırakılmıştır. D-1 ve D-2 numuneleri dışmerkezli iskelet yapım yöntemini temsil etmekte olup, ikinci kat duvar paneli doğrudan birinci kat panelinin üzerine oturmaktadır.

Tablo 1. Deneysel numunelerin özellikleri

Numune	İskelet Sistemi	Kaplama Levhası	Vida Aralığı (mm)
P1-1	Platform – Kafes Dolgu Elemanı	Tek Taraflı	150/300
P1-2	Platform - Kafes Dolgu Elemanı	İki Taraflı	50/100
P1-3	Platform - Kafes Dolgu Elemanı	Tek Taraflı + OSB Bağlantısı	150/300
P2-1	Platform –Yuvalı Detay	Tek Taraflı	150/300
P2-2	Platform –Yuvalı Detay	İki Taraflı	50/100
P2-3	Platform –Yuvalı Detay	Tek Taraflı + OSB Bağlantısı	150/300
D-1	Dışmerkezli	Tek Taraflı	150/300
D-2	Dışmerkezli	İki Taraflı	50/100



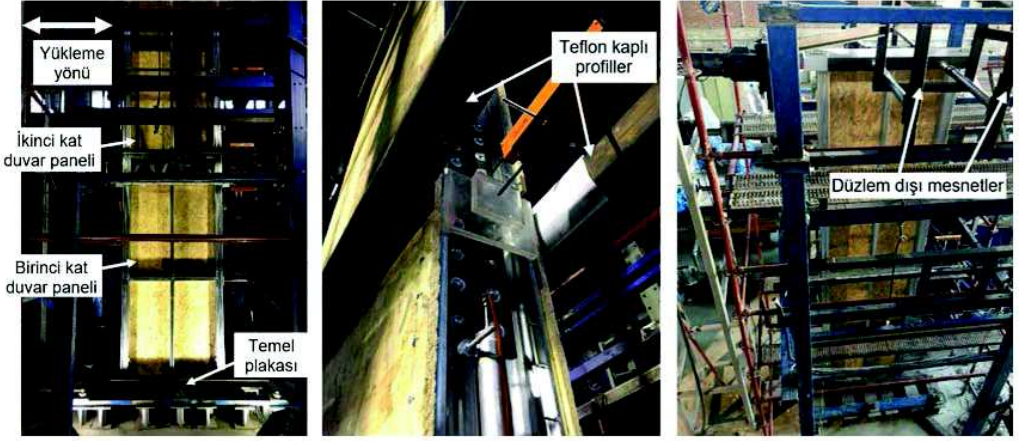
Şekil 2. Deneysel numunelerinde kullanılan duvar detayları ve kaplama düzenlemeleri:

- (a) birinci platform iskelet detayı; (b) ikinci platform iskelet detayı; (c) dışmerkezli iskelet detayı; (d) her bir panelin bireysel olarak kaplanması durumu; (e) birinci ve ikinci kat panelleri arasında kaplama levhası ile süreklilik sağlanması durumu

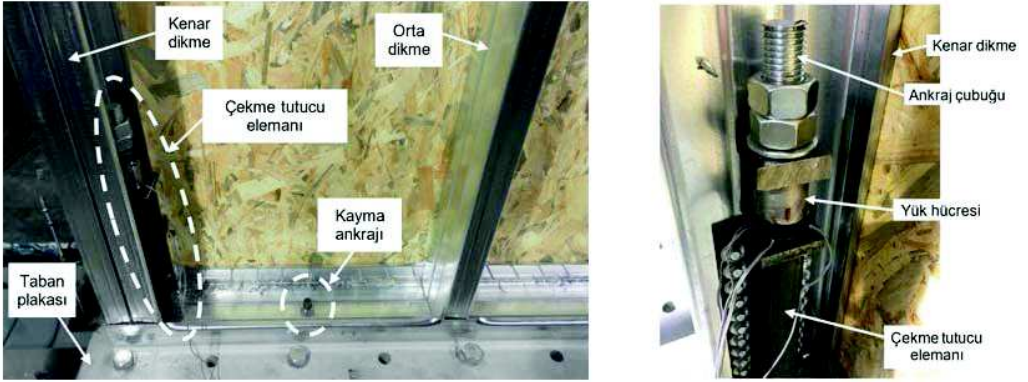
Duvar panellerinin imalatında kullanılan hafif çelik çerçeveler 140 mm genişliğe, 1,2 mm et kalınlığına sahip C-profillerden üretilmiştir. Profillerin üretiminde kullanılan çelik malzemenin akma dayanımının minimum 350 MPa olduğu üretici tarafından bildirilmiştir. 11 mm kalınlığındaki OSB kaplama levhalarını hafif çelik profillere sabitlemek için piyasada bu amaçla yaygın olarak kullanılan 4,2 mm çapında ve 25 mm uzunluğuna matkap uçlu vidalar kullanılmıştır.

İlgili Amerikan ve Türk yönetmeliklerinde belirtilen değerler dikkate alınarak, duvar numunelerinde kullanılan vida aralıkları 150/300 mm ve 50/100 mm olarak belirlenmiştir. Bu vida aralıkları için belirtilen ilk rakam kaplama levhası kenarlarında (kenar dikmeler, alt başlık ve üst başlık) kullanılan vida aralığını, ikinci rakam ise kaplama levhası ortasındaki (orta dikme) vidalar için kullanılan aralığı ifade etmektedir. Duvar panellerinin en yüksek ve en düşük yatay kesme kuvveti talebi seviyelerindeki davranışlarını incelemek amacıyla, 150/300 mm vida aralığı kullanılan numunelerde tek taraflı OSB kaplama, 50/100 mm vida aralığı kullanılan numunelerde ise iki taraflı

OSB kaplama uygulanmıştır. P1-3 ve P2-3 numunelerinde, bir OSB levhası alt ve üst duvar panellerinin çerçevelerine sabitlenmiş (Şekil 2(e)) ve bu sayede iki duvar paneli arasında bu şekilde de bir süreklilik sağlanması amaçlanmıştır. Alt ve üst duvar panelleri arasındaki kuvvet aktarımı için çelik tutucu elemanlar ve çelik şerit elemanlar kullanılmıştır.

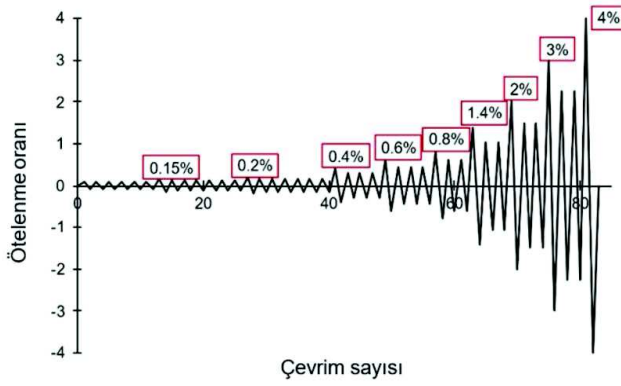


Şekil 3. Yükleme düzeneği görüntüleri



Şekil 4. Duvar tabanında çekme tutucu elemanlarıyla kayma ankrajlarının konumu ve çekme tutucu elemanlarında oluşan kuvvetin yük hücresi ile ölçülmesi

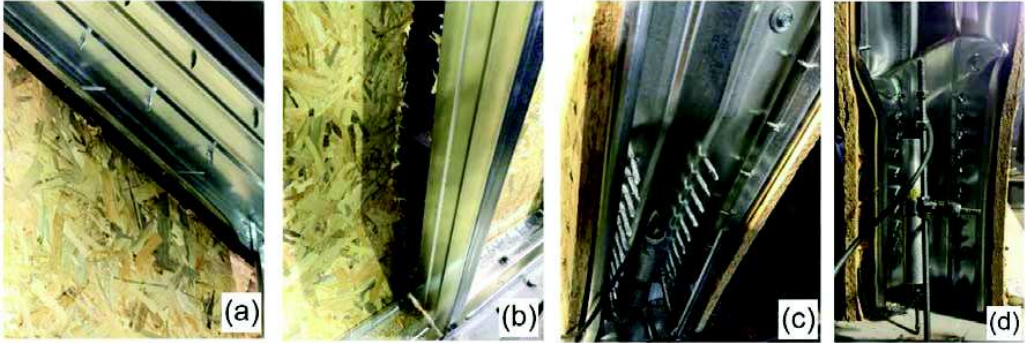
Duvar numuneleri, detayları Şekil 3'de verilen yükleme düzeneği kullanılarak tersinir tekrarlı yükleme altında test edilmiştir. Duvarlar, laboratuvarın döşemesine bağlanan 20 mm kalınlığında bir çelik temel plakası üzerine yerleştirilmiş ve tepe seviyesinden 300 kN yük kapasiteli bir hidrolik aktüatör aracılığıyla yatay yük uygulanmıştır. Yükün duvarlara aktarılması için ikinci kat duvar panelinin üst başlık profiline vidalarla sabitlenen bir yük dağıtma kirişi kullanılmıştır. Düzlem dışı doğrultuda yanal stabiliteyi sağlamak amacıyla duvarların her iki tarafında mesnet düzenekleri kullanılmıştır. Yükleme testleri boyunca tepe noktasından numuneye uygulanan yük, duvar yüksekliği boyunca altı farklı noktadan yatay yer değiştirme, duvar tabanında kayma ve açılma ölçülmüştür. Ayrıca, duvar tabanında kullanılan çekme tutucu elemanlarında oluşan kuvvet özel olarak üretilen yük hücreleri ile ölçülmüştür (Şekil 4). Tersinir tekrar yükleme, yaklaşık 1 mm/sn yükleme hızıyla ve Şekil 5'de gösterilen CUREE yükleme prokolüne uygun olarak uygulanmıştır. Yükleme, %4 ötelenme oranına ulaşıldığında veya numune göçmesi meydana geldiğinde sonlandırılmıştır.



Şekil 5. Deneylerde kullanılan CUREE yükleme protokolü

DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Duvar panellerinde gözlenen tipik hasar mekanizmaları Şekil 6'da gösterilmektedir. Tek taraftan kaplanmış duvar panellerinde baskın göçme mekanizması bağlantı vidalarının eğilmesi ve sıyrılması şeklinde gerçekleşmiştir. Buna karşılık, çift taraftan kaplanan duvar panellerinde oluşan temel göçme mekanizması hafif çelik dikme elemanlarının tabanındaki lokal burkulma/buruşmadır. Alt ve üst duvar panelleri arasında kullanılan detaya bağlı olarak bu bölgede ilave deformasyonlar oluşmuştur (Şekil 7).



Şekil 6. Duvar panellerinde oluşan temel hasar tipleri: (a) vida dönmesi, (b) vida başının OSB kaplamadan kurtulması; (c) hafif çelik dikme elemanında lokal burkulma başlangıcı; (d) hafif çelik dikme elemanının tabanında lokal burkulma/buruşma

Tüm duvar numunelerinin ölçülen çevrimsel histeresis eğrileri belirgin çevrim sıkışması davranışı sergilemektedir. Bu davranış OSB kaplama levhası ile soğuk hafif çelik çerçeve elemanlar arasında kullanılan bağlantı vidalarının sergilediği lokal eğilme ve ezilme davranışından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, söz konusu davranış hafif çelik çerçevesel ve kaplamalı duvar sistemlerinin karakteristik bir özelliğidir.

Farklı çerçeve detaylarına sahip numunelerden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, ikinci platform iskelet detayının zayıf performansı açıkça ortaya çıkmaktadır. Bu sistemde katlar arası bağlantı bölgesinde deformasyonların yoğunlaştığı ve yük aktarımının etkin şekilde gerçekleşmediği gözlenmiştir. Bu nedenle bu sistemde hem dayanım hem de ötelenme kapasitesi sınırlı kalmıştır. Birinci platform iskelet detayı, dolgu elemanları sayesinde daha dengeli bir yük aktarımı sağlamış ve deformasyon dağılımı daha düzgün olmuştur. Dışmerkezli iskelet sistemi ise duvar sürekliliği sayesinde daha dengeli bir davranış sergilemiştir.



Şekil 7. Duvar bağlantı bölgelerinde oluşan hasarlar

Tablo 2. Duvar numunelerinin yük kapasitesi ve ötelenme değerleri

Numune	Yük Kapasitesi (kN/m)	Maks. Yanal Ötelenme (%)	
		İtme	Çekme
P1-1	11.4	3.9	3.2
P1-2	24.7	3.7	3.7
P1-3	12.8	3.8	4.0
P2-1	10.2	3.0	3.0
P2-2	12.5	2.0	2.0
P2-3	14.2	3.3	3.6
D-1	12.3	3.5	3.0
D-2	25.5	3.0	3.0

Duvar numunelerinin ulaştıkları maksimum yük kapasitesi değerleri ve ötelenme oranları Tablo 2’de verilmektedir. Yuvalı detayın kullanıldığı platform iskelet sistemine sahip olan P2-2 numunesi her iki yön için yalnızca %2 ötelenme oranına ulaşabilmiş, bunun yanında diğer bütün numuneler %3 ötelenme seviyesinin üzerine geçebilmişlerdir. Tek taraflı kaplama ve seyrek vida düzeninin kullanıldığı numunelerin yük kapasitesi değerleri 10.2 kN/m ile 14.2 kN/m arasında değişmektedir. Sık vida düzeninin kullanılması durumunda tek kaplama plakasına karşılık gelen yük kapasitesi değerleri kafes kirişli platform ve dışmerkezli iskelet sistemleri için 12.35 kN/m, yuvalı platform iskelet sistemi için ise 6.25 kN/m olarak gerçekleşmiştir.

Seyrek vida düzeni ile birlikte duvar numunelerinin tek taraftan kaplanmaları durumunda incelenen her üç bağlantı detayı da birbirlerine benzer performanslar sergilemişlerdir. Ancak, sık vida düzeni ile birlikte çift taraflı kaplama kullanılması durumunda bağlantı bölgesindeki kuvvet talebi artmış, bunun sonucu olarak da kullanılan üç bağlantı bölgesi detayının arasında performans farklılıkları ortaya çıkmıştır. Bu durumda kafes dolgu elemanlı platform iskelet sistemi ile dışmerkezli iskelet sistemi detayları birbirlerine benzer performanslar sergilemiş, ancak P2-2 numunesinde kullanılan yuvalı platform iskelet sistemi detayı oldukça başarısız kalmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (proje kodu: 115M234) ve Orta Doğu Teknik Üniversitesi (proje kodu: GAP-303-2018-2682 ve proje kodu: DKT-303-2018-3756) tarafından desteklenmiştir.

DEPREM ETKİSİ ALTINDA BETONARME MERDİVEN SİSTEMLERİNDE HASARIN ÖNLENMESİNE YÖNELİK DENEYSSEL ARAŞTIRMA GEREKSİNİMİ

NEED FOR EXPERIMENTAL RESEARCH ON DAMAGE PREVENTION IN REINFORCED CONCRETE STAIR SYSTEMS UNDER SEISMIC LOADING

Murat BİKÇE¹, Engin EMSEN² ve M. Musab ERDEM³

ÖZET

Betonarme merdiven sistemlerinin deprem sonrası tahliye ve erişilebilirliğin sürekliliği açısından kritik bir bileşen olduğu değerlendirilmektedir. Saha gözlemlerinde, ana taşıyıcı sistemde yaygın hasar oluşmadığı durumlarda dahi merdivenlerde yerel ve orantısız hasarların gelişebildiği; bunun da can güvenliği ve kullanım sürekliliği açısından risk oluşturabildiği görülmektedir. Bu bildiride, 2023 Kahramanmaraş Depremleri sonrası saha gözlemleri ile literatürde raporlanan deneysel/sayısal bulgular birlikte değerlendirilerek merdiven hasarları mekanizma-odaklı biçimde sınıflandırılmıştır. Hasarlar; (i) görelî kat ötelenmesine uyumsuz rijit uç bağlantılar, (ii) merdivenin çerçeve içinde diyagonal payanda benzeri çalışması, (iii) kol-sahanlık bölgelerinde kesme baskın hasar ve beton kabuk atmaları, (iv) yetersiz oturma/mesnet detayı nedeniyle yerinden çıkma ve (v) malzeme-donatı detaylandırma/işçilik kusurları başlıkları altında tartışılmıştır. Ayrıca, merdivenin ana sistemden kontrollü biçimde ayrıştırılmasını hedefleyen kayıcı/izole mesnet ve hareket derzi esaslı düşük-hasar yaklaşımının, yük aktarım yolunu düzenleyerek taleplerin azaltılmasına katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir. Bildiri kapsamında, Türkiye’de mevcut uygulamada görülen boşluklar ile deneysel çalışma ve imalat detayı geliştirilmesine yönelik araştırma gereksinimi teknik gerekçeleriyle ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Betonarme merdiven; Deprem hasarı; Görelî kat ötelenmesi; Diyagonal payanda etkisi; Düşük-hasar detay

ABSTRACT

Reinforced concrete stair systems are considered critical for maintaining post-earthquake evacuation and accessibility. Field observations indicate that localized and disproportionate damage may develop in stair systems even when widespread damage is not observed in the primary structural system, which may threaten life safety and functional continuity. In this paper, staircase damage is classified in a mechanism-oriented manner by synthesizing post-event field observations from the 2023 Kahramanmaraş Earthquakes with experimental and numerical findings reported in the literature. Damage mechanisms are discussed under the following headings: (i) rigid end connections incompatible with interstory drift demands, (ii) the staircase acting as a diagonal strut-like element within the frame, (iii) shear-dominated damage and concrete spalling in flight-landing regions, (iv) unseating due to insufficient seating/support details, and (v) deficiencies in material quality, reinforcement detailing, and workmanship. Furthermore, a low-damage approach based on sliding/isolated supports and movement joints—

¹ Profesör Doktor, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay, murat.bikce@iste.edu.tr

² Doktor Öğretim Üyesi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, eemsen@akdeniz.edu.tr

³ Doktor Öğretim Üyesi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay, musab.erdem@iste.edu.tr

aimed at the controlled separation of the stair system from the main structure—is considered capable of regulating the load path and reducing demands. Within this framework, gaps in current practice in Türkiye and the need for experimental research and constructible detailing are presented with technical justification.

Keywords: Reinforced concrete stair system; Seismic damage; Interstory drift; Diagonal strut effect; Low-damage detailing

GİRİŞ

Çok katlı yapılarda deprem sonrası kullanılabilirliğin sürekliliği açısından merdiven sistemlerinin kritik bir bileşen olduğu değerlendirilmektedir. Buna karşın, tasarım pratiğinde merdivenlerin çoğunlukla yalnızca düşey yükler altında çalışan ikincil eleman gibi ele alındığı; yatay yer değiştirme talepleri ile bağlantı davranışının yeterince irdelenmediği görülmektedir. Bu yaklaşımın, görelî kat ötelenmeleri altında merdiven-çerçeve etkileşimi kaynaklı ek iç kuvvet taleplerine ve yerel gevrek hasarlara zemin hazırlayabildiği literatürde gösterilmiştir (Li ve Mosalam, 2013; Mir ve Rai, 2020).

Literatürde merdiven sistemlerine ilişkin çalışmaların iki ana ekseninde yoğunlaştığı görülmektedir: (i) merdivenin yapı sistem dinamiği ve iç kuvvet dağılımına etkisinin sayısal olarak değerlendirilmesi (Mir ve Rai, 2020; Wen vd., 2022) ve (ii) merdivenin ana sistemden kontrollü ayrıştırılması amacıyla kayıcı/izole mesnetli düşük-hasar sistemlerin geliştirilmesi (Zhang vd., 2022; Zhang vd., 2024a; Zhang vd., 2024b). Bununla birlikte, Türkiye’de merdiven sistemlerine özgü deneysel veri üretiminin sınırlı olduğu; uygulamaya doğrudan aktarılacak detay kılavuzlarının ve performans hedeflerinin yaygınlaşmadığı değerlendirilmektedir. Bu bildiri, Şekil 1’de görüldüğü üzere tekrar eden hasar mekanizmalarının sistematik biçimde ortaya konulması ve uygulanabilir düşük-hasar detay yaklaşımı için deneysel çalışma ihtiyacının teknik temelde gereçlendirilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 1. Depremler sonrası betonarme merdivenlerde gözlenen tipik göçme/işlev kaybı örnekleri.

KONUyla İLGİLİ ARAŞTIRMALAR VE SON DURUM

Deprem sonrası merdiven hasarlarının, yalnız eleman dayanım yetersizliği ile değil, büyük ölçüde görelî kat ötelenmesi uyumsuzluğu ve merdiven-çerçeve etkileşimi ile ilişkili olduğu değerlendirilmektedir. Wenchuan Depremi sonrasında yapılan çalışma kapsamında merdiven bileşenlerinde kesme-baskın hasarların ve birleşim bölgelerinde ciddi tahribatın raporlandığı görülmektedir (Li ve Mosalam, 2013).

Yerleşik merdivenlerin yapı periyodunu azaltabildiği ve dinamik talepleri artırebildiği; bunun da merdiven çevresindeki kolon/kiriş taleplerini etkileyebildiği deneysel ve parametrik olarak ortaya konmuştur (Mir ve Rai, 2020).

Bağlantı detaylarının, merdivenin çerçeveye yatay yük aktarma düzeyini belirlediği; kayıcı bağlantı gibi çözümlerle etkileşimin azaltılabildiği ve sistem tepkilerinin değişebildiği gösterilmiştir (Wen vd., 2022).

Son yıllarda, merdivenin ana sistemden kontrollü ayrıştırılmasına dayalı düşük-hasar çözümler üzerinde yoğunlaşıldığı görülmektedir. Bu yaklaşımda, yük aktarım yolunun sınırlandırılması ve görelî kat ötelenmesinin merdiven üzerinde oluşturduğu zorlamanın azaltılması hedeflenmektedir (Zhang vd., 2022; Zhang vd., 2024a; Zhang vd., 2024b). Bu gelişmenin, merdiven hasarının tekrarlayan karakterini azaltmaya yönelik önemli bir eğilim oluşturduğu değerlendirilmektedir.

HASAR MEKANİZMALARI (MEKANİZMA-ODAKLI SINIFLAMA)

Görelî Kat Ötelenmesine Uyum Eksikliği

Şekil 2’de görüleceği üzere, iki kata rijit bağlanan merdivenlerde, görelî kat ötelenmesi altında uç bölgelerde basınç-çekme tersinmesi ve kesme taleplerinin büyüebildiği; bunun birleşim bölgelerinde çatlak yoğunlaşmasına ve yerel gevrek hasara neden olabildiği değerlendirilmektedir (Li ve Mosalam, 2013).



Şekil 2. Görelî kat ötelenmesine uyumsuz rijit merdiven bağlantılarına bağlı hasara dair görseller.

Diagonal Payanda Benzeri Etki

Merdiven kolu ve sahanlıkların çerçeve içinde diyagonal eleman gibi çalışmasıyla, çerçeve rijitliğinin artabildiği ve iç kuvvet dağılımının değişebildiği literatürde gösterilmiştir (Mir ve Rai, 2020; Wen vd., 2022). Bu etkinin özellikle sahanlık kotlarında komşu kolon/kirişlerde talep yığılmasına yol açabildiği değerlendirilmektedir (Şekil 3a).

Kol-sahanlık Bölgelerinde Kesme Baskın Hasar ve Kabuk Atmaları

Kol-sahanlık birleşimleri ve kısa davranışa zorlanan bölgelerde eğik kesme çatlaklarıyla beton kabuk atmasının gelişebildiği; hasarın donatı açığa çıkması ve yerel ezilmeyle ilerleyebildiği rapor edilmiştir (Li ve Mosalam, 2013).



Şekil 3. (a) Görelî kat ötelenmesine uyumsuz rijit merdiven bağlantılarına; (b) Donatı detaylandırma ve işçilik kusurlarına bağlı hasara dair görseller.

Mesnet Kaybı/Yerinden Çıkma

Özellikle oturtmalı detaylarda yetersiz oturma boyunun ve kısıtlayıcı temasların, büyük ötelenmeler altında yerinden çıkma riskini artırabildiği; düşük-hasar çözümlerde bu riskin kontrol edilmesinin temel hedeflerden biri olduğu değerlendirilmektedir (Zhang vd., 2024a; Zhang vd., 2024b).

Malzeme–Donatı Detaylandırma ve İşçilik Kusurları

Yetersiz ankraj/bindirme boyu, seyrek sargı donatısı, eksik/hatalı donatı detaylandırma (Şekil 3b), düşük beton kalitesi ve soğuk derz gibi kusurların, yukarıdaki mekanizmaların daha erken ve daha gevrek biçimde ortaya çıkmasına zemin hazırlayabildiği değerlendirilmektedir. Bu hususun, performans hedeflerinin sağlanmasında kritik olduğu FEMA P-58 yaklaşımıyla uyumlu görülmektedir (FEMA, 2018).

MEVZUAT VE UYGULAMA BAĞLAMLI (ULUSAL/ULUSLARARASI)

Türkiye’de deprem tasarım çerçevesi TBDY 2018 ile tanımlanmakta; performans hedefleri ve tasarım yaklaşımları bu düzen içerisinde ele alınmaktadır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018). Bununla birlikte, merdiven sistemlerine özgü ayrıntılı deprem performans hükümlerinin sınırlı olduğu; merdiven–çerçeve etkileşimi ve görelî kat ötelenmesi uyumu gibi konuların çoğunlukla proje detayına bırakıldığı değerlendirilmektedir.

Uluslararası uygulamada ise, merdivenlerin “tahliye bileşeni” olarak ele alınmasına yönelik rehberlerin bulunduğu görülmektedir. Örneğin, Yeni Zelanda’da yayımlanan Uygulama Tavsiyelerinde çok katlı mevcut binalarda merdivenlerin deprem güvenliğinin ayrıca kontrol edilmesi gerektiği belirtilmektedir (MBIE, 2011).

Benzer şekilde, ara tasarım rehberleri ile geleneksel sistemlerin tasarımına yönelik yönlendirmeler sunulmuştur (SESOC, 2022). Bu belgelerin, merdiven performansının “kullanılabilirlik” odağında ele alınmasına katkı sağladığı değerlendirilmektedir.

TARTIŞMALAR

Deneysel Çalışma Gereksiniminin Teknik Gerekeçesi

Literatürde merdiven davranışının çoğunlukla sayısal çalışmalarla irdelendiği; bağlantı detayı, görelî kat ötelenmesi ve yük aktarım yolunun belirleyici olduğu ortaya konmuştur (Mir ve Rai, 2020; Wen vd., 2022).

Buna karşın, Türkiye’de yaygın uygulanan yerinde dökme merdiven-çerçeve detaylarına ilişkin tam ölçekli çevrimsel deney verisinin sınırlı olduğu; bu nedenle tasarımda kullanılan kabullerin doğrulanmasının gerekli olduğu değerlendirilmektedir.

Deney ve Adımları

Aşağıda belirtilen deney ve adımlarının, merdiven sistemlerinde düşük-hasar oluşması ile can ve mal kayıplarımızın minimize edilmesini amaçlayan, uygulanabilir detay önerilerinin geliştirilmesine katkı sağlayabileceği değerlendirilen, ulusal deprem yönetmeliğinin (TBDY, 2018) performans hedefleriyle uyumlu biçimde veri sağlama potansiyelinin oluşabileceği düşünülmektedir.

Bileşen Düzeyi Çevrimsel Deneyler (Kol-Sahanlık Birleşimi)

- Görelî kat ötelenmesini temsil eden yatay çevrimsel deplasman uygulanması,
- Sabit düşey yük altında (kullanım yükü) eşzamanlı deney yapılması,
- Hasar türünün (kesme/eğilme, kabuk atması, donatı akması) ve rijitlik/enerji sönümü değışiminin izlenmesi (Li ve Mosalam, 2013.)

Sistem Düzeyi Alt-Çerçeve Deneyleri (Merdiven-Çerçeve Etkileşimi)

- Merdivenli ve merdivensiz alt-çerçeve konfigürasyonlarının karşılaştırılması,
- Merdivenin diyagonal payanda benzeri etkisinin ve kolon/kiriş taleplerinin ölçülmesi,
- Bağlantı detay varyantlarının (rijit, kayıcı, izole) etkisinin değerlendirilmesi (Mir ve Rai, 2020 ve Wen vd., 2022)

Düşük-Hasar Detay Prototipleri İçin Doğrulama Deneyleri

- Kayıcı/izole mesnet + hareket derzi düzeni içeren prototipin çevrimsel test ile doğrulanması,
- Yerinden çıkma riskinin oturma boyu, sınırlayıcı eleman ve boşluk düzeni ile birlikte değerlendirilmesi,
- Düşük-hasar merdiven sistemlerine yönelik çalışmalarda önerilen prototipin tekrarlı çevrimlerde işlevsel kalma kapasitesinin ölçülmesi (Zhang vd., 2022; Zhang vd., 2024a; Zhang vd., 2024b.)

SONUÇ

Bu bildiriye, deprem etkisi altında betonarme merdiven sistemlerinde gözlenen hasarların tekrar eden mekanizmaları mekanizma-odaklı bir sınıflama ile değerlendirilmiştir. Literatür ve saha gözlemleri birlikte ele alındığında, görelî kat ötelenmesi uyumsuzluğu ve merdiven-çerçeve etkileşiminin, hasarı büyüten ortak paydalardan olduğu değerlendirilmektedir (Li ve Mosalam, 2013; Mir ve Rai, 2020; Wen vd., 2022). Kayıcı/izole mesnet ve hareket derzi esaslı düşük-hasar yaklaşımının, yük aktarım yolunu düzenleyerek hem merdiven hem de komşu çerçeve elemanlarındaki taleplerin azaltılmasına katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir (Zhang vd., 2022; Zhang vd., 2024a; Zhang vd., 2024b).

Türkiye’de bu konuda uygulamaya dönük deneysel veri üretiminin sınırlı olduğu göz önüne alındığında, tam ölçekli çevrimsel deneyler ve prototip doğrulama çalışmalarının gerekli olduğu değerlendirilmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için katkılarından dolayı İskenderun Teknik Üniversitesi ve Akdeniz Üniversitesine teşekkürlerini sunar. Ayrıca, uygulamada çalışan İnşaat Mühendisleri Selman Eskiocak, Servet Demirdağ ve diğer lisansüstü öğrencilerine teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Li, B., ve Mosalam, K. M. (2013). Seismic performance of reinforced-concrete stairways during the 2008 Wenchuan earthquake. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 27(6), 721–730. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000382](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000382)
- Mir, F. U. H., ve Rai, D. C. (2020). Experimental and parametric investigation of effects of built-in staircases on the dynamics of RC buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 49(6), 527–542. <https://doi.org/10.1002/eqe.3251>
- Wen, M., Zhang, Y., Li, Y., ve Chen, X. (2022). Research on seismic performance of reinforced concrete frame structures with beam-type staircases considering different connection details. *Buildings*, 12(8), 1106. <https://doi.org/10.3390/buildings12081106>
- Zhang, C., Ding, C., Zhou, Y., Wang, G., Shi, F., ve Huang, W. (2022). Seismic behavior of prefabricated reinforced concrete stair isolated by high-damping rubber bearings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21, 1548. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01548-z>
- Zhang, C., Huang, Z., Zhou, Y., Wang, G., ve Yu, T. (2024a). Seismic performance of novel low-damage stair system: Precast RC stair isolated with a sliding joint. *Engineering Structures*, 298, 117061. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117061>
- Zhang, Z., Cong, S., Zhang, Y., ve Chen, Y. (2024b). Seismic performance of reinforced concrete stairs with new sliding support. *Structural Concrete*, 25(6), 5071–5088. <https://doi.org/10.1002/suco.202300502>
- FEMA. (2018). *Seismic Performance Assessment of Buildings (FEMA P-58-1)*. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- MBIE. (2011). *Practice Advisory 13: Egress stairs – earthquake checks needed for some*. Ministry of Business, Innovation & Employment, New Zealand.
- SESOC. (2022). *Interim Design Guidance: Design of Conventional Structural Systems (v11)*. Structural Engineering Society New Zealand.
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018)*. Resmî Gazete, 18.03.2018, Sayı: 30364.

KIŞIN BETONARME PLAK İMALATINDA KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON KULLANIMINA İLİŞKİN DENEYSSEL BİR İRDELEME

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE USE OF SELF-COMPACTING CONCRETE FOR REINFORCED CONCRETE SLAB PRODUCTION IN WINTER

Sefa TALAY¹, Ahmet Ferhat BİNGÖL², Dilek OKUYUCU³, Muhammet ŞAHİN⁴,
Burak GEDİK⁵

ÖZET

Bu çalışmada, kendiliğinden yerleşen beton (KYB) ile üretilen numune ve betonarme döşemelerin, yaz ve kış koşullarında (atmosferik yaz, ısıtılmalı ve ısıtmasız kış ortamları) farklı kür sürelerinde (7, 28, 90 gün) mekanik ve yapısal performansı incelenmiştir. Basınç, eğilmede çekme, yarmada çekme ve tek noktali eğilme deneyleri sonuçları; ısıtılmalı kürün yaz koşullarına benzer dayanım sağladığını, ısıtmasız ortamda ise özellikle erken yaşta önemli dayanım kayıpları oluştuğunu göstermiştir. Erken yaş hidrasyon süreci, termokuplarla izlenen sıcaklık-zaman verileriyle değerlendirilmiş; ısıtmasız kış koşullarında hidrasyon ısısının düşük kaldığı, reaksiyonların geciktiği ve bunun dayanım ile rijitlik gelişimini olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Buna karşılık, ısıtılmalı kür hidrasyonu hızlandırarak mekanik ve yapısal performansı iyileştirmiştir. Sonuçlar, özellikle ilk 72 saatin kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), Soğuk hava betonlaması, Hidrasyon davranışı, Yapısal performans

ABSTRACT

In this study, the mechanical and structural performance of self-compacting concrete (SCC) specimens and reinforced concrete slabs produced under summer and winter conditions (ambient summer, heated winter, and unheated winter environments) were investigated at different curing ages (7, 28, and 90 days). The results of compressive strength, flexural tensile strength, splitting tensile strength, and single-point bending tests showed that heated curing provided strength development comparable to summer conditions, while unheated conditions led to significant strength losses, especially at early ages. The early-age hydration process was evaluated using temperature-time data monitored by thermocouples. It was determined that, under unheated winter conditions, the heat of hydration remained limited, reactions were delayed, and this negatively affected strength and stiffness development. In contrast, heated curing accelerated hydration and improved mechanical and structural performance. The findings indicate that the first 72 hours are particularly critical.

¹ Öğretim Görevlisi, Muş Alparslan Üniversitesi, Muş, s.talay@alparslan.edu.tr

² Prof. Dr., Atatürk Üniversitesi, Erzurum, afbingol@atauni.edu.tr

³ Doç. Dr., Erzurum Teknik Üniversitesi, Erzurum, okuyucu@erzurum.edu.tr

⁴ Doktora Öğrencisi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Erzurum, muhammet.sahin65@erzurum.edu.tr

⁵ Araştırma Görevlisi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Erzurum, burak.gedik@erzurum.edu.tr

Keywords: Self-compacting concrete (SCC), Cold weather concreting, Hydration behavior, Structural performance

GİRİŞ

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), yüksek akışkanlığı ve segregasyona karşı direnci sayesinde karmaşık donatıya sahip betonarme elemanların üretiminde önemli avantajlar sağlamaktadır. Vibrasyon gerektirmemesi, uygulama süresini kısaltmakta ve işçilik kaynaklı hataları azaltmaktadır. Bu özellikleriyle KYB, özellikle düşük sıcaklıkların beton kalitesini olumsuz etkileyebildiği kış aylarında üretim sürecini kolaylaştıran bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Literatürde, KYB'nin taze ve sertleşmiş özelliklerinin geleneksel betonlara kıyasla önemli üstünlükler sunduğu belirtilmektedir (Okamura & Ouchi, 2003; EFNARC, 2005; Ozawa vd., 1989).

Soğuk hava koşullarında beton dökümünde en önemli sorunlardan biri, düşük sıcaklıkların hidrasyon sürecini yavaşlatmasıdır. Bu durum priz süresinin uzamasına ve özellikle erken yaş dayanım gelişiminin gecikmesine neden olmaktadır (Freiesleben Hansen & Pedersen, 1977; ASTM C1074, 2019). Geniş yüzeyli yapı elemanlarında betonun çevresel etkilerle temas süresinin artması, donma riskini de beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, uygun kür koşullarının sağlanması büyük önem taşımaktadır.

KYB'nin farklı çevresel koşullar altındaki davranışlarını inceleyen çalışmalar son yıllarda artmıştır. Wang ve ark. (2018), mineral katkıların donma-çözülme dayanımına etkilerini ortaya koyarken, Sadrmomtazi ve Tahmouresi (2012), yüksek sıcaklık koşullarındaki mekanik davranışı incelemiştir. Bununla birlikte, KYB'nin düşük sıcaklık koşullarındaki hidrasyon davranışı ve bunun yapı performansına etkileri üzerine çalışmalar sınırlıdır.

Bu çalışmada, kendiliğinden yerleşen beton kullanılarak hem yaz hem de kış mevsimlerinde üretilen betonarme döşeme elemanlarının davranışları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Farklı kür koşullarının taşıma kapasitesi, rijitlik ve enerji sönümlene gibi yapısal parametreler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu kapsamda ayrıca, erken yaş hidrasyon davranışı sıcaklık gelişimi esas alınarak analiz edilmiş ve farklı kür koşullarının hidrasyon süreci üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur. Bu amaçla, 70×70×15 cm boyutlarında ve Ø5/100 mm hasır donatıyla güçlendirilmiş betonarme panel numuneler hazırlanmış ve belirli kür sürelerinin ardından tek noktali eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar, mevsimsel koşulların KYB ile üretilen betonarme elemanların hem hidrasyon süreci hem de yapısal performansı üzerindeki etkisini kapsamlı şekilde irdeleme imkânı sunmuştur.

MALZEME VE YÖNTEM

Kullanılan Malzemeler ve Karışım Oranları

Araştırmada CEM II/A-LL 42.5 R çimentosu ve %25 oranında uçucu kül içeren kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımı kullanılmıştır. Toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m³ olup su/bağlayıcı oranı 0.45 olarak belirlenmiştir. İnce ve iri agrega olarak doğal nehir agregaları kullanılmıştır. Karışım oranları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Beton Karışım Hesabı

Su/Bağlayıcı	Su (kg)	Çimento (kg)	Uçucu Kül (kg)	İnce Agrega (%55) kg	Kaba Agrega (%45) kg	Kimyasal Katkı (%1) kg
0,45	225	375	125	805	676	5

Numune Hazırlığı ve Kür Koşulları

Beton dökümleri yaz ve kış mevsimlerinde gerçekleştirilmiştir. Kış koşulları, ısıtılmalı ve ısıtılmaması üzere iki farklı kür ortamında incelenmiştir. Kış grubu numuneler, sera naylonu ile kaplanmış kür çadırları içerisinde muhafaza edilmiştir. Isıtılmalı kür ortamında, çadır içerisine yerleştirilen ısıtıcı yardımıyla ortam sıcaklığı $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altına düşmeyecek şekilde kontrol edilmiştir. Isıtılmaması kür ortamında ise herhangi bir ısıtma uygulanmamış ve numuneler çevresel koşullara bağlı olarak değişen sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Her iki durumda da numuneler, döküm sonrası ilk 3 gün boyunca kür çadırı içerisinde tutulmuş, bu sürenin ardından atmosferik ortama alınarak kür işlemine devam edilmiştir. Numuneler 7, 28 ve 90 gün sürelerle kür edilmiştir. Yaz ve kış kür ortamlarına ait görseller Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Yaz ve kış kür ortamlarına ait görseller: (a) yaz grubu, (b-d) kış grubu

Deney Düzenegi

Mekanik davranışı değerlendirmek amacıyla $70\times 70\times 15$ cm boyutlarında ve $\text{Ø}5/100$ mm hasır donatı içeren betonarme plak numuneler hazırlanmıştır. Numuneler tek noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuş ve yük-deplasman ilişkileri elde edilmiştir. Beton mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ayrıca basınç, yarmada çekme ve eğilmede çekme deneyleri gerçekleştirilmiş olup, deneyler ilgili standartlara uygun olarak uygulanmıştır. Deney düzenekleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Deney düzenekleri: (a) beton numuneleri, (b) betonarme plak yükleme sistemi

Sıcaklık takibi için kullanılan ölçüm sistemi

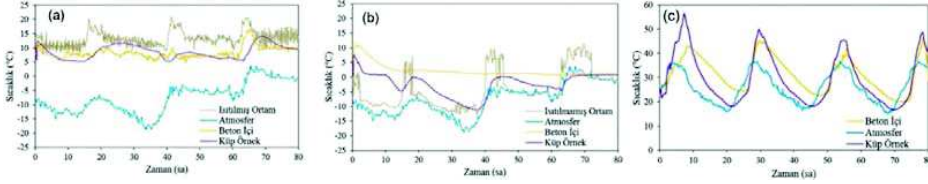
Erken yaş hidratasyon davranışını incelemek amacıyla numunelerin iç sıcaklıkları K-tipi termokupullar ile ölçülmüş ve veriler sürekli olarak kaydedilmiştir. Elde edilen sıcaklık-zaman verileri, hidratasyon sürecinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Sıcaklık Gelişimi ve Hidratasyon Davranışı

Sıcaklık izleme sonuçları, kür koşullarının erken yaş termal davranışı belirgin biçimde etkilediğini göstermektedir. Yaz koşullarında (Şekil 3c) $30\text{--}45\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında tekrarlayan sıcaklık

pikleri hidrasyonu hızlandırırken, ısıtılmış kış ortamında (Şekil 3a) sıcaklık yaklaşık 5 °C civarında sabit kalmıştır. Isıtılmı kış koşullarında (Şekil 3b) ise dış ortam -18 °C'ye kadar düşmesine rağmen beton iç sıcaklıkları daha yüksek kalmıştır. Ayrıca, numune boyutunun önemli olduğu görülmüş; büyük hacimli plaklarda sıcaklık sıfırın altına düşmezken, küçük küp numuneler -10 °C'ye kadar soğumuş ve çevresel etkilerden daha fazla etkilenmiştir. Bu durum, kış koşullarında büyük beton elemanların ısıyı daha iyi koruduğunu ve küçük beton numune sonuçlarının gerçek yapı davranışını yeterince temsil edemeyebileceğini göstermektedir.



Şekil 3. Farklı kür koşulları altında KYB'nin ilk 72 saatlik sıcaklık gelişimi: (a) ısıtılmış kış, (b) ısıtılmı kış ve (c) yaz koşulları

Beton Numune Sonuçlarının Değerlendirilmesi

KYB numunelerinin farklı kür koşullarında yapılan deneyleri, sıcaklığın dayanım gelişimi üzerinde belirleyici olduğunu göstermiştir (Şekil 5). Isıtılmı kış koşullarında düşük sıcaklıklar hidrasyonu yavaşlatarak özellikle erken yaş dayanımlarını düşürmüş, donma riski nedeniyle mikro çatlak oluşumu dayanımı olumsuz etkilemiştir (Huang vd., 2024). Bu kapsamda, betonun erken yaşta yaklaşık 5 MPa basınç dayanımına ulaşması donma hasarının önlenmesi açısından kritik bir eşik olarak kabul edilmektedir (Özcebe vd., 2021). Buna karşılık, yaz ve ısıtılmış kış koşullarında daha hızlı hidrasyonu sayesinde daha yüksek erken yaş dayanımları elde edilmiştir (Cui vd., 2022). Isıtılmı kür, dayanımların yaz koşullarına yakın gelişmesini sağlarken, 90 gün sonund ortamlar arasındaki fark azalmıştır. Sonuç olarak, soğuk havada uygun kür uygulamaları betonun erken ve uzun vadeli performansı için kritik öneme sahip olduğu değerlendirilmiştir. (Cui vd., 2022; Huang vd., 2024; Özcebe vd., 2021).

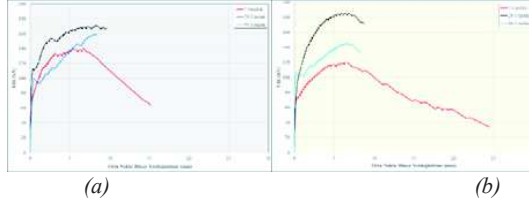


Şekil 3. Farklı kür koşullarında KYB'nin mekanik dayanım gelişim

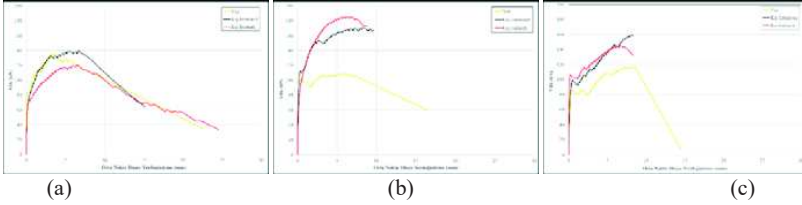
Betonarme Plak Numune Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, yaz ve kış koşullarında üretilen kendiliğinden yerleşen beton (KYB) ile yapılan 70×70×15 cm ölçülerindeki betonarme plakların mekanik davranışları incelenmiştir. Plaklar, çekme bölgesine yerleştirilen Ø5/100 mm hasır donatı ile imal edilmiş, orta noktadan monolitik olarak yüklenmiş ve eğilme davranışları değerlendirilmiştir. Beklendiği üzere betonun eğilmede çekme dayanımı ve çelik donatı akma dayanımı, plakların mekanik performansı üzerinde belirleyici olmuştur (Özcebe vd., 2021).

Kendiliğinden yerleşen beton kullanılarak kışın imal edilen ve sera naylonu koruması uygulanmasına ek olarak ısıtma uygulanmayan ve ısıtma uygulanan betonarme plakların 7, 28 ve 90 gün sonunda gerçekleştirilen yükleme deneyleri sonucunda elde edilen yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri Şekil 6 ve Şekil 7’de sunulmaktadır.



Şekil 6. Kışın kendiliğinden yerleşen beton kullanılarak imal edilen betonarme plaklara ait yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri
(a) Isıtmasız sera çadırı (b) Isıtmalı sera çadırı



Şekil 7. Yazın ve kışın kendiliğinden yerleşen beton kullanılarak imal edilen betonarme plaklara ait yük-orta nokta düşey yer değiştirme grafikleri
(a) 7 Günlük Deneyler (b) 28 Günlük Deneyler (c) 90 Günlük Deneyler

Grafikler üzerinden değerlendirme yapılırken kolaylık sağlaması bakımından muhtelif performans parametrelerinin Tablo 2’de sunulmasında yarar görülmüştür.

Tablo 2. Betonarme döşeme plak test sonuçları

Dökümden Sora Geçen Süre (Gün)	Döküm Koşulları	Maksimum Yükte		Sekant Rijitliği (kN/mm)
		Orta Nokta Düşey Yerdeğiştirme (mm)	Yük (kN)	
7	Yaz	3.56	134.9	37.9
	Kış-Isıtmasız	6.70	139.2	20.7
	Kış-Isıtmalı	6.50	120.2	18.6
28	Yaz	5.99	108.8	18.2
	Kış-Isıtmasız	8.27	170.4	20.6
	Kış-Isıtmalı	6.33	185.2	29.3
90	Yaz	8.40	117.8	14.0
	Kış-Isıtmasız	8.06	159.7	19.8
	Kış-Isıtmalı	6.60	145.4	22.0

Eğilmede çekme dayanımları, yaz koşullarında 2,9–4,8 MPa, kış-ısıtmasız koşullarda 1,5–4,1 MPa ve kış-ısıtmalı koşullarda 2,7–4,8 MPa arasında değişmiştir. Donatı çeliği, yaz dönemi için 629/631 MPa, kış dönemi için ise yüksek dayanımlı çelik olarak 1005/1025 MPa ölçülmüştür; bu farklılık, özellikle 28 ve 90 günlük yük taşıma kapasitelerinde %57–70 artışa yol açmıştır.

Yük-orta nokta düşey yer değiştirme ve sekant rijitlik verileri, erken yaşta yaz koşullarının yüksek rijitlik sağladığını, kış-ısıtmasız koşullarda şekil değişiminin fazla, rijitliğin düşük olduğunu göstermiştir. Isıtmalı kış koşullarında ise rijitlik artmış ve yük kapasitesi yaz koşullarına yaklaşmıştır. 28 ve 90 günlük sonuçlar, ısıtmalı kürün hem erken hem uzun vadeli dayanımı iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Neticede; düşük sıcaklıklarda yapılan beton dökümlerinde uygun ısıtmalı kür

uygulanması, erken yaşta yüksek rijitlik ve dayanım sağlamakta; ısıtmasız kürlerin ise mekanik performansı olumsuz etkilediği görülmüştür.

SONUÇ

Yaz ve kış koşullarında kendiliğinden yerleşen beton (KYB) kullanılarak üretilen betonarme plakların mekanik davranışını inceleyerek farklı kürleme ve donatı koşullarının betonarme plak performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlayan bu deneysel çalışma ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Erken yaşta (7 gün) en yüksek rijitlik yaz koşullarında elde edilmiştir; kış-ısıtmalı kürleme uzun vadede en iyi performansı sağlamıştır.
- Isıtmasız kış kürleri yüksek deformasyon ve düşük rijitlik ile sonuçlanmaktadır.
- Kışta KYB ile yapılan betonarme uygulamalarda, yüksek dayanımlı çelik ve ısıtmalı kürleme birlikte en yüksek taşıma kapasitesini sağlamıştır.
- Kışın yapılacak olan uygulamalarda; uygun kürleme önlemleri alınmadığında erken ve uzun vadede dayanım kayıpları kaçınılmazdır; don tehlikesi olan bölgelerde sıcaklık kontrollü ortam veya yüzey izolasyonu önerilir.
- Beton kür koşulları ve donatı özellikleri birlikte optimize edilerek, düşük sıcaklıklarda KYB ile yapılan dökümlerin yapısal güvenliği ve performansı artırılabilir.

Teşekkür

Bu çalışma, Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 13039 numaralı proje kapsamında sağlanan destek ile gerçekleştirilmiştir. Sağladıkları katkılardan dolayı kurumumuza teşekkür ederiz.

Çalışmanın önemli bir bölümü Erzurum Teknik Üniversitesi laboratuvarlarında yürütülmüş olup, bu süreçte sağladıkları altyapı ve destekten ötürü Erzurum Teknik Üniversitesi Rektörlüğü'ne ve ilgili birim yönetimine içten şükranlarımızı sunarız.

KAYNAKLAR

- ASTM International 2019 *ASTM C1074-19 Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method* ASTM International
- Cui J, Duc Van N, Zhang F, Hama Y 2022 Evaluation of applicability of minimum required compressive strength for cold weather concreting based on winter meteorological factors *Materials* 15(23) 8490
- EFNARC 2005 *The European guidelines for self-compacting concrete Specification production and use*
- Freiesleben Hansen P, Pedersen E J 1977 Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete *Nordisk Betong* 1 19–34
- Huang D, Feng Y, Xia Q, Tian J, Li X 2024 Research on mechanical properties and durability of early frozen concrete A review *Construction and Building Materials* 425 135988
- Okamura H, Ouchi M 2003 Self-compacting concrete *Journal of Advanced Concrete Technology* 1(1) 5–15
- Ozawa K, Maekawa K, Kunishima M 1989 Development of high-performance concrete *Proceedings of the Japan Concrete Institute* 11(1) 699–704
- Özcebe G, Canbay E, Ersoy U 2021 *Betonarme 1 Davranış ve hesap ilkeleri 11 baskı* Evrim Yayınevi
- Sadrmtazi A, Tahmouresi B 2012 Effect of temperature on the mechanical properties of self-compacting concrete *Materials and Structures* 45 1001–1012
- Wang X, vd 2018 Effect of mineral admixtures on freeze-thaw resistance of self-compacting concrete *Construction and Building Materials* 162 154–161

HAFİF ÇELİK DUVAR PANELLERİNİN BETONARME ÇERÇEVELERİN DAVRANIŞLARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF LIGHTWEIGHT STEEL WALL PANELS ON THE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE FRAMES

Hussien Alkasim SOALIH¹, Fatih CEBİR², Serhat DEMİR³, Metin HÜSEM⁴ ve Ramazan LİVAOĞLU⁵

ÖZET

Bu çalışma, betonarme çerçevelerin sismik performansını artırmak amacıyla, geleneksel yığma dolgu duvarlara alternatif olarak tasarlanan prefabrikte hafif çelik duvar paneli sistemlerinin etkinliğini incelemektedir. Geleneksel tuğla dolgu duvarlar, yapıya önemli miktarda ilave sismik kütle yüklemekte ve deprem sonrası ciddi çevresel atık oluşumuna sebebiyet vermektedir. Buna karşın, önerilen hafif çelik panel sistemleri, geleneksel dolgu duvarlara kıyasla çok daha hafif olmaları ve tamamen geri dönüştürülebilir yapıları sayesinde sürdürülebilir ve yenilikçi bir çözüm sunmaktadır. Araştırma kapsamında; referans çerçeve, geleneksel tuğla dolgulu çerçeve ve hafif çelik duvar panelli çerçevelerden oluşan toplam dört adet numune üzerinde, sabit eksenel yük ve yarı-statik tersinir-tekrarlanır yanal yükleme altında kapsamlı bir deneysel program yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlar; hafif çelik duvar entegrasyonunun çerçeve dayanımını önemli ölçüde artırdığını, kararlı bir çevrimsel davranış sergilediğini ve sünek bir yapısal tepki sağladığını kanıtlamaktadır. Geleneksel yığma dolguların aksine hafif çelik duvarlar, düşük ötelenme oranlarında meydana gelen ani ve gevrek kırılmaları engelleyerek kontrol edilebilir bir sismik davranış sunmaktadır. Sonuç olarak hafif çelik duvarlar, yapısal ağırlığı minimize eden, gevrek hasar mekanizmalarını sınırlayan ve sismik risk altındaki bölgelerde güvenle uygulanabilecek çevre dostu bir dolgu çözümü olduğu saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hafif çelik duvar, Betonarme, Çevrimsel yükleme

ABSTRACT

This study investigates the effectiveness of prefabricated lightweight steel wall panel systems designed as an alternative to traditional masonry infill walls to enhance the seismic performance of reinforced concrete frames. Conventional brick infill walls add significant seismic mass to the structure and cause substantial environmental waste post-earthquake. In contrast, the proposed lightweight steel panel systems offer a sustainable and innovative solution due to being considerably lighter than traditional infill walls and their fully recyclable nature. Within the scope of the research, a comprehensive experimental program was conducted on a total of four specimens, including a reference frame, brick infilled frame, and frames with lightweight steel wall panels, under constant axial load and quasi-static cyclic lateral loading. The results demonstrate that the integration of lightweight steel walls significantly increases frame strength, exhibits stable cyclic behavior, and provides a ductile structural response. Unlike traditional masonry infills, lightweight steel walls provide a controllable seismic behavior by preventing sudden and brittle failures occurring at low drift ratios. Consequently, it has been determined

¹ Doktora Öğrencisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, halkasim@gmail.com

² Arş. Gör., Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, fatihcebir@ktu.edu.tr

³ Doç. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, s.demir@ktu.edu.tr

⁴ Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, mhusem@ktu.edu.tr

⁵ Prof. Dr., Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bursa, rliva@uludag.edu.tr

that lightweight steel walls are an eco-friendly infill solution that minimizes structural weight, limits brittle damage mechanisms, and can be safely implemented in seismically prone regions.

Keywords: Lightweight steel wall, Reinforced concrete, Cyclic loading

GİRİŞ

Mevcut tasarım uygulamalarında dolgu duvarlar genellikle yapısal olmayan elemanlar olarak değerlendirilmekte ve hesaplarda yalnızca sabit yük olarak dikkate alınmaktadır. Ancak bu elemanlar, betonarme çerçevelerin yatay rijitliğini ve deprem davranışını önemli ölçüde etkilemektedir (Milijaš vd., 2023, Zhai vd., 2016). Düşük maliyetleri ve kolay temin edilebilirlikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılan tuğla dolgu duvarlar, düşük ötelenme seviyelerinde başlangıç rijitliği sağlayarak yapının elastik davranışına katkıda bulunsa da, gevrek davranışları nedeniyle artan deformasyon talepleri altında ani dayanım kaybına uğramakta, çatlama ve nihayetinde göçmektedir (Penava vd., 2018, Furtado vd., 2021). Sonuç olarak tuğla dolgu duvarların davranışları deprem boyunca kontrol edilebilir değildir. Bu durum yalnızca can güvenliği açısından risk oluşturmakla kalmayıp, aynı zamanda yüksek onarım maliyetleri ve enkaz oluşumu gibi önemli ekonomik kayıplara da yol açmaktadır. Ayrıca, ilave kütleleri nedeniyle yapı üzerindeki deprem etkilerini artırmaktadırlar.

Çevresel açıdan bakıldığında ise tuğla üretimi küresel karbon emisyonunu önemli ölçüde artırmakta, deprem sonrası oluşan tuğla atıklarının geri dönüşümü ise lojistik ve enerji gereksinimleri nedeniyle oldukça sınırlı kalmaktadır (Fořt ve Černý 2020, Horckmans vd., 2019, Pacheco-Torgal vd., 2020). 2023 Kahramanmaraş depremlerinde ortaya çıkan on milyonlarca ton enkaz, sürdürülebilir alternatif sistemlere olan ihtiyacı açıkça ortaya koymaktadır.

Ön üretilmiş hafif çelik duvar panelleri, yüksek dayanım/ağırlık oranı, hızlı montaj ve %100 geri dönüştürülebilirlik gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Mevcut çalışmalar, bu panellerin tekil davranışı ile kaplama türü, bağlantı elemanları ve panel konfigürasyonu gibi parametrelerin çevrimsel davranış üzerindeki etkilerine odaklanmıştır; ayrıca çelik çerçevelerle etkileşimleri de incelenmiştir (Selvaraj ve Madhavan, 2019, Pehlivan vd., 2022, Yılmaz vd., 2023, Wang vd., 2022). Ancak, betonarme çerçeve davranışı üzerindeki etkileri bilinmemektedir.

Bu çalışmada, ön üretilmiş hafif çelik duvar panelleri ile geleneksel tuğla dolgu duvarın betonarme çerçeve davranışı üzerindeki etkileri, deneysel olarak karşılaştırmalı biçimde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, hafif çelik duvar panellerinin deprem etkisi altındaki yapılarda daha sünek ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir alternatif sunduğunu göstermektedir.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Malzeme Özellikleri

Betonarme çerçevelerin üretiminde kullanılan betonun ortalama basınç dayanımı 30.15 MPa, donatıların ise akma ve çekme dayanımları sırasıyla 431 MPa ve 545 MPa'dır. Hafif çelik duvar paneli sistemi için ise akma ve çekme dayanımları sırasıyla 247 MPa ve 313 MPa olan S235JR sınıfı soğukta şekillendirilmiş çelik (CFS) profiller tercih edilmiştir. Yığma duvar için karakteristik dayanımı 5.7 MPa olan 135 × 190 × 190 mm boyutlarında delikli kil tuğlalar ve 15.2 MPa dayanımlı hazır karma orta-şiddetli harç kullanılmıştır (Kaushik vd., 2007).

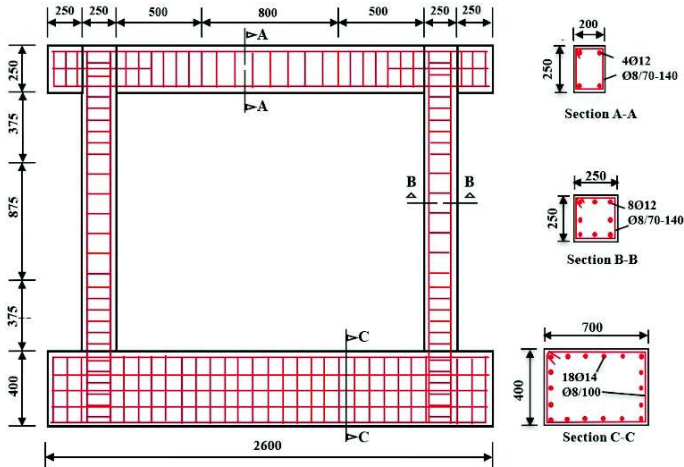
Deneysel Elemanları

Şekil 1, dört adet tek açıklıklı ve tek katlı BA çerçeve numunesinin dolgu konfigürasyonlarını göstermektedir. Ref isimli boş çerçeve referans numunesini (Şekil 1a), BRK isimli numune ise tuğla dolgu duvarlı çerçeveyi temsil etmektedir (Şekil 1b). CFS-Br-Stf ve CFS-PL isimli numuneler farklı özelliklere sahip hafif çelik duvar panelli çerçevelerdir (Şekil 1c ve 1d). Her iki duvar siteminde ana iskeletini 1.5 mm kalınlığında soğuk şekillendirilmiş C-enkesitli yatay ve dikey profiller

oluşturmaktadır. Buna ilave olarak CFS-Br-Stf sisteminde C-enkesitli çapraz profiller, CFS-PL sisteminde ise 1.5 mm kalınlığında çelik saç kaplama bulunmaktadır. CFS profilleri 50 mm başlık genişliğine ve farklı gövde derinliklerine sahiptir: düşey profiller için 135 mm, yatay profiller için 130 mm ve çapraz profiller için 125 mm. CFS profilleri, önceki çalışmalara uygun olarak akıllı vidalar kullanılarak birleştirilmiştir (Pehlivan vd. , 2022, Yılmaz vd., 2023). Duvar panelleri betonarme çerçeveye beton çivisi ile sabitlenmiştir. Betonarme çerçevelerin özellikleri Şekil 2’de verilmiştir.



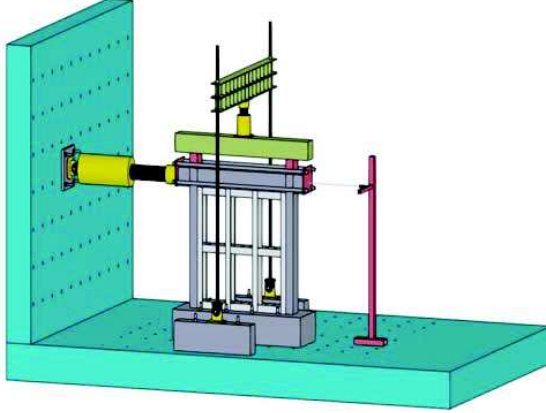
Şekil 1. Deney elemanları



Şekil 2. Betonarme çerçevenin detayları

Deney Düzeneği, Ölçüm Sistemi ve Yükleme Protokolü

Deney düzeneğine ait şematik görünüm Şekil 3'te sunulmuştur. Deneyler süresince kolonlara, eksenel kapasitelerinin %10'una tekabül eden sabit eksenel yük uygulanmıştır. Yatay yükleme aşamasında, FEMA 461 (2007) protokolü uyarınca yer değiştirme kontrollü yarı-statik çevrimsel yükleme senaryosu izlenmiştir. Yükleme adımları, hasarın başlaması beklenen %0,15'lik minimum görelî kat öteleme oranı ile başlatılmış; takip eden öteleme seviyelerinde ise genlikler %40 oranında artırılmıştır. İlk genlik seviyesi altı kez, sonraki tüm seviyeler ise ikişer kez tekrarlanmıştır. Test süresince yatay yük verileri yük hücresi, yer değiştirme verileri ise doğrusal potansiyometrik yer değiştirme dönüştürücüleri aracılığıyla eş zamanlı olarak kaydedilmiştir.



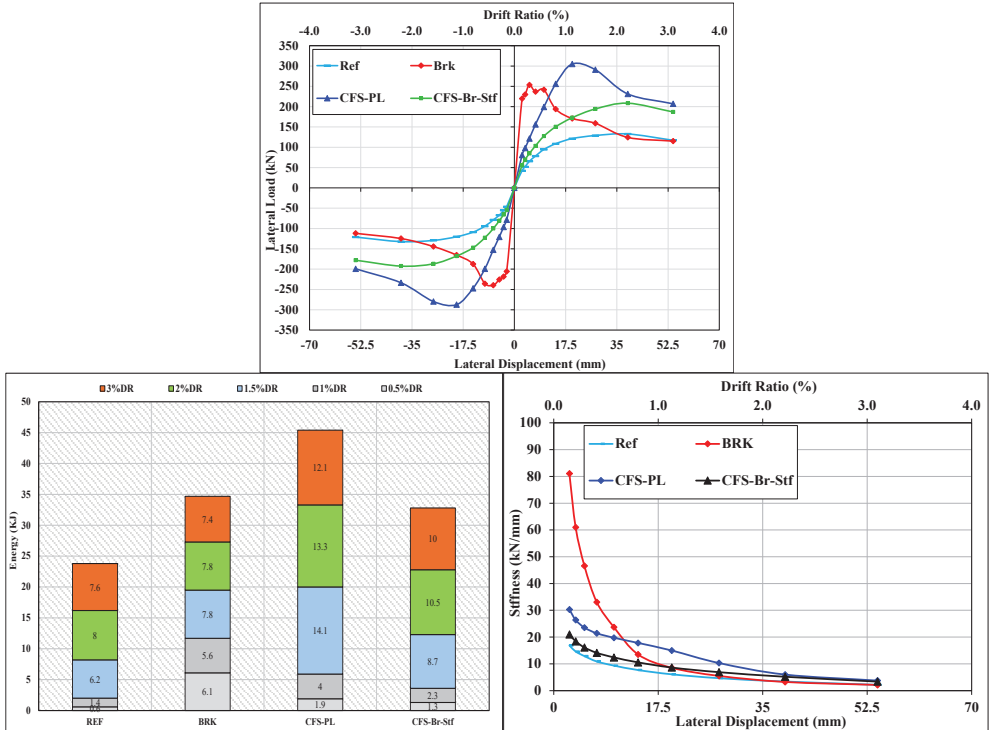
Şekil 3. Deney düzeneği

BULGULAR VE İRDELEME

Deney elemanlarında meydana gelen hasarlar Şekil 4'de, çevrimsel yüklemelerden elde edilen zarf eğrileri, enerji tüketme kapasiteleri ve rijitlik azalımı diyagramları ise Şekil 5'de verilmiştir. Deney sonuçları her üç numunenin yapısal performans açısından belirgin farklılıklar sergilediğini ortaya koymaktadır. Referans numune (Ref), %2,21 ötelenme seviyesinde yaklaşık 132 kN tepe yüküne ulaşırken, hasar kolon sarılma bölgelerinde eğilme çatlakları ve düğüm noktalarındaki kesme çatlakları şeklinde ilerlemiştir. Buna karşın tuğla dolgu duvarlı numune (BRK), %0,29–0,41 gibi çok düşük drift seviyelerinde Ref numunesinin yaklaşık iki katı kapasiteye (~246 kN) ulaşarak yüksek başlangıç rijitliği sergilemiş; ancak ilerleyen safhalarda duvarın ezilmesi ve çerçeveden ayrılmasıyla ani kapasite kaybı meydana gelmiştir. Önerilen hafif çelik panel sistemleri ise BRK'ya kıyasla çok daha stabil ve kararlı bir davranış sergilemiştir. CFS-Br-Stf numunesi %2,21 drift seviyesinde Ref numunesine göre ortalama %51'lik bir kapasite artışı sağlamıştır. Hasar mekanizması açısından çelik panel sistemi, vidalı bağlantıların kademeli kopması ve basınç diyagonallerindeki yerel/global burkulmalarla enerjiyi sönmülemiştir. Çelik sac kaplamalı panel sistemi (CFS-PL) ise serinin en yüksek performansını sergileyerek %1,13 drift oranında yaklaşık 305 kN maksimum yüke ulaşmıştır. Bu numunede çelik sac kaplama ve boyuna profillerde yerel burkulmalar görülürken %3 ötelenme seviyesinde ankraj vidalarının büyük bölümünün kesilmesi yüksek orandaki panel-çerçeve etkileşimini göstermektedir. Referans çerçeve yaklaşık 24 kJ, CFS-Br-Stf 33 kJ, BRK 35 kJ ve CFS-PL ise 45 kJ enerji sönmülemiştir. Tuğla dolgu duvar enerjiyi ağırlıklı olarak düşük yer değiştirme seviyelerinde yutarken, hafif çelik paneller bu tüketimi temel olarak orta ve büyük yer değiştirme safhalarında gerçekleştirir.



Şekil 4. Deney elemanlarındaki hasar durumu



Şekil 5. Deney sonuçları

SONUÇ

Bu çalışmada hafif çelik duvar paneli entegrasyonunun çerçeve dayanımını önemli ölçüde artırdığı, kararlı bir çevrimsel davranış sergilediği ve sünek bir yapısal tepki sağladığı belirlenmiştir. Diğer taraftan, tuğla duvarın çerçevenin başlangıç rijitliğini büyük oranda artırdığı gözlemlense de, bu duvarlarda çok düşük ötelenme oranlarında meydana gelen ani ve gevrek kırılmalar, geleneksel yığma dolguların sismik davranışının kararsız ve kontrol edilemez olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, hafif çelik duvar panelleri yapısal ağırlığı minimize eden, duvardaki gevrek kırılma mekanizmalarını engelleyen çevre dostu bir duvar çözümüdür. Bu çalışmadaki yaklaşım, mevcut kuru duvar sistemlerinde kullanılan iskelet bileşenlerine taşıyıcı özellik kazandırılarak, betonarme yapıların sismik davranışına olumlu yönde katkı sağlanabileceğini ortaya koymuştur.

Teşekkür

Bu çalışma, 124M606 numaralı proje kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- FEMA 461 (2007) Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components
- Fořt J and Černý R (2020) "Transition to circular economy in the construction industry: Environmental aspects of waste brick recycling scenarios," *Waste Management*, 118:510–520
- Furtado A, Arêde A, Rodrigues H and Varum H (2021) "The role of the openings in the out-of-plane behaviour of masonry infill walls," *Engineering Structures*, 244:112793
- Horckmans L, Nielsen P, Dierckx P and Ducastel A (2019) "Recycling of refractory bricks used in basic steelmaking: A review," *Resources, Conservation and Recycling*, 140:297–304
- Kaushik HB, Rai DC and Jain SK (2007) "Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(9):728-739.
- Milijaš A, Marinković M, Butenweg C and Klinkel S (2023) "Experimental results of reinforced concrete frames with masonry infills with and without openings under combined quasi-static in-plane and out-of-plane seismic loading," *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(7):3537–3579
- Pacheco-Torgal F, Ding Y, Colangelo F, Tuladhar R and Koutamanis A (2020) "Advances in Construction and Demolition Waste Recycling," Elsevier
- Pehlivan BM, Baran E, Topkaya C and Isik YT (2022) "Investigation of CFS shear walls with two-sided sheathing and dense fastener layout," *Thin-Walled Structures*, 180:109832
- Penava D, Sarhosis V, Kožar I and Guljaš I (2018) "Contribution of RC columns and masonry wall to the shear resistance of masonry infilled RC frames containing different in size window and door openings," *Engineering Structures*, 172:105–130
- Ram VG, Kishore KC and Kalidindi SN (2020) "Environmental benefits of construction and demolition debris recycling: Evidence from an Indian case study using life cycle assessment," *Journal of Cleaner Production*, 255:120258
- Selvaraj S and Madhavan M (2019) "Investigation on sheathing-fastener connection failures in cold-formed steel wall panels," *Structures*, 20:176–188
- Wang J, Zhou T, Wu H, Guan Y and Zhang L (2022) "Cyclic performance of steel frame fabricated with cold-formed steel composite wall structure," *Engineering Structures*, 270:114892
- Yılmaz F, Mojtabaei SM, Hajirasouliha I and Becque J (2023) "Behaviour and performance of OSB sheathed cold-formed steel stud wall panels under combined vertical and seismic loading," *Thin-Walled Structures*, 183:110419
- Zhai C, Kong J, Wang X and Chen Z (2016) "Experimental and Finite Element Analytical Investigation of Seismic Behavior of Full-Scale Masonry Infilled RC Frames," *Journal of Earthquake Engineering*, 20(7):1171–1198.

DEĞİŞTİRİLEBİLİR KURU BİRLEŞİMLİ PREKAST BETONARME ÇERÇEVENİN DEPREM DAVRANIŞI

SEISMIC BEHAVIOR OF A PRECAST REINFORCED CONCRETE (RC) FRAME WITH REPLACEABLE DRY CONNECTIONS

Hasan ÖZKAYNAK¹, Cihan SOYDAN², Melih SÜRMEİ³ ve Ercan YÜKSEL⁴

ÖZET

Prekast betonarme (BA) yapılar hızlı kurulum özellikleri, üretim süreçlerinin şeffaf olması, etkili bir mühendislik denetimine tabi olmaları, düşük karbon ayak izi ve sürdürülebilir olmaları nedeniyle önemli avantajlar sağlamaktadır. Prekast yapım teknolojisinin sağladığı söz konusu avantajların hayata geçirilebilmesi için, prekast yapı elemanlarının birleşim bölgelerinde güvenilir bağlantı detaylarının tasarlanması ve uygulanması önemli bir rol oynamaktadır. Güncel literatürde yer alan, prekast betonarme kiriş ve kolon elemanların bağlantıları ile ilgili akademik çalışmaların büyük bir bölümü, moment aktarabilen, değiştirilebilir ve deprem sırasında sismik enerjiyi sönmüleyebilir özellikteki bağlantılar üzerinde yoğunlaşmaktadır. Önerilen bağlantı elemanları arasında değiştirilebilirlik özelliğinin yüksek olduğu kuru tip birleşimler öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, kiriş-kolon birleşimlerinde değiştirilebilir Sigorta Tipi Mekanik Manşon (STMM) olarak isimlendirilen elemanların kullanıldığı, iki katlı ve tek açıklıklı prekast bir betonarme çerçevenin, tersinir tekrarlı yatay yükler atındaki çevrimsel davranışı deneysel olarak belirlenmiştir. STMM elemanlar, kiriş-kolon birleşimlerinde moment aktarabilen kuru tip bir bağlantı detayında kullanılmak üzere tasarlanan elemanlardır. Bu bağlantı detayının iki katlı BA prekast yapının sismik davranışına katkısı; enerji tüketimi, sönmüleme kapasitesi, ve kendini merkezleyebilme özelliği gibi önemli yapısal parametreler açısından değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçları, plastik deformasyonların kiriş ve kolon elemanlarda yoğunlaşmak yerine STMM elemanlarda toplandığını ve STMM elemanların kolaylıkla sökülerek yenileriyle değiştirilebildiğini göstermiştir. STMM elemanlar sayesinde prekast çerçevenin eşdeğer sönmü kapasitesi, %2 ve %4 göreceli öteleme seviyelerinde sırasıyla %10 ve %17 düzeyine ulaşabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme Prekast Yapılar, Moment Aktaran Bağlantı, Kuru Bağlantı, Değiştirilebilir Bağlantı, Sigorta Tipi Mekanik Manşon, Eşdeğer Sönüm.

ABSTRACT

Precast reinforced concrete (RC) structures offer significant advantages due to their rapid installation, transparent production process, effective engineering supervision, low carbon footprint, and sustainability. The design and implementation of robust connection details at the joints of precast structural elements play a crucial role in promoting those advantages provided by precast construction technology. Most of the current academic studies in the literature focus on the connections of precast RC beams and columns that are capable of transferring moments, replaceable, and having energy dissipate property during earthquakes. Among the proposed

¹ Prof. Dr. İstanbul Beykent Üniversitesi, İstanbul, hasanozkaynak@beykent.edu.tr

² Dr. Öğr. Üyesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, csoydan@nku.edu.tr

³ Dr. Öğr. Üyesi, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, melih.surmeli@btu.edu.tr

⁴ Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, yukseleerc@itu.edu.tr

connection types in the literature, dry connections are the most outshining ones with dry connection properties. In this study, the seismic behaviour of a two-story, single-bay precast RC frame under cyclic lateral loading was experimentally investigated using elements referred to as Replaceable Fuse-Type Mechanical Couplers (STMC). STMC elements are designed to be used in dry-type connection details which are capable of moment transfer through beam-column joints. The contribution of this connection detail to the seismic performance of the two-story precast RC frame was evaluated in terms of key structural parameters, including energy dissipation, damping capacity, and re-centring capability. The experimental results showed that plastic deformations were concentrated in the STMM elements rather than in the beams and columns, and that these elements could be easily removed and replaced. Owing to the great seismic energy dissipation capability of STMM elements, the equivalent damping capacity of the precast frame reached 10% and 17% at 2% and 4% drift levels, respectively.

Keywords: Reinforced Concrete Precast Structures, Moment Resisting Connection, Dry Connection, Replaceable Connection, Fuse Type Mechanical Coupler, Equivalent Damping.

GİRİŞ

Günümüz prefabrikasyon sektöründe; yapısal güvenliğin artırılması ve karbon emisyonunun azaltılarak sürdürülebilirliğin sağlanması hedefleri doğrultusunda, modüler ve tekrarlanabilir yapı elemanlarının üretimine ve kullanımına önemli bir yönelim bulunmaktadır. Prekast betonarme (BA) yapılar; şantiyede kurulumunun hızlı yapılabilmesi, konvansiyonel yöntemle göre daha ekonomik olması, kaliteli bir denetim sürecinden geçerek imal edilmesi ve düşük karbon ayak izi sebebiyle, sürdürülebilir çözümler sunmakta ve son yıllarda giderek daha fazla tercih edilmektedir. Prekast yapı elemanlarının tekrar kullanılabilirliği ile sağlanan ekonomi ve deprem etkisinde iyi performans sergileyen kiriş-kolon birleşimleri sayesinde bu elemanların değiştirilebilir olmaları, prekast yapıları güvenilir ve dolayısıyla kullanımının yaygın olmasını sağlayan en önemli unsurlardır. Prekast BA yapıların kiriş-kolon birleşimlerinde kuru birleşim yöntemlerinin tercih edilmesi, bağlantının kolaylıkla sökülebilir ve değiştirilebilir olmasını sağlamaktadır. Kuru birleşim sayesinde, sismik enerjinin sönmülenererek yapısal güvenliğin sağlanması ve fabrika şartlarında imal edilen prekast elemanların farklı konumlarda farklı amaçlarla tekrar kullanılabilmesi mümkün olmaktadır.

Literatürde, prekast sistemlerde kullanılmak üzere, deprem etkilerine dayanıklı, moment aktaran ve deprem enerjisini sönmüleyen yenilikçi birçok kiriş-kolon birleşiminin, gerek akademik gerek endüstriyel alanda geliştirilmesine odaklanıldığı görülmektedir. Değiştirilebilir elemanların kullanıldığı kuru birleşimler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar, bağlantı elemanlarının yeterli sünekliği sağladığını ve çevrimsel davranış, dönme kapasitesi, kat öteleme oranı, dayanım kaybı ve enerji sönmüleme kapasitesi bakımından tatmin edici performans sergilediğini göstermektedir. Ancak, var olan birleşim detayları oldukça karmaşık ve montajları için deneyimli iş gücü gerekmektedir. Bunun ötesinde, büyük ölçekli numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sayısı literatürde oldukça azdır. Aynı zamanda, deneylerin önemli bir kısmı, gerçek durumu tam olarak yansıtmayan eleman ve alt sistem düzeyinde gerçekleştirilmiştir.

Depreme dayanıklı moment aktaran çerçevelerde, plastik mafsalların oluşması nedeniyle kiriş uçlarında meydana gelen hasarları önlemek amacıyla sürtünme esaslı kiriş-kolon birleşimleri 1980'lerin başlarından itibaren yaygın olarak kullanılmaktadır. Zaman içerisinde çelik yapılar için çeşitli teknik çözümler önerilmiş, ahşap yapılar için bazı sistemler geliştirilmiş, ancak BA yapılarda sürdürümlü birleşimlerin kullanımı daha sınırlı düzeyde kalmıştır, (Colajanni vd., 2024). Pollini vd. (2018), prekast yapıların kiriş ve kolon birleşimlerinde kullanılmak üzere karbon kaplı çelik tüplerden oluşan enerji sönmüleyici cihazlar önerilmiş ve deneylerle bu cihazların etkili enerji sönmüleme sağladığı gösterilmiştir. Karbon malzeme basınç etkisindeki tüp çelik elemanın burkulma davranışını iyileştirmiştir. Deneysel sonuçlarla desteklenen analitik çalışmalar, bu sistemlerin yapıya aktarılan toplam taban kesme kuvvetleri azalttığını, böylece mevcut güçlendirmeye

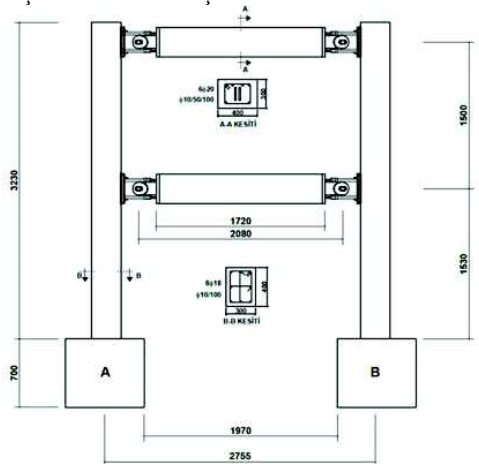
yöntemlerine kıyasla daha az ek müdahale gerektirerek deprem performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Lu vd.,(2024), feda edilebilir enerji sönümleyicilerin kullanıldığı kiriş-kolon birleşimi (SEDJ) tasarlamıştır. Söz konusu birleşim detayının uygulandığı deney numuneleri üzerinde gerçekleştirilen tersinir tekrarlı deneyler, kiriş ve kolon elemanların deney sonunda büyük ölçüde elastik kaldığını ve birleşimin önemli ölçüde enerji sönümleyebildiğini göstermiştir. Önerilen SEDJ kullanımı sayesinde kiriş ucundaki en büyük dayanım seviyesine karşı gelen dönme açısı, 1/250-1/50 aralığında kontrol edilebilmektedir. SEDJ ile sürtünme plakalarının montaj ve sökümü kolaylaştırılmış, bu sayede deprem sonrası civata ve plakaların hızlıca değiştirilmesi sağlanmıştır. Du vd., (2024), yapısal deprem performansını artırmak amacıyla değiştirilebilir dereceli akma özelliğine sahip enerji sönümleyici bağlayıcılar (RGEC) ile donatılmış bir prekast betonarme kiriş-kolon birleşimi önermiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deney sonuçları, kiriş-kolon birleşiminin iyi bir deprem performansı sergilediğini ve akma deformasyonu sayesinde önemli ölçüde sismik enerji sönümlemesinin gerçekleştiğini göstermiştir. Deneyler sonrasında, hasarın büyük ölçüde RGEC elemanlarda toplandığı, yapısal elemanların hasar almadan elastik durumda kaldığı ve bu kapsamda eleman düzeyinde RGEC'lerin enerji sönümleme oranının %97'den fazla olduğu tespit edilmiştir. Yapılan tekrar deneylerinde, yeni RGEC'lerin kullanıldığı durumda, önemli yapısal parametrelerde en fazla %10 civarında bir fark olduğu belirlenmiştir. Ge vd., (2025), gövdesinde yarıkların bulunduğu H profil elemanların üzerinde konumlandırılmış çapraz kesitli lamalardan teşkil edilmiş değiştirilebilir enerji sönümleyici cihazlar içeren yeni bir önerimli kiriş-kolon birleşimi önermiştir. Önerilen birleşim detaylarının uygulandığı ve aynı numunede sadece sönümleyicilerin değiştirilerek tekrar test edildiği deneysel çalışma sonuçları, enerji sönümleyicilerin çatlak genişliğini ve gelişimini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. ECC kullanımı çatlak sayısı ve gelişimi üzerinde belirgin bir azalma sağlamamıştır. Deneylerde, başlangıçta gözlenen küçük yüzey çatlaklarının, sönümleyicilerin değiştirilmesinden sonra kiriş-kolon birleşimlerinin davranışı üzerinde önemli bir etkisi olmadığı ve sistemin iyi bir deprem performansı sergilediği görülmüştür. Enerji sönümleyiciler değiştirildiğinde, birleşimlerin çevrimsel performansı korunmuş; taşıma kapasitesi ise yalnızca %2.75–%3.14 oranında azalmıştır. Zhu vd., (2025) değiştirilebilir burkulmayı önleyici enerji sönümleyiciler (RBED) ile donatılmış %60 ölçekli, iki açıklıklı, iki katlı prekast betonarme çerçevelerde benzeşik-dinamik deneyler gerçekleştirmiştir. Bağlantıların değiştirilebilir olduğunun kanıtlanması adına RBED'lerin değiştirilmesinden sonra dinamik deneyler tekrar edilmiştir. Deney sonuçları, çerçevenin iyi bir çevrimsel performans, yeterli bir enerji tüketme kapasitesi, yüksek süneklik, ihmal edilebilir kiriş uzaması ve ideal bir akma mekanizması sergilediğini ortaya koymuştur. Deneyler, RBED'lerin enerji tüketimini artırdığını, çerçeve elemanlarının büyük ölçüde elastik kaldığını ve yüksek süneklığe sahip olduğunu göstermiştir. Pham vd., (2025) çelik kutu bağlantılı (SBC) prekast kiriş-kolon birleşimlerinin deprem davranışını deneysel olarak incelemiştir. SBC kullanımıyla düğüm noktası bölgesinde homojen bir gerilme dağılımı sağlanmış, yerel hasarlar önemli ölçüde azalmıştır. Yük-yer değiştirme davranışı, enerji sönümleme ve toplam enerji tüketiminde %20 iyileşme sağlanmış olup, bu sayede sünek davranış desteklenmiştir. Çelik kutu bağlayıcı kullanıldığında, çatlak oluşumu, göçme durumu, rijitlik azalımı ve BA elemanların donatılarındaki birim şekildeğiştirme seviyeleri de daha olumlu bir performans sergilemiştir. Benedetto vd., (2024), kiriş kolon birleşim bölgelerinde çift yarıklı T biçimli (DST) birleşimlere ve kum saati şeklinde sönümleyicilerin kullanıldığı büyük ölçekli bir taşıyıcı sistemin performansını benzeşik dinamik deney tekniği kullanarak incelemiştir. Artan Dinamik Analizler (IDA) sonucunda, kum saati biçimli DST birleşimlere sahip yapılar ile tam dayanımlı birleşimlere sahip yapılar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, özel bir kendiliğinden merkezleme elemanı bulunmamasına rağmen DST birleşimli yapıların daha iyi bir kendini merkezleyebilme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

Burada sunulan çalışmada, İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda yürütülmüş olan "Moment Taşıyan Prekast Kiriş-Kolon Birleşimleri için Değiştirilebilir Mekanik Plastik Mafsals Geliştirilmesi" isimli TÜBİTAK-1505 projesi kapsamında gerçekleştirilen büyük ölçekli sistem deneyi sonuçları sunulmuştur. Proje kapsamında geliştirilen

birleşim bölgesi detayı içerisinde yer alan sigorta tipi mekanik manşonlar (STMM) ilk olarak eleman düzeyinde test edilmiştir. STMM elemanların bulunduğu kiriş-kolon birleşim bölgesi deneyleri bir alt sistem deneyi olarak değerlendirilmiş ve önerilen birleşimin çevrimsel davranışı belirlenmiştir. Sistem deneyi, kiriş uçlarında STMM elemanların yer aldığı birleşimlerin kullanıldığı, tek açıklıklı ve iki katlı büyük ölçekli prekast betonarme çerçeve sistemi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, kiriş-kolon birleşiminde kullanılan STMM elemanların, çerçevenin sünekliğine ve sismik enerjiyi sönmüleme kapasitesine önemli katkısı olduğunu göstermiştir. Önerilen birleşim detayı sayesinde, kiriş uçlarında önemli dönme talepleri oluşmakta, ancak betonarme kesitte çok sınırlı ölçüde hasar meydana gelmektedir. Deney sonrasında STMM elemanların hasar durumları incelenmiş ve sistemin kendini merkezleyebilme özelliği açısından önemli avantajlarının olacağı değerlendirilmiştir. Deprem sonrasında STMM'lerin yenileri ile değiştirilebilmesi imkânı, bu tür birleşimlerin kullanıldığı yapıların onarım sürecinin hızlı ve ekonomik olması açısından önemli bir avantaj sağlayacaktır.

DENEYSSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda büyük ölçekli, tek açıklıklı ve iki katlı BA prekast bir çerçeve üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ön görülen bir yerdeğiştirme protokolü, laboratuvar rijit reaksiyon duvarına konumlandırılan ± 250 kN yük ve ± 300 mm yerdeğiştirme kapasiteli MTS hidrolik servo aktüatör kullanılarak, deney numunesine uygulanmıştır. Hidrolik veren kapasitesi, numunenin boyutlarını etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Deney numunesinin genel görünümü, betonarme kesitler ve çerçeve boyutları Şekil 1'de verilmiştir. Deney çerçevesinde, kiriş uçlarına yerleştirilen dört adet sigorta kutusunun (Şekil 2b) her birinde 6 adet STMM yer almak üzere, toplam 24 adet STMM kullanılmıştır. Kolonlar ile soket temeller, genişleşmesi önlenmiş harç uygulaması ile bir araya getirilmiş ve deney numunesine temel seviyesinde ankastramanlık özelliği kazandırılmıştır. Deney numunesinin düzlem dışı hareketinin engellenmesi, kiriş uçlarında yer alan STMM elemanların kesit içerisine sığabilmesi ve kolonların kirişlerden daha güçlü olması ilkesinin sağlanabilmesi için kolon kesiti boyutları düzleme dik doğrultuda düzlem içine göre daha büyük olacak şekilde tasarlanmıştır.

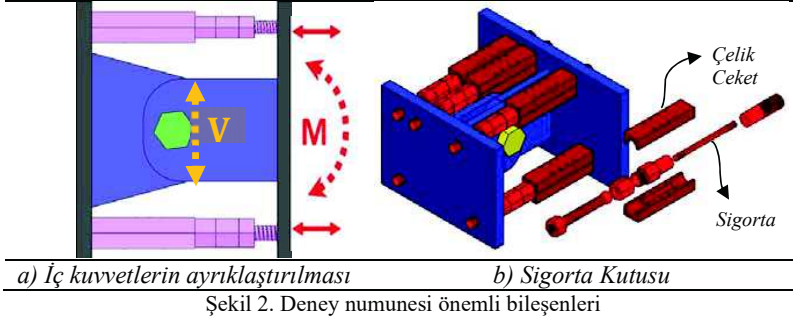


Şekil 1. Deney numunesi genel görünümü ve boyutlar

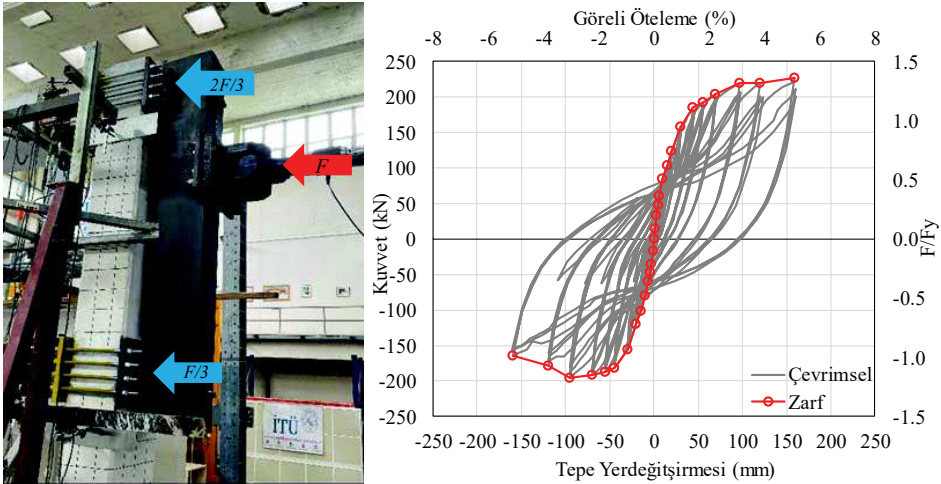
Kiriş-kolon birleşimindeki kesme kuvveti etkisi, Şekil 2a'da görülen çelik kayma plakası aracılığıyla aktarılmaktadır. Eğilme momenti etkisi ise basınç ve çekme etkilerine ayrıştırılmak suretiyle, sigorta kutusunun alt ve üst kesitlerine yerleştirilen STMM elemanları üzerinden aktarılmaktadır (Şekil 2a). STMM elemanları oluşturan önemli unsurlardan biri sigorta elemanlar

olup, çevrimsel davranış sırasında deforme olarak enerji sönmülemektedir. Diğer bir unsur ise, sigorta elemanların basınç etkisinde burkulmasını önlemek üzere tasarlanan çelik ceketlerdir, Şekil 2b.

Kiriş elemanının donatı düzeni; üstte 4 Φ 20, altta 2 Φ 20 boyuna donatı ve Φ 10/50/100 enine donatı şeklinde olup kesit boyutları 30×40 cm'dir. Kolon yüksekliği 3 m ve kesitlerde 8 Φ 18 boyuna donatı ve Φ 10/100 etriye kullanılmıştır. Kirişin pozitif ve negatif plastik moment kapasiteleri sırasıyla 80 kNm ve 135 kNm olarak hesaplanmıştır. Birleşimin pozitif ve negatif moment kapasitelerinin, kiriş plastik moment kapasitesine oranı ise sırasıyla 0.42 ve 0.49'dur. Malzeme deneyleri sonuçlarına göre, beton ortalama basınç dayanımı 48.7 MPa olarak belirlenmiştir. Betonarme donatı çubuklarının akma dayanımları ise Φ 18, Φ 10 ve Φ 20 çapları için sırasıyla 492 MPa, 561 MPa ve 482 MPa olarak tespit edilmiştir. STMM'lerde kullanılan sigorta elemanların imal edildiği çeliğin sınıfı A316 ve sigorta elemanlar dışındaki parçaların çelik sınıfı S235'tir.



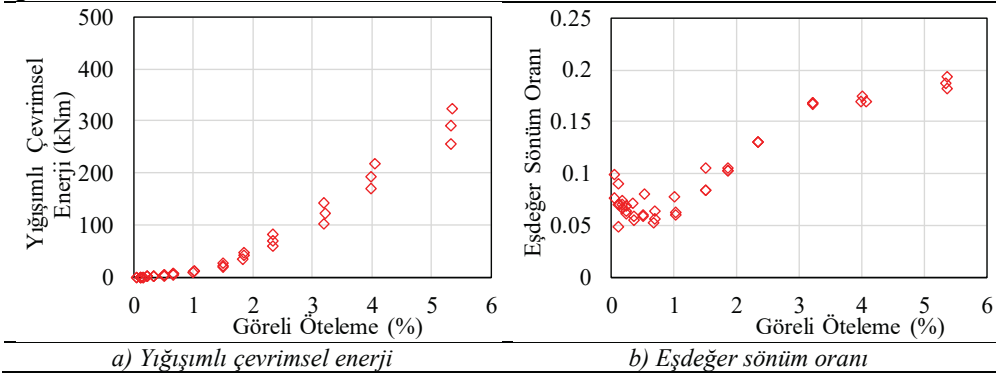
ACI 374.1-05'te önerilen yerdeğiştirme protokolü gereği, her hedef yerdeğiştirme seviyesi için deney numunesine üçer çevrim uygulanmıştır. Hidrolik veren yerdeğiştirme protokolü etkisini üst ve alt kat hizalarına sırasıyla 2/3 ve 1/3 oranında dağıtmak için rijit bir çelik kiriş kullanılmıştır, Şekil 3. Deney süresince kolonlara aksenal yük uygulanmamıştır. Hidrolik veren yükü ile numune tepe yer değiştirmesi arasındaki ilişki Şekil 3'te verilmiştir.



Zarf eğrisinde pozitif yükler ve yer değiştirme hedefleri itme yönünde, negatif olanlar ise çekme yönünde gösterilmiştir. İtme yönünde dayanım kaybı gözlenmezken, çekme yönünde yaklaşık

%16'lık bir yük azalması meydana gelmiştir. Numune, %5.3 kat ötelenmesi seviyesinde tam çevrimi tamamlamıştır. Deney sonuçlarına göre maksimum dayanımlar itme yönünde 227 kN, çekme yönünde ise -195 kN olarak elde edilmiştir. Çekme bölgesinde gözlenen dayanım kaybının temel sebebi, %2 ötelenme seviyesinde, birinci kat kirişinin soldaki kolon ile bağlantısında, kolon ankraj donatılarındaki detay eksikliğinden kaynaklanan hasar oluşumudur.

Çerçeve sistemin çevrimsel davranış sırasında tüketmiş olduğu enerji, yük-yerdeğiştirme çevrimlerinin altında kalan alanların toplamı olarak hesaplanmış ve yığılımlı çevrimsel enerji büyüklükleri görece ötelemeye bağlı olarak Şekil 4a'da verilmiştir. Eşdeğer sönüm katsayısı ise her çevrimde tüketilen enerjinin elastik enerji olarak bilinen her bir çevrimin en büyük yerdeğiştirme ve buna karşı gelen kuvvetlerle oluşturulan üçgenin alanına oranlanması ile hesaplanmıştır (Şekil 4b). Görece öteleme seviyelerinin %1, %2 ve %4 olduğu seviyelerde yığılımlı olarak tüketilen enerjiler sırasıyla 12.5 kNm, 60 kNm ve 170 kNm olarak belirlenmiştir. Aynı seviyelerde eşdeğer sönüm oranları ise sırasıyla %5, %10 ve %17 olarak belirlenmiştir. Ötelenme arttıkça STMM elemanların katkısı artmakta, buna bağlı olarak yığılımlı enerji tüketimi ve eşdeğer sönüm oranları da benzer eğilimle artmaktadır.

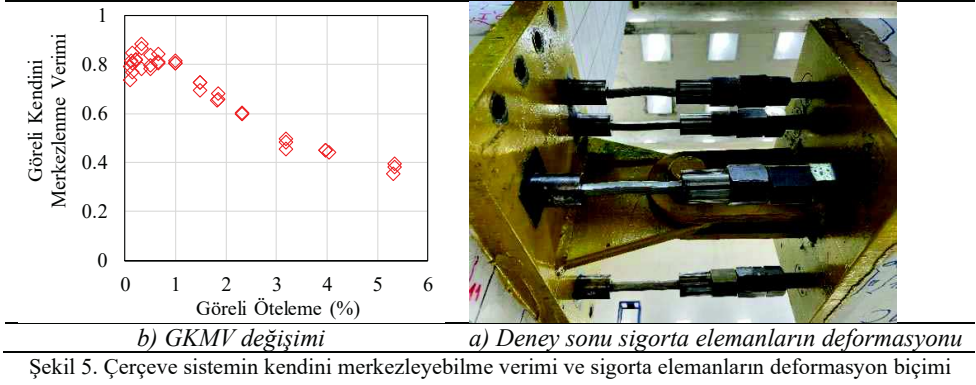


Şekil 4. Yığılımlı enerji ve eşdeğer sönüm oranı değişimi

Sigorta elemanların kullandığı kuru birleşimlerde, elemanların yenileri ile değiştirilebilir olması için çerçevenin, etki ortadan kalktıktan sonra eski konumuna geri dönebilmesi son derece önemlidir. Bu çalışmada gerçekleştirilen deney sonuçları Sideris vd. (2014) tarafından ortaya atılan görece kendiliğinden merkezlenme verimi (GKMV) kavramı kapsamında değerlendirilmiştir, Denklem 1. GKMV, en büyük yerdeğiştirmenin ne kadarının geri kazanılabildiğini yüzde olarak ifade etmekte olup, Δ_{rse}^+ ve Δ_{rse}^- pozitif ve negatif kalıcı yer değiştirmelere, Δ_m^+ ve Δ_m^- ise negatif en büyük yerdeğiştirmelere karşılık gelmektedir.

$$GKMV = 1 - \frac{\Delta_{rse}^+ - \Delta_{rse}^-}{\Delta_m^+ - \Delta_m^-} \quad (1)$$

Çevrimsel davranış sırasında oluşan GKMV büyüklükleri hesaplanmış ve görece ötelemeye göre değişimi Şekil 5a'de verilmiştir. GKMV değerinin, %1 görece öteleme seviyesinde 0.80 civarında kaldığı görülmektedir. Deney sonunda ise bu değer 0.40 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, önerilen birleşimlerin iyi bir kendiliğinden merkezlenme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Zira tam kendiliğinden merkezleyebilen ve kalıcı yerdeğiştirmelerin olmadığı sistemlerde bu değer 1'e eşittir. Diğer taraftan deney numunesinin %5 görece öteleme seviyesinde bir birleşim bölgesinde yapılan gözlemler, sigorta elemanların değiştirilmeyi engelleyecek bir deformasyona uğramadığı gözlenmiştir, Şekil 5b.



SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında değiştirilebilir mekanik plastik mafsalların yer aldığı büyük ölçekli tek açıklıklı ve iki katlı prefabrik betonarme bir çerçevenin çevrimsel davranışı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Deneysel çalışmada elde edilen en büyük dayanım kaybı, %5 görel öteleme seviyesinde %10 olarak belirlenmiştir. Çerçeve sisteminde, ileri deformasyon seviyelerinde sınırlı ölçüde dayanım kaybı gözlenmesi, sistemin kararlı ve sünek bir davranış sergilediğinin en somut göstergesidir.

2. STMM elemanlar sayesinde çerçeve sistemin yığılımlı enerji tüketim kabiliyeti ve eşdeğer sönüm kapasitesi önemli ölçüde artmıştır. %1, %2 ve %4 görel öteleme seviyeleri için sönüm oranları sırasıyla %5, %10 ve %17 olarak belirlenmiştir.

3. Deney sonrasında yapılan gözlemler, plastik şekil değiştirmelerin çoğunlukla STMM'lerin sigorta elemanlarında toplandığını ve bu elemanlarda uzamaların meydana geldiğini, ancak uzamaların elemanların yenisiyle değiştirilmesine engel olmadığını göstermiştir. Deformasyonlar büyük ölçüde STMM elemanlarda yoğunlaştığı için deney sonunda betonarme elemanlarda sınırlı seviyede hasar gözlenmiştir.

4. İstisnai bir durum olarak, birinci kat kirişinin sol uç kesintinde %2 görel ötelenmeden sonra geniş bir çatlak oluşmuştur. Bu tür hasarların azaltılması için kolonun yükün uygulandığı düzlemdeki boyutunun artırılması, sargısız beton kalınlığının azaltılması, çelik levha ankraj detaylarının (donatı, manşon, donatı ve manşondaki dış aralıkları gibi) iyileştirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- ACI 374.1-05 (2005), Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, USA.
- Benedetto SD, Francavilla AB, Latour M, Rizzano G (2024). "Seismic behaviour of a steel moment resisting frame structure featuring hourglass double split tee joints" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 180 (2024) 108616. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108616>
- Colajanni P, Ahmed M, Pagnotta S, Orlando P (2024). "A review of friction dissipative beam-to-column connections for the seismic design of MRFs", *Applied Sciences*, 14, 2291. <https://doi.org/10.3390/app14062291>
- Du Y, Li F, Li H, Hong N, Chi P (2024). "Seismic behavior and resilience assessment of prefabricated beam-column joint with replaceable graded-yielding energy-dissipating connectors", *Engineering Structures*, 319 (2024) 118814. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118814>.

- Ge Q, Ai J, Mao Y, Zhou D, Li Y, Lu Y, Xiong F (2025) “Study of seismic performance and resilience of a precast concrete beam-column joint with a replaceable energy-dissipation component” *Journal of Building Engineering*, 103 (2025) 112167. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112167>
- Lu X, Jin X, Tian Y, Xie L, Wang Y (2024). “Experimental study and design methodology of sacrificial-energy dissipation beam-column joint”, *Engineering Structures*, 314 (2024) 118263. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118263>.
- Pollini AV, Buratti N, Mazzotti C (2018). “Experimental and numerical behaviour of dissipative devices based on carbon-wrapped steel tubes for the retrofitting of existing precast RC structures”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 47:1270–1290. <https://doi.org/10.3390/app14062291>.
- Pham KVA , Woob S, Kim SJ, Jo H, Lee G, Lee K (2025). “Assessment of the effectiveness of steel box connector in precast beam–column connection under seismic effect”, *Case Studies in Construction Materials*, 23, e05073. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05073>.
- Sideris P, Aref AJ, Filiatrault A (2014). “Quasi-static cyclic testing of a large-scale hybrid sliding-rocking segmental column with slip-dominant joints”, *Journal of Bridge Engineering*, 19(10), 04014-04036. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000605](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000605).
- Zhu Y, Wu J, Zhai S, Xie L, Tong C, Dong X (2025). “Pseudo-dynamic test investigation of prefabricated rc frame structure with replaceable buckling- restrained energy dissipaters”, *Engineering Structures*, 334(120231). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120231>.

LP SARGILI SIVALI KOLONLARIN DÜŞEY VE YATAY YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞI

BEHAVIOR OF FRP CONFINED PLASTERED COLUMNS UNDER VERTICAL AND LATERAL LOADS

Ali Gürkan GENÇ¹ Medine İspir ARSLAN² ve Alper İLKİ³

ÖZET

Standart altı betonarme kolonların güçlendirilmesinde karbon lifli polimer (KLP) sargı yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Uygulamada çoğunlukla mevcut sıva tabakası kaldırılarak KLP beton yüzeye uygulanmaktadır. Ancak sıva tabakasının korunması durumunda sargı mekanizmasının nasıl etkilendiği ve sıva özelliklerinin güçlendirme performansına etkisinin ne olduğu henüz yeterli deneysel/nümerik çalışmayla ortaya konmamıştır. Bu çalışmada, sıva tabakası korunarak uygulanan KLP sargının davranış üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla iki aşamalı bir deney programı planlanmıştır. İlk aşamada, 10 MPa hedef basınç dayanımına sahip beton kullanılarak üretilmiş $275 \times 275 \times 550$ mm boyutlarında prizmatik beton numuneler üzerinde monotonik aksel basınç deneyleri gerçekleştirilecek ve sıva kalınlığı (12.5, 25 ve 37.5 mm), sıva basınç dayanımı (~4 ve ~8 MPa) ile KLP ceket kalınlığının aksel davranış üzerindeki etkileri değerlendirilecektir. İkinci aşamada ise aynı betondan üretilmiş sekiz adet tam ölçekli kare kesitli betonarme kolon ($300 \times 300 \times 1350$ mm), sabit aksel yük oranı (0.60) altında tersinir çevrimsel yanal yükler altında test edilecektir. Bu kapsamda, prizmatik deney programında kullanılan sıva kalınlıkları ve benzer sıva dayanımları dikkate alınarak KLP kalınlığının ve sıva özelliklerinin kolonların çevrimsel yanal davranışı, ötelenme kapasitesi ve hasar gelişimi üzerindeki etkileri değerlendirilecektir.

Anahtar Kelimeler: Düşük dayanımlı beton, KLP güçlendirme, Betonarme kolon, Tersinir yüklenme

ABSTRACT

Carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) jacketing is one of the widely used methods for strengthening substandard reinforced concrete (RC) columns. In practice, the existing plaster layer is typically removed prior to the direct application of CFRP onto the concrete surface. However, in cases where the plaster layer is retained, how the confinement mechanism is affected and the extent to which plaster properties influence the strengthening performance have not yet been sufficiently clarified through experimental/numerical studies. In this study, a two-stage experimental program is planned to investigate the effects of CFRP jacketing applied over retained plaster layers on behavior. In the first stage, monotonic axial compression tests will be conducted on prismatic concrete specimens with dimensions of $275 \times 275 \times 550$ mm, produced using concrete with a target compressive strength of 10 MPa, and the effects of plaster thickness (12.5, 25, and 37.5 mm), plaster compressive strength (~4 and ~8 MPa), and CFRP jacket thickness on the axial behavior will be evaluated. In the second stage, eight full-scale square RC columns ($300 \times 300 \times 1350$ mm), produced using the same concrete, will be tested under reversed cyclic lateral loading with a constant axial load ratio of 0.60. Considering the plaster thicknesses and similar plaster strength levels used in the prismatic test program, the effects of CFRP thickness and plaster properties on the cyclic lateral behavior, drift capacities, and damage development of the columns will be evaluated.

¹ Araş. Gör., İTÜ, İstanbul, gencali1@itu.edu.tr

² Doç. Dr., İTÜ, İstanbul, ispirm@itu.edu.tr

³ Prof. Dr., İTÜ, İstanbul, ailki@itu.edu.tr

Keywords: CFRP strengthening, Cyclic behavior, Low-strength concrete, Plastered RC columns, Substandard RC column

GİRİŞ

Mevcut yapı stokunun önemli bir kısmını oluşturan düşük dayanımlı betonarme (BA) kolonlar, özellikle yetersiz enine donatı ve düşük beton basınç dayanımı nedeniyle deprem etkileri altında gevrek davranış sergileme eğilimindedir. 1990'lı yıllar öncesinde inşa edilmiş birçok yapıda beton dayanımının düşük olduğu ve etriye aralıklarının güncel yönetmelik gerekliliklerini sağlamadığı bilinmektedir. Bu tür kolonlarda deprem sırasında kesme çatlakları, beton örtü dökülmesi ve boyuna donatı burkulması gibi hasar mekanizmaları erken aşamalarda gelişmekte ve taşıma kapasitesinde hızlı kayıplara yol açabilmektedir.

Mevcut betonarme yapıların güçlendirilmesinde; yapısal eleman kesitlerinin büyütülmesi, elemanların lifli polimer (LP) ile sargılanması ve taşıyıcı sisteme yeni perde duvarlar eklenmesi gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında, yüksek dayanım/ağırlık oranı, korozyona karşı dayanıklılık ve hızlı uygulanabilirlik gibi avantajları nedeniyle LP sargılama yaygın olarak tercih edilmektedir.

Mevcut tasarım kılavuzları LP uygulamalarında yüzey hazırlığı konusunda belirli gereklilikler tanımlamaktadır. Örneğin ACI PRC-440.2R-23, LP sargının beton yüzeye doğrudan bağlanmasını sağlamak amacıyla mevcut sıva tabakasının kaldırılmasını önermektedir. Bununla birlikte özellikle düşük dayanımlı beton kullanılan eski yapılarda sıva tabakasının tamamen kaldırılması çoğu zaman zahmetli, maliyetli ve mevcut beton yüzeyine zarar verebilen bir işlem olabilmektedir. Ayrıca sıva sökümü önemli miktarda toz ve inşaat atığı oluşturarak çevresel ve iş sağlığı açısından da olumsuzluklar yaratabilmektedir. Bu nedenle sıva tabakasının korunarak uygulanabileceği güçlendirme çözümlerinin geliştirilmesi teknik ve ekonomik açıdan önemli avantajlar sağlayabilir.

LP ile sargılanmış beton elemanların aksel davranışı üzerine literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır ve bu çalışmalar genel olarak sargı etkisinin beton basınç dayanımını ve deformasyon kapasitesini artırdığını göstermektedir (Samaan ve diğ. 1998; Lam ve Teng 2003; İlki ve diğ. 2008; İspir 2015; Lin ve Teng 2020; Fan ve diğ. 2022; Genç ve diğ. 2025). Ancak, sıva tabakasının bulunduğu durumlara ilişkin çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Karantzikis vd. (2005), sıvalı silindirik beton numuneler üzerinde yaptıkları deneylerde, sıva tabakasının varlığının sıvasız LP sargılı numunelere kıyasla hem basınç dayanımını hem de deformasyon kapasitesini azaltabildiğini rapor etmiştir. Comert vd. (2010), düşük dayanımlı beton silindirlerde kalın sıva tabakası ve cam lifli polimer (CLP) sargı kombinasyonunu incelemiş ve sıva özelliklerine bağlı olarak sıvasız LP sargılı numunelere kıyasla dayanımda azalma, deformasyon kapasitesinde ise artış gözlemlendiğini göstermiştir. Benzer şekilde Comert vd. (2009), beton ile sargı sistemi arasında bulunan ara tabakanın kesit boyutunu artırması ve yanıl genişlemenin üniform olmaması nedeniyle sargı etkinliğinin değişebileceğini ortaya koymuştur. Daha yakın tarihli bir çalışmada Yavuzer vd. (2022), sıvalı düşük dayanımlı beton silindirler üzerinde yaptıkları deneylerde sıva varlığının sargı etkinliğini önemli ölçüde azaltmadığını ancak sıva kalınlığındaki artışın dayanım ve deformasyon kapasitesinde sınırlı azalmalara yol açabildiğini göstermiştir. Bununla birlikte, tüm bu çalışmalarda KLP ile sargılanmış sıvalı beton/betonarme numunelerin, sargısız referans numunelere kıyasla hem basınç dayanımı hem de deformasyon kapasitesi açısından artış gösterdiği görülmüştür.

Mevcut çalışmaların önemli bir bölümü, monotonik aksel yük altında test edilen silindirik numunelere odaklanmaktadır. Bu nedenle, sıva tabakasının bulunduğu prizmatik elemanlarda sıva kalınlığı, sıva dayanımı ve LP sargı konfigürasyonunun aksel davranış üzerindeki birleşik etkileri henüz yeterince araştırılmamıştır. Ayrıca, yazarların bilgisi dahilinde sıva tabakasının bulunduğu LP ile güçlendirilmiş betonarme kolonların tersinir çevrimsel yanıl yükler altındaki davranışına ilişkin çalışma da bulunmamaktadır. Bu çalışma, söz konusu konulara yönelik deneysel veri sağlamayı amaçlamaktadır.

Bu çalışmada, sıva tabakası korunarak uygulanan KLP sargının davranış üzerindeki etkisini incelemek amacıyla iki aşamalı bir deney programı planlanmıştır. İlk aşamada, düşük dayanımlı beton kullanılarak üretilmiş 275mm × 275mm × 550mm boyutunda prizmatik beton numuneler

üzerinde monotonik eksenel basınç deneyleri gerçekleştirilerek sıva kalınlığı, sıva dayanımı ve KLP kat sayısının eksenel davranış üzerindeki etkilerinin incelenmesi hedeflenmektedir. İkinci aşamada ise aynı beton karışımı kullanılarak üretilmiş tam ölçekli 300mm × 300mm enkesitli betonarme kolonların sıva tabakası korunarak KLP ile güçlendirilmesi durumundaki davranışlarının, tersinir çevrimsel yanal yükler altında deneysel olarak araştırılması planlanmaktadır. Bu kapsamda sıva kalınlığı, sıva basınç dayanımı ve KLP kalınlığının elemanların taşıma kapasitesi, deformasyon kapasiteleri ve hasar gelişim mekanizmaları üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

DENEY PROGRAMI

Malzeme Özellikleri

Deneylerde kullanılan beton, mevcut düşük dayanımlı yapı stokunu temsil edecek şekilde tasarlanmış olup, 28 günlük ortalama silindir basınç dayanımı 7.2 MPa olarak elde edilmiştir. Beton basınç dayanımı, TS EN 12390-3 standardına uygun olarak 150 mm × 300 mm silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilen tek eksenli basınç deneyleri ile elde edilmiştir.

Boyuna ve enine donatı çeliğinin mekanik özellikleri EN ISO 15630-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilen tek eksenli çekme deneyleri ile belirlenmiştir. Boyuna donatı olarak kullanılan düz yüzeyli Ø16 mm çubukların ortalama akma dayanımı 312 MPa, nihai çekme dayanımı 444 MPa olarak ölçülmüştür. Enine donatı olarak kullanılan Ø10 mm düz etriyelerin ortalama akma dayanımı 323 MPa, nihai çekme dayanımı ise 465 MPa olarak elde edilmiştir.

Sıva uygulamalarında her iki çalışma için Tip1 ve Tip 2 olarak isimlendirilen iki farklı basınç dayanım seviyesine sahip karışımlar kullanılmıştır. Tip 1 sıva daha düşük dayanımlı sıvayı ifade etmekte olup ortalama basınç dayanımı yaklaşık 4 MPa, Tip 2 sıva ise daha yüksek dayanımlı sıvayı ifade etmekte olup yaklaşık 8 MPa ortalama basınç dayanımına sahiptir. Sıva basınç dayanımları EN 196-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilen deneyler ile belirlenmiştir.

Güçlendirme amacıyla kullanılan karbon lifli polimer (KLP) kumaş tek doğrultulu olup, 300 g/m² yüzey yoğunluğuna sahiptir ve malzeme özellikleri ASTM D3039 standardına göre gerçekleştirilen çekme deneyleri ile belirlenmiştir. Bu kapsamda 25 mm × 250 mm boyutlarında, tek katlı beş adet kupon numune test edilmiştir. Deneyler sonucunda KLP kumaşın ortalama çekme dayanımı 4350 MPa, kopma birim uzaması 0.0182 ve elastisite modülü 226000 MPa olarak elde edilmiştir.

Numunelerin Tasarımı ve Üretilmesi

Deney programının ilk aşaması için üretilen prizmatik numuneler donatısız olarak tasarlanmış ve test matrisi Tablo 1’de sunulmuştur. Bu sayede, gözlenen davranışın yalnızca beton, sıva tabakası ve KLP sargı arasındaki etkileşimi yansıtmayı hedeflenmiştir. Kesit boyutları 275 × 275 mm ve yüksekliği 550 mm olan toplam 20 adet beton numune üretilmiştir (Şekil 1). Numuneler sırasıyla lifli polimer kumaş katman sayısı, sıva kalınlığı ve sıva dayanımı üzerinden isimlendirilmiştir. Örneğin 1K-SK25-ST1_k numunesi 1 kat karbon LP kumaş sargılı, 25mm kalınlığında Tip 1 (düşük dayanımlı) sıvaya sahip prizmatik kare numuneyi ifade etmektedir.

Tablo 1. Beton kare prizma test matrisi

Numune	Sıva kalınlığı (mm)	Sıva tipi	KLP katman sayısı
UK-SK0_k	0.0	-	-
UK-SK25-PS1_k	0.0	1	-
1K-SK0_k	0.0	-	1
2K-SK0_k	0.0	-	2
1K-SK12.5-ST1_k	12.5	1	1
1K-SK25-ST1_k	25.0	1	1
2K-SK25-ST1_k	25.0	1	2
1K-SK25-ST2_k	25.0	2	1
1K-SK37.5-ST1_k	37.5	1	1
2K-SK37.5-ST1_k	37.5	1	2



(a)



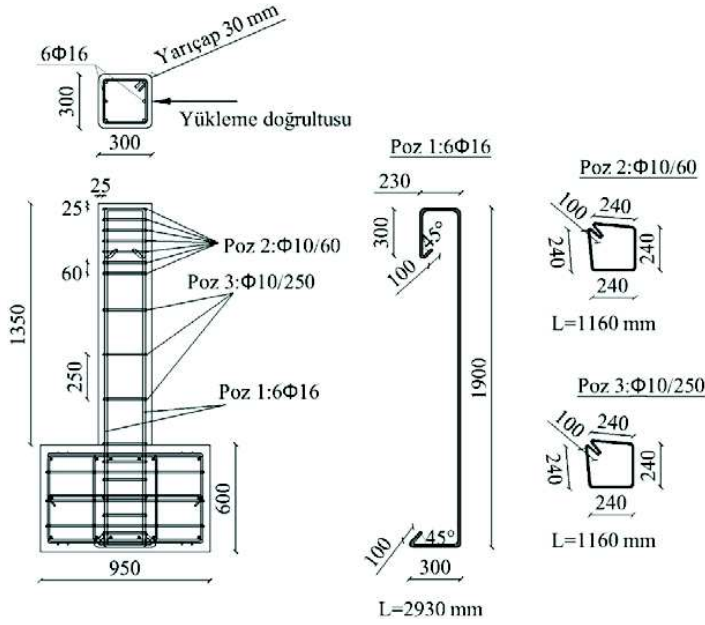
(b)

Şekil 1. Sıvalı prizmatik beton numunelerin hazırlık aşamaları: a. Numunelerin sıvanması, b. KLP sargılaması

Deney programının ikinci aşamasına ait test matrisi Tablo 2’de verilmektedir. Kesit boyutları 300×300 mm ve toplam yüksekliği 1350 mm olan 8 adet tam ölçekli betonarme kolon üretilmiştir. Bu kolonlar, bir çerçeve kolonu elemanının tabanından momentin sifıra yaklaştığı orta yüksekliğe (kolon yüksekliğinin yaklaşık yarısı) kadar olan bölümünü temsil edecek şekilde tasarlanmıştır. Kolonlar, $950 \times 950 \times 600$ mm boyutlarında betonarme temeller üzerine monolitik olarak dökülmüştür. Betonarme kolonların geometrik özellikleri ve donatı detayları Şekil 2’de gösterilmektedir. Boyuna donatı olarak altı adet $\text{Ø}16$ mm düz yüzeyli donatı kullanılmış olup, donatılar bindirmesiz olarak düzenlenmiş ve boyuna donatı oranı %1.4 olarak sağlanmıştır. Enine donatılar ise $\text{Ø}10$ mm düz donatılardan üretilmiş olup, enine donatı aralığı 250 mm olarak seçilmiştir. Enine donatılar 135° kancalı olarak düzenlenmiş olup, bu sayede kanca detaylarından kaynaklanabilecek ilave etkilerin elimine edilmesi amaçlanmıştır. Sıvalı betonarme numunelerin hazırlanma aşamalarına ait görseller Şekil 3’te sunulmaktadır.

Tablo 2. Betonarme kolon test matrisi

Numune	Sıva kalınlığı (mm)	Sıva tipi	KLP katman sayısı
UK-SK0	-	-	-
1K-SK0	-	-	1
2K-SK0	-	-	2
1K-SK12.5-ST1	12.5	1	1
1K-SK25-ST1	25	1	1
2K-SK25-ST1	25	1	2
1K-SK25-ST2	25	2	1



Şekil 2. Betonarme kolon boyutları ve donatı detayları (ölçüler mm birimindedir)



(a)

(b)

(c)

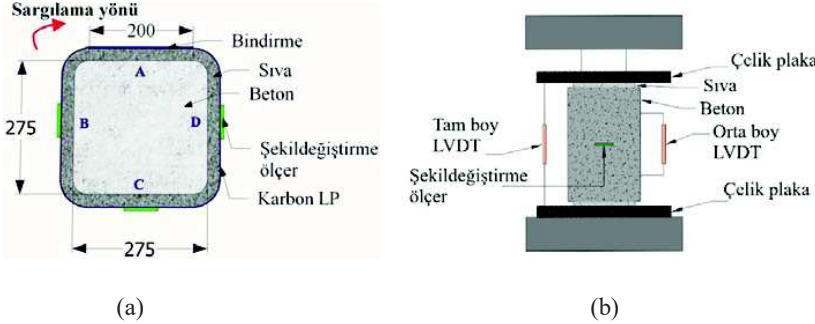
Şekil 3. Sıvalı betonarme numunelerin hazırlık aşamaları: a. Kolonların sıvanması, b. Karbon lifli polimer sargılaması, c. Betonarme kolonların teste hazır hale getirilmesi

Deney Düzenği ve Ölçüm Sistemi

Deney programı kapsamında prizmatik beton numuneler monotonik eksenel basınç altında, betonarme kolon numuneleri ise sabit eksenel yük ile tersinir çevrimsel yanal yüklerin eşzamanlı etkisi altında test edilecektir. Her iki deney grubunda da yükleme ve ölçüm sistemleri, elemanların genel ve yerel deformasyon davranışlarını güvenilir biçimde izleyebilecek şekilde planlanmıştır.

Prizmatik numunelerin tek eksenli basınç testleri, 5000 kN kapasiteli kapalı çevrim kontrollü Instron marka test cihazında gerçekleştirilecektir. Deneyler, 0.6 mm/dk sabit hızla yerdeğiştirme kontrollü olarak yürütülecektir. Yanal şekildeğiştirmelerin ölçülmesi amacıyla, bindirme yapılan "A" yüzeyi dışında kalan üç yüzeyin orta bölgesine, 60 mm ölçüm boyuna sahip şekildeğiştirme ölçerler yerleştirilecektir (Şekil 4a). Eksenel deformasyonların belirlenmesi için ise numune yüzeylerinin orta bölgelerine, 275 mm ölçüm boyuna sahip dört adet 50 mm kapasiteli Doğrusal

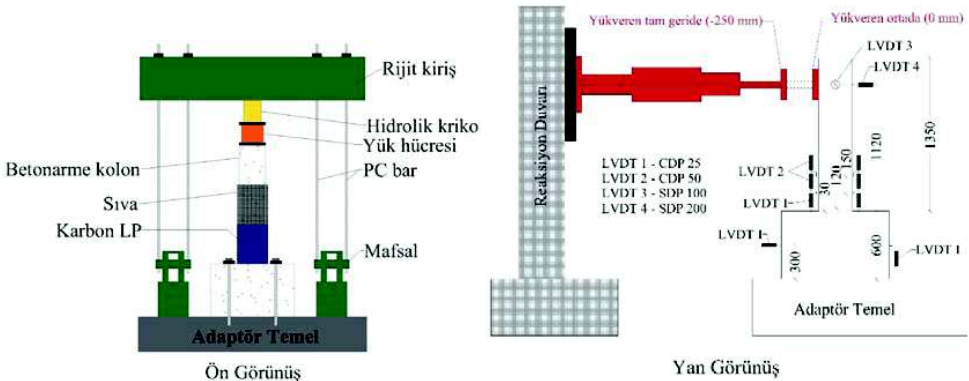
Değişken Diferansiyel Transformatör (LVDT) yerleştirilecektir. Ayrıca numunelerin toplam eksenel kısılmasını izlemek amacıyla üst ve alt yükleme plakaları arasında dört adet tam boy LVDT konumlandırılacaktır (Şekil 4b). Tüm ölçümler veri toplama sistemi aracılığıyla kaydedilecek ve bilgisayar ortamında depolanacaktır.



Şekil 4. Numune ve deney düzeneğine ilişkin detaylar: (a) şekildeğiştirme ölçerlerin yerleşimi (b) deney düzeneği ve ölçüm sistemi (ölçüler mm birimindedir).

Betonarme kolon numuneleri, sabit eksenel yük altında yerdeğiştirme kontrollü tersinir çevrimsel yanal yükler etkisinde test edilecektir. Yanal yük, kolon tabanından 1120 mm yükseklikte, 250 kN yük ve ± 250 mm deplasman kapasiteli servo kontrollü MTS marka hidrolik yükveren ile uygulanacaktır (Şekil 5). Eksenel yük, kolon üstü ile rijit çelik kiriş arasında yerleştirilen hidrolik kriko yardımıyla uygulanacak ve deney boyunca sabit tutulmasına azami gayret gösterilecektir. Tüm kolonlarda eksenel yük oranı 0.60 olarak belirlenmiştir. Bu değer, düşük beton dayanımına sahip mevcut zemin kat kolonlarında karşılaşılabilecek elverişsiz bir gerilme durumunu temsil etmek üzere seçilmiştir.

Kolon numunelerinin genel ve yerel deformasyonlarını izlemek amacıyla her bir numune üzerine, farklı ölçüm kapasitelerine sahip (CDP25, CDP50, SDP100 ve SDP200) toplam 11 adet LVDT yerleştirilecektir (Şekil 5). Kolon tepe yatay yerdeğiştirmesi yükleme doğrultusunda yerleştirilecek bir LVDT (LVDT 4) ile, düzlem dışı yerdeğiştirmeler ise buna dik doğrultuda yerleştirilecek ikinci bir LVDT (LVDT 3) ile ölçülecektir. Temelin yatay yerdeğiştirmesi ve dönmesi de ek sensörlerle sürekli izlenecektir. Plastik mafsal bölgesindeki yerel deformasyonları ve eğrilik dağılımını belirlemek amacıyla kolonun karşılıklı iki yüzüne, temel üst kotundan 30 mm, 150 mm ve 300 mm yüksekliklere toplam altı adet düşey LVDT (LVDT 1 ve LVDT 2) yerleştirilecektir (Şekil 5).

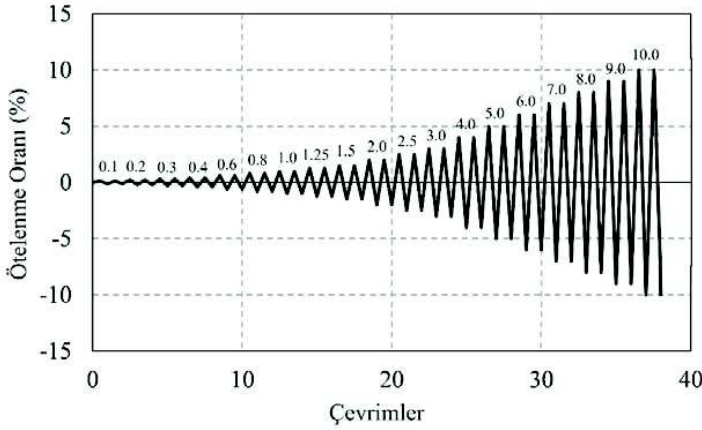


Şekil 5. Tez düzeneği ve sensör konumları (ölçüler mm birimindedir)

Yükleme Protokolü

Çevrimsel yüklemeye, ACI 374.2R-13’de önerilen yerdeğiştirme kontrollü yüklemeye protokolüne uygun olarak belirlenmiştir. İlgili standarda göre yüklemeye adımları akma ötelenme oranı cinsinden tanımlanmıştır. Ötelenme oranı, tepe ötelenmesinin kolonun kesme açıklığına oranı olarak ifade edilmektedir. Numunelerin farklı süneklik düzeylerine sahip olması nedeniyle, yüklemeye protokolünün tanımlanmasında en düşük sünekliğe sahip UK-SK0 kolonu esas alınmıştır. Bu numune için teorik akma ötelenme oranı %0.4 olarak hesaplanmıştır. %1.00 ötelenme oranına kadar hedef ötelenmeler akma ötelenmesinin katları şeklinde belirlenmiş, daha ileri ötelenme seviyeleri ise test süresi ve ulaşılması hedeflenen en büyük ötelenme oranı dikkate alınarak tanımlanmıştır.

Her hedef ötelenme için iki tam tersinir çevrimi yüklemeye çevrimi uygulanmıştır. Bu yaklaşım, çevrimsel rijitlik kaybı, dayanım azalması ve hasar birikiminin güvenilir şekilde gözlenebilmesini sağlayacaktır. Uygulanan yüklemeye patronu Şekil 6’te gösterilmektedir.



Şekil 6. Yüklemeye patronu

BEKLENEN SONUÇLAR VE OLASI KATKILAR

Prizmatik numuneler üzerinde gerçekleştirilecek eksenel basınç deneyleri ile sıva kalınlığı, sıva dayanımı ve KLP kalınlığının sargı etkinliği üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılması beklenmektedir. Tersinir çevrimsel yanal yükler altında tam ölçekli betonarme kolonlar üzerinde gerçekleştirilecek deneyler ile bu değişkenlerin süneklik, yatay ötelenme kapasitesi ve hasar gelişimi üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

Elde edilecek sonuçların, sıva tabakası kaldırılmadan gerçekleştirilebilecek KLP güçlendirme uygulamalarının etkinliğine ilişkin deneysel veri ve gözlem sağlaması beklenmektedir. Ayrıca, bu bulguların sıva–beton-KLP etkileşiminin farklı yüklemeye koşulları altında daha iyi anlaşılmasını sağlaması ve ilgili güçlendirme uygulamalarının değerlendirilmesine yönelik bir veri tabanı oluşturması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- ACI Committee 440 (2023) Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI PRC-440.2-23), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI
- ACI Committee 374 (2013) Guide for Testing Reinforced Concrete Structural Elements under Slowly Applied Simulated Seismic Loads (ACI 374.2R-13), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI

- ASTM International (2017) ASTM D3039: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA
- Comert M, Goksu C and Ilki A (2009) “External confinement of concrete with post-tensioned GFRP sheets—A pilot study”, *Proceedings of the 9th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-9)*, Sydney, Australia
- Comert M, Goksu C and Ilki A (2010) “Towards a tailored stress–strain behavior for FRP-confined low strength concrete”, *Proceedings of the Third International fib Congress*, Washington, DC
- European Committee for Standardization (CEN) (2016) EN 196-1: Methods of Testing Cement—Part 1: Determination of Strength, European Committee for Standardization, Brussels
- European Committee for Standardization (CEN) (2019) EN 12390-3: Testing Hardened Concrete—Part 3: Compressive Strength of Test Specimens, European Committee for Standardization, Brussels
- European Committee for Standardization (CEN) (2023) EN 12390-6: Testing Hardened Concrete—Part 6: Tensile Splitting Strength of Test Specimens, European Committee for Standardization, Brussels
- Fan L, Jin L and Du X (2022) “Influence of medium-low strain rate on the axial failure of CFRP-confined concrete columns: Meso-scale modellings”, *Construction and Building Materials*, 348:128666
- Genc AG, Ispir M, Karakaya B and Ilki A (2025) “Strength and deformability of FRP-jacketed large-size concrete cylinders after exposure to long-term actual environmental effects”, *Journal of Composites for Construction*, 29(4)
- Ilki A, Peker O, Karamuk E, Demir C and Kumbasar N (2008) “FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular reinforced concrete columns”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(2):169–188
- Ispir M (2015) “Monotonic and cyclic compression tests on concrete confined with PET-FRP”, *Journal of Composites for Construction*, 19(1):04014034
- Karantzakis M, Papanicolaou CG, Antonopoulos CP and Triantafillou TC (2005) “Experimental investigation of nonconventional confinement for concrete using FRP”, *Journal of Composites for Construction*, 9(6):480–487
- Lam L and Teng JG (2003) “Design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 22(13):1149–1186
- Lin G and Teng JG (2020) “Advanced stress–strain model for FRP-confined concrete in square columns”, *Composites Part B: Engineering*, 197:108149
- Samaan M, Mirmiran A and Shahawy M (1998) “Model of concrete confined by fibre composites”, *Journal of Structural Engineering*, 124(9):1025–1031
- TBDY (2018) Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara
- Yavuzer MN, Kölemenöğlu S, Balcı C, Ispir M and Ilki A (2022) “An experimental study on the compression behavior of CFRP-jacketed plastered RC columns”, in Zingoni A (ed.), *Current Perspectives and New Directions in Mechanics, Modelling and Design of Structural Systems*, CRC Press/Balkema, Cape Town

DOĞRUSAL ÇALIŞMAYAN YENİLİKÇİ BİR VİSKOZ DEPREM SÖNÜMLEYİCİSİNİN ÜRETİLMESİ VE ÖN TESTLERİ

MANUFACTURE AND PRELIMINARY TESTING OF A NOVEL NON-LINEAR VISCIOUS SEISMIC DAMPER

İbrahim Utku DEMİRBAŞ¹, Eray ÖZBEK² ve Sabahattin AYKAÇ³

ÖZET

Viskoz sıvılı sönümleyiciler (FVD), yapıların deprem performansının iyileştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel FVD' ler deprem anında hızla bağlı sabit bir sönümleme katsayısına bağlı olarak lineer davranış sergilemektedirler. Ancak yapının yatay ötelenmesi arttıkça oluşan iç kuvvetler de artmaktadır. Bu nedenle yapının bu talebine uygun davranış gösterebilecek şekilde non-linear çalışan bir FVD tasarlanmış ve üretilmiştir. Bir başka ifadeyle artan yer değiştirmeye bağlı olarak FVD' nin de oluşturduğu direnci arttırması hedeflenmiştir. Böylece yapının kendini tekrar merkezlemesinin daha etkin şekilde gerçekleşebileceği düşünülmüştür. Bu çalışmada, üretilen yeni tip FVD' nin tasarım prensipleri ve ön test sonuçları aktarılmıştır. Serbest düşme hareketine dayalı darbe testleri ile dinamik performans belirlenmiştir. Test sonuçları, piston açıldıkça tasarımın özgün bileşeni olan kademeli baypas boruları sayesinde non-linear bir karakter sergilediğini ortaya koymuştur. Elde edilen deplasman-zaman, basınç-zaman ve kuvvet-deplasman ilişkileri ile cihaz aktarılan kinetik enerjinin etkin bir şekilde sönümlenebildiği ve buna ek olarak geleneksel FVD davranışından belirgin bir şekilde ayrıldığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Viskoz sıvılı sönümleyici, Doğrusal olmayan sönümleyici, Deprem

ABSTRACT

Fluid Viscous Dampers (FVDs) are widely used to improve the seismic performance of structures. Conventional FVDs exhibit linear behavior during earthquakes due to a constant damping coefficient dependent on velocity. However, as the horizontal displacement of the structure increases, the internal forces generated also increase. Therefore, a non-linear FVD was designed and manufactured to exhibit behavior suitable for this structural requirement. In other words, aim is to increase the resistance created by the FVD in response to the increasing displacement. Thus, it was thought that the re-centering itself of the structure could be achieved more effectively. In this study the design principles and preliminary test results of the newly produced type of FVD are presented. Dynamic performance was determined through impact tests based on free-fall motion. Test results revealed that, thanks to the stepped bypass pipes, a unique component of the system, the design exhibits a non-linear character as the piston opens. The displacement-time, pressure-time, and force-displacement relationships obtained revealed that the kinetic energy transferred to the device could be effectively dissipated, and that this behavior deviated significantly from conventional FVD.

Keywords: Fluid viscous damper, Non-linear damper, Impact test, Seismic

¹ Araştırma Görevlisi, Gazi Üniversitesi Müh. Fak., Ankara, ibrahimutkudemirbas@gazi.edu.tr

² Doç. Dr., Gazi Üniversitesi Müh. Fak., Ankara, erayozbek@gazi.edu.tr

³ Prof. Dr., Gazi Üniversitesi Müh. Fak., Ankara, saykac@gazi.edu.tr

GİRİŞ

Deprem yüküne karşı geniş kesitli ve yüksek donatılı yapı elemanlarını tasarlamak yerine, yapıya etki eden deprem yükünün etkisini azaltan sistemler geliştirip daha ekonomik ve sürdürülebilir tasarımlar yapmak modern yapı mühendisliğinin temel yaklaşımı olmaya başlamıştır.

Bu amaçla çeşitli sismik izolatörler ve sönümleyiciler geliştirilmiştir. Sönümleyiciler ise kendi içinde çalışma prensiplerine göre pasif, aktif ve yarı-aktif gibi gruplara ayrılmaktadır (Soong ve Dargush, 1997). Hıza bağlı pasif sönümleyiciler alt sınıfına dâhil olan viskoz sıvılı sönümleyiciler (Fluid Viscous Dampers – FVD), yüksek performansları, düşük bakım-onarım maliyetleri ve pratik uygulanabilir olmaları nedeniyle yaygın kabul görmektedir (Taylor Devices Inc., 2019). Geleneksel FVD sistemlerin çalışma prensibi, Eşitlik-1'de üzere sönümleme kuvvetinin sabit sönümleme katsayısı ve hızın bir kuvveti ile orantılı olduğu bir ilişki üzerine kuruludur (Makris ve Constantinou, 1991).

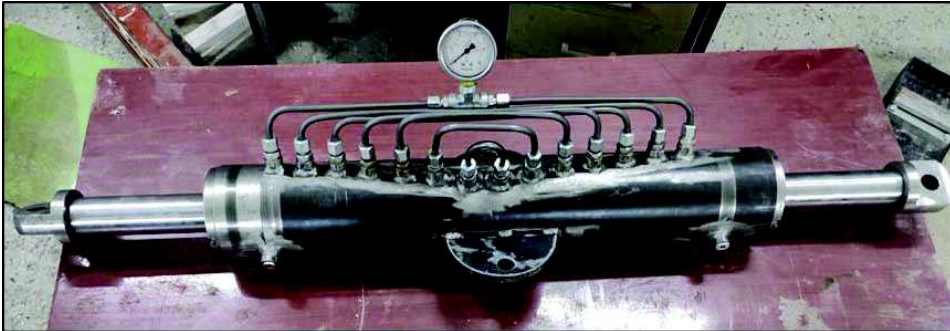
$$F = C \times V^\alpha \quad (1)$$

Hız üssünün (α) 1'e yakın olduğu durumlarda bu sistemler yapının davranışından bağımsız olarak hep aynı direnci göstermektedirler. Ancak deprem etkisiyle yapının yatay ötelenmesi arttıkça oluşan iç kuvvetler de artmaktadır. Dolayısı ile sabit bir dirençten ziyade, ötelenmeler arttıkça artan bir direncin yapıyı daha etkin bir şekilde yeniden merkezlemesini sağlayabileceği düşünülmüştür. Geleneksel FVD'lerin yapısal dinamik etkilere uyum sağlama kabiliyetinin sınırlı olması, sismik performans hedeflerine ulaşılmasında önemli kısıtlamaları beraberinde getirmektedir. Bu sınırlamalar, sönümleme direncinin yapısal deplasmana veya hıza göre pasif olarak değişkenlik gösterebilecek, kendini merkezleyen (yeniden merkezleme sistemleri) veya basınç kontrollü yeni tasarımlara olan talebi arttırmaktadır (Zhang vd., 2026).

Bu çalışma, geleneksel FVD sistemlerdeki bu önemli boşluğa yönelik katkı sağlamak amacıyla yapılmıştır. Araştırmanın amacı, FVD sistemde piston mesafesi (strok) boyunca deplasmana bağlı direnç değişimini mekanik olarak düzenleyerek, deprem yükleri altında doğrusal olmayan davranış gösteren özgün bir sönümleyici prototipinin deneysel doğrulamasını sunmaktır.

YENİ FVD TASARIMI

Geliştirilen yeni sönümleyici prototipinin tasarımı, pasif enerji sistemleri için uluslararası kabul görmüş TS EN 15129 (Anti-seismic devices) standardında belirtilen işlevsel gereklilikler ve sınır durumlar dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir (TSE, 2020). Geleneksel FVD tasarımlarından farklı olarak, bu çalışmada sunulan özgün sistemde, sönümleme kuvvetinin yalnızca hıza bağlı kalmayıp piston konumuna göre de kademeli olarak değişmesi hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, FVD sistemin çelik silindirik gövdesinin dışına, viskoz sıvının kademeli geçişine izin veren farklı uzunluklardaki 7 adet baypas borusu entegre edilmiştir (Şekil 1.).

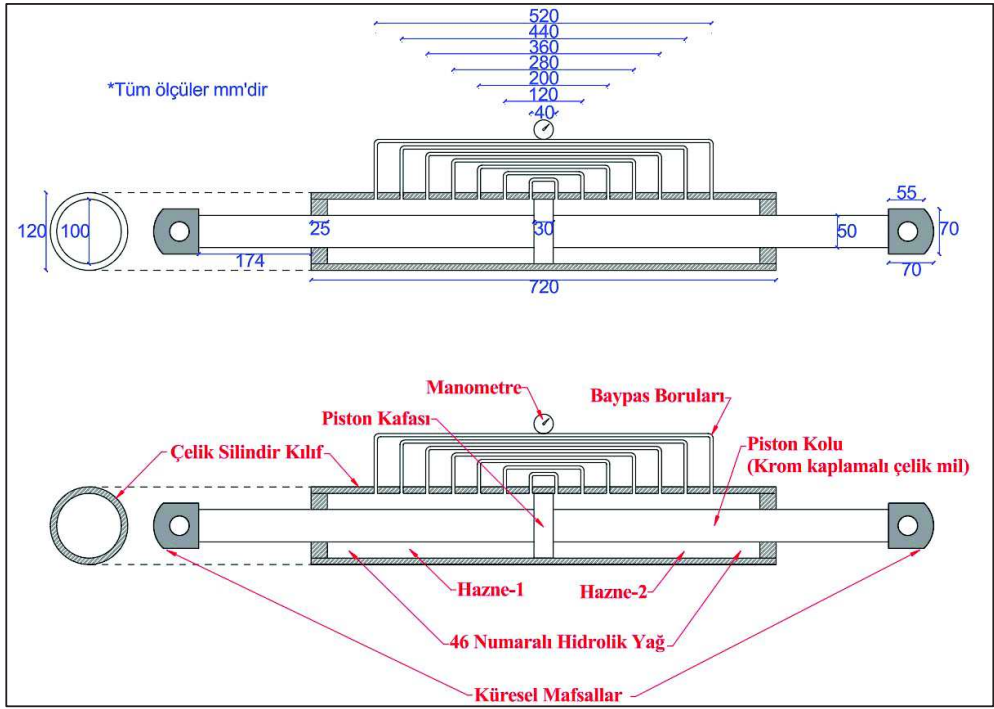


Şekil 1. Yeni Geliştirilen FVD Sistemin Prototipi

Tasarımın çalışma prensibi, piston kafasının silindir gövde içerisinde iç basıncın en zayıf olduğu orta noktada konumlandığı durumdan, herhangi bir uca doğru hareket ederek strok mesafesinin artması ile baypas borularının girişlerinin sırasıyla kapanması sonucu viskoz sıvının akış alanının kademeli olarak daralması ve iç basıncın (sönümleme kuvvetinin), strokla ilişkili olarak değişmesidir.

Tasarımda, yükün ekstenel olarak aktarılmasını sağlamak amacıyla, standardın gerekliliklerine uygun olarak, deprem kaynaklı deplasmanları ve montaj sırasındaki hizalama hatalarını tolere edebilecek düzeyde en az $\pm 2^\circ$ dönme kapasitesine sahip küresel mafsallar kullanılmıştır. Deneysel çalışma için üretilen prototipin malzeme seçimi, korozyon direnci, dayanım ve sızdırmazlık performansı gözetilerek yapılmıştır. Sistemin ana gövdesini oluşturan silindirik kılıf, S235 sınıfı çelikten imal edilmiş olup, iç yüzeyi sürtünmeyi minimize etmek ve sızdırmazlığın sağlanması amacıyla honlanmıştır. Bir diğer bileşen olan piston kolu, korozyonu önlemek ve aşınma direncini artırmak amacıyla krom kaplama yapılmış S235 sınıfı çelik milden üretilmiştir.

Sönümleyici içerisindeki viskoz sıvı olarak, endüstriyel uygulamalarda yaygınlığı ve kararlı viskozite özellikleri nedeniyle 46 numaralı hidrolik yağ tercih edilmiştir. Piston kolunun hareket edebileceği toplam genlik 348 mm'dir. Piston kafasının tam iç basıncın en zayıf olduğu orta noktada konumlandırıldığı durumda ise her iki yöne 174 milimetrik bir hareket kapasitesine sahiptir. Ayrıca sistemin anlık iç basınç değişimlerini izleyebilmek adına, 10 bar kapasiteli ve %2,5 hassasiyet sınıfına (CL 2,5) sahip, TS EN 837-1 standardına uygun bir analog manometre, en dış baypas borusunun ortasından sisteme dâhil edilmiştir (TSE, 1997). Yeni tasarımın geometrik ölçüleri ise Şekil 2.'de verilmiştir.



Şekil 2. Yeni Tasarımın Bileşenleri ve Geometrik Ölçüleri

Prototipi oluşturan çelik mekanizmanın analizi ve tasarımı TS EN 15129 ve Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları (2016) ilkeleri doğrultusunda yapılmıştır. Böylece cihazın güvenle taşıyabileceği yük 165 kN olarak belirlenmiştir.

YÖNTEM VE DENEY SİSTEMİ

Yöntem

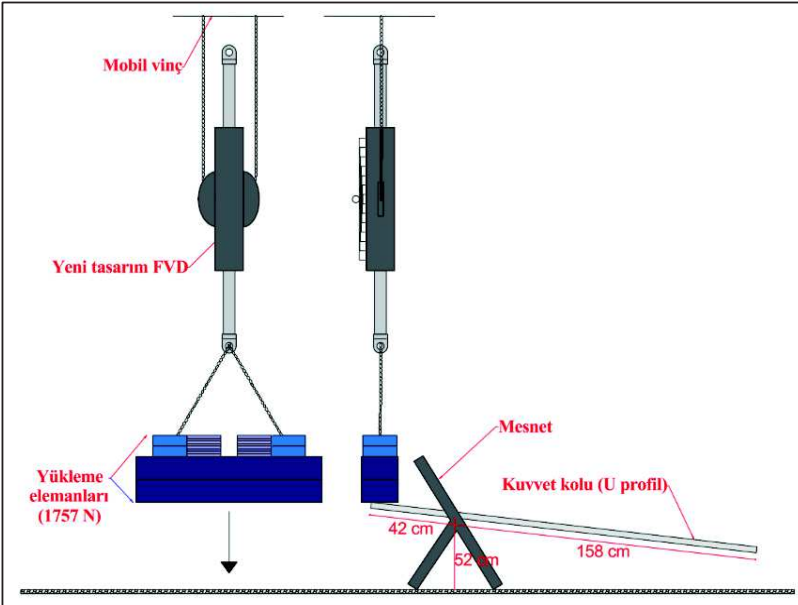
Yapısal kapasite kontrolü yapılmış olan prototipin, mekanik performansını ve dinamik davranışını incelemek amacıyla imkânlar dâhilinde deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, sönümleyicinin piston genliğinin (strok) doğrulanması, darbe testleri için deney düzeneğinin kurulması, yüklemelerin uygulanması ve kayıt altına alınan görüntülerden bilgisayar ortamında verilerin toplanması adımları izlenmiştir.

Sönümleyicinin tasarım parametrelerine uygunluğunu teyit etmek ve çalışma aralığını kesin olarak belirlemek için piston kolu, üç kez bir tarafı tam kapalı konumdan tam açık konuma kadar hareket ettirilerek maksimum uzama mesafeleri ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda piston genliği 348 mm olarak doğrulanmıştır.

Deneysel Sistem

Darbe testlerinin yükleme protokolü planlanırken, sönümleyicinin stroka bağımlı direnç değişimi karakteristiğini en net şekilde gözlemleyebilmek hedeflenmiştir. Bu amaçla, piston kafasının silindirik gövde içerisinde direncin en düşük olduğu strok mesafesinin tam orta noktasına yerleştirilmesi kararlaştırılmıştır. Deneylerin başlangıç pozisyonu olarak belirlenen bu konumda, piston kolunun bir uçtaki silindirik gövde dışında kalan aktif uzunluğu 174 mm olarak ayarlanmıştır.

Sönümleyiciye dikey doğrultuda darbe yüklemesi uygulayabilmek için yerçekimi kuvvetinden yararlanan basit bir deney düzeneği oluşturulmuştur (Şekil 3.). Sönümleyici, çelik silindirik kılıfın yanlarına kaynatılmış bağlantı kulaklarından, yüksek dayanımlı bir taşıyıcı zincir vasıtasıyla mobil vinç sistemine asılarak dikey konuma getirilmiştir. Serbest düşme ile dinamik yükü oluşturacak ağırlık, sistemi harekete geçirebilecek kadar büyük, nitelikli gözlemlerin yapılabilmesini sağlayacak kadar küçük olacak şekilde deneme testleriyle 1757 N olarak belirlenmiştir. Bu ağırlığın sönümleyicide bir darbe etkisi oluşturabilmesi için kaldırma prensibi ile çalışan bir mekanizma kurulmuştur (Şekil 3.).



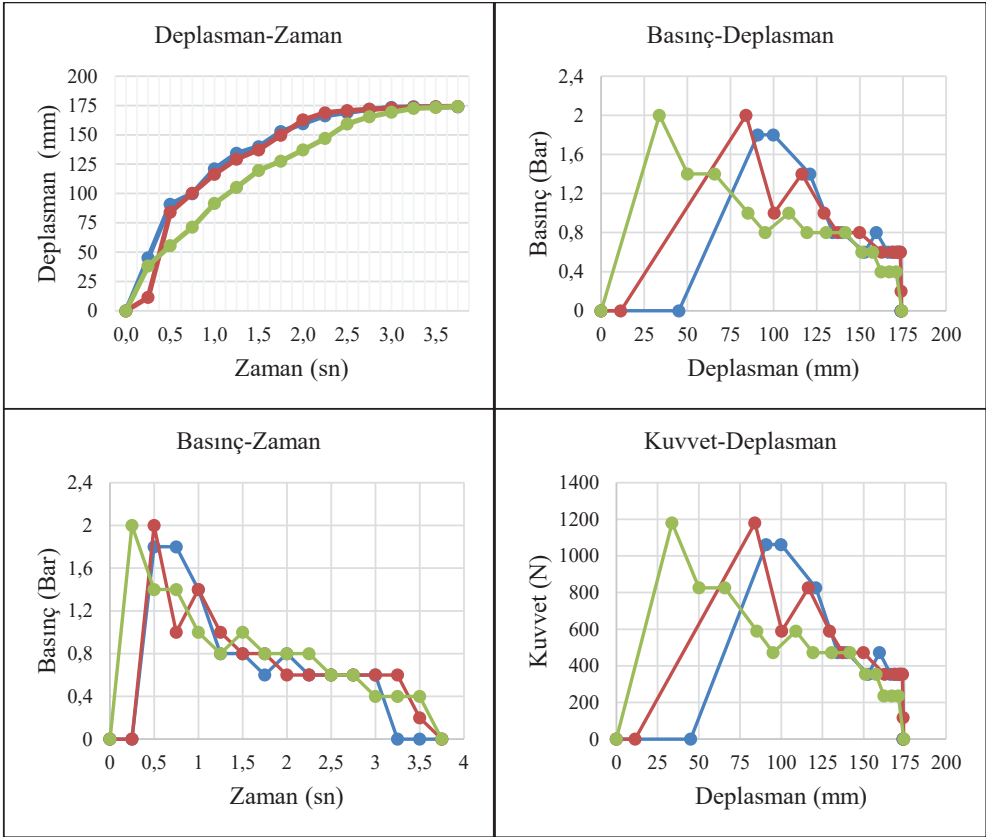
Şekil 3. Yükleme düzeneği

DeneySEL verilerin güvenilirliğini sağlamak ve sönümleyicinin tekrarlanan yükler altındaki davranışını karşılaştırmak amacıyla aynı koşullar altında üç adet ani yüklemeye testi gerçekleştirilmiştir.

Verilerin Toplanması

Darbe testleri sırasında anlık gerçekleşen davranış değişimlerini hassas bir şekilde tespit edebilmek amacıyla yüksek çözünürlüklü kamera ile 4 kat ağır çekimde kayıt yapılmıştır. Temassız bir ölçüm yöntemi olan bu optik görüntüleme tekniği, pistonun hareketini ve manometredeki basınç değişimlerini ölçmeye olanak sağlamıştır. Kaydedilen video verisi, dijital ortamda 0,25 saniyelik gerçek zamanlı periyotlara bölünmüş ve her bir periyot için ekran görüntüleri alınmıştır.

Sayısal verilerin elde edilmesi aşamasında, ekran görüntüleri bilgisayar yazılımına aktarılmış ve imalat çapı 50 mm olduğu bilinen piston kolu sabit referans kabul edilerek ölçeklendirme işlemi yapılmıştır. Bu oran kullanılarak her bir görüntü üzerindeki deplasman, gerçek milimetre değerlerine dönüştürülmüş ve eş zamanlı olarak manometredeki mevcut iç basınç değerleri okunmuştur. Elde edilen veriler ile üç deney için de Deplasman-Zaman, Basınç-Zaman ve Basınç-Deplasman grafikleri oluşturulmuştur. Son olarak Basınç-Deplasman grafiği ve piston kafası net alanı kullanılarak Kuvvet-Deplasman grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 4. Karşılaştırmalı Deney Sonuçları Grafikleri

SONUÇ

Elde edilen grafikler incelendiğinde, zamana bağlı deplasman artışında azalma olduğu, sistemin doğrusal olmayan bir şekilde direnç artışı sağlayarak hedeflenen davranışı yerine getirdiği açıkça görülmektedir. Sistemin Basınç-Zaman ilişkilerine bakıldığında ise, yükleme sonrası hareketin başında 1,8 ila 2,0 Bar aralığında ölçülen pik basınç değerleri, tasarımın darbe yüklerini karşılama kapasitesinin tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Basınç-Deplasman eğrilerinden elde edilen Kuvvet-Deplasman eğrileri altında kalan alanlar, trapez integrasyon yöntemiyle hesaplanmıştır. Her bir

deneyde sönmülenen enerjiler; ilk deneyde 78,6 J, ikinci deneyde 97,2 J ve son deneyde 105,0 J olarak hesaplanmıştır. Yapılan yüklem sonucunda sistem ortalama 93,6 J enerji sönmülemiştir. Sonuçlar arasındaki farkların, görüntüler üzerinden yapılan ölçümlerdeki ufak beşeri hataların kümülatif etkisi veya manometrenin tepki süresinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çalışma ile yeni tasarım FVD'nin ön testler sonucunda hedeflenen davranışı sergilediği, geleneksel FVD sistemlere kıyasla daha uyarlanabilir ve yenilikçi bir sönmüleme performansı sunma potansiyeli olduğu söylenebilmektedir.

Deneysel süreçte kısıtlı imkânlar nedeniyle bazı sınırlamalar gözlemlenmiştir. Özellikle mobil vinç ve taşıyıcı zincir sisteminden kaynaklı küçük salınımların, görüntülerden ölçüm yapılması süresince veri hassasiyetinde ufak sapmalara neden olduğu düşünülmektedir. Bu bağlamda, gelecekteki çalışmalarda bazı iyileştirmeler yapılması önerilmektedir.

Öncelikle, sönmüleyicinin mobil vinç ile askı halinde konumlandırılması yerine rijit bir çelik çerçeveye sabitlenmesi istenmeyen ufak salınımları engelleyecek ve daha sağlıklı veriler elde edilmesini mümkün kılacaktır. Yüklemenin kaldıraç mekanizması gibi basit ve beşeri unsurun çok olduğu bir yöntem yerine hidrolik krikto sistemleri ile daha kontrollü yapılması daha sağlıklı olacaktır. Basınç değişimlerinin, mevcut analog manometre yerine daha yüksek hassasiyetli dijital manometreler ile okunması ve sistemin hareketinin olabildiğince yüksek çözünürlüklü ağır çekim kameralar ile kayıt altına alınması, verilerdeki olası hataları en aza indireyecektir.

Son olarak, mevcut çalışma kapsamında beklenen davranışı sergileyen yeni tasarımın, baypas borularının çapı ve sayısındaki değişimlerin sönmüleme davranışına etkisi, farklı sıcaklıklar altındaki davranışı gibi parametrik özellikleri incelenebilir. Sismik performansın belirlenmesi için çevrimsel yüklem testleri ile histerezis eğrilerinin tam olarak oluşturulması gibi gelecekteki farklı çalışmalar ile tasarımın etkinliği ve karakteristiğinin daha iyi gözlemlenebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- ÇYHY-2016 (2016) Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara
- Makris, N., Constantinou, M. C. (1991) "Fractional-derivative Maxwell model for viscous dampers", *Journal of Structural Engineering*, 117(9):2708–2724
- Soong, T. T. and Dargush, G. F. (1997) Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, John Wiley and Sons, New York
- Taylor Devices Inc. (2019), Fluid viscous dampers: General guidelines for engineers including a brief history, Taylor Devices Inc., North Tonawanda
- TS EN 15129 (2020) Anti-sismik cihazlar, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara
- TS EN 837-1 (1997) Basınç göstergeleri – Bölüm 1: Borulu yaylı – Genel özellikler, güvenlik gerekleri, testler, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara
- Zhang J, Liang H, Zhang Z, Lu Y, Wang Z, Xie W, Li J (2026) "Experimental Study and Parameter Design Method on the Performance of a Novel Variable Coefficient Viscous Fluid Damper", *Journal of Earthquake Engineering*, 1-24

NEODİMYUM MİKNATISLI PASİF BİR DAMPERİN TASARIMI VE DENEYSSEL DEĞERLENDİRME YAKLAŞIMI

DESIGN AND EXPERIMENTAL EVALUATION FRAMEWORK OF A PASSIVE DAMPER WITH NEODYMIUM MAGNETS

Gazi ÇİÇEK¹ ve Osman KAYA²

ÖZET

Bu çalışma, neodimyum mıknatıslarla çalışan pasif bir damper modelinin yapı sistemlerinin davranışına katkısını deneysel olarak değerlendirmeye yönelik bir araştırma çerçevesi sunmaktadır. Önerilen prototip tasarımı; silindirik bir gövde, piston mili, uç kapaklar ile sabit ve hareketli mıknatıs bölgelerinden oluşmaktadır. Piston milinin halka mıknatıs bölgesinin içinden geçmesine olanak sağlayan bu düzenek, yapı sisteminin merkezlenme eğilimi, tepki azaltma potansiyeli ve deprem etkisi altındaki enerji emme kapasitesinin incelenmesine yöneliktir. Damper, ilerleyen aşamalarda viskoz akışkan kullanılarak geliştirilebilir bir tasarıma sahip olmakla birlikte, mevcut çalışma manyetik mekanizmanın bağımsız bir katkı olarak sağladığı etkiler üzerine odaklanmaktadır. Deney programında boş çerçeve, çaprazlı çerçeve ve çaprazlı-damperli çerçeve aynı sarsma tablası üzerinde karşılaştırılacaktır. Her bir düzenek üzerine 5 kg veya 10 kg büyüklüğünde üst kütle yerleştirilecek; ivme verileri ivmeölçer ile, yer değiştirme verileri ise Tracker yazılımı ile elde edilecektir. Deneysel veriler, SAP2000 veya Dlubal ortamında kurulacak sayısal model ile birlikte değerlendirilerek damper kuvveti, kuvvet-yer değiştirme çevrimleri ve histerezis alanı üzerinden enerji emme kapasitesinin yorumlanmasına hizmet edecektir. Bu çalışma, nihai sonuçlardan önce deney tasarımı, ölçüm planı ve beklenen performans göstergelerini ortaya koyan bir ön araştırma niteliğindedir.

Anahtar Kelimeler: Neodymium mıknatıs, pasif damper, merkezlenme, histerezis

ABSTRACT

This paper introduces an experimental framework for testing a passive damper that uses neodymium magnets. The prototype includes a cylindrical body, a piston rod, end caps, and both fixed and moving magnet regions. With this setup, the piston rod slides through ring-shaped magnet zones. The study looks closely at how the magnetic mechanism affects self-centering, reduces dynamic responses, and absorbs energy in a frame system. Even though the damper could eventually include a viscous fluid, this research concentrates on the magnetic action alone. The experiment compares three configurations on the same shake table: a bare frame, a braced frame, and a braced frame fitted with the magnetic damper. Each setup uses a top mass of either 5 kg or 10 kg. Accelerometers record acceleration, and Tracker software tracks displacement. The results from these experiments are reviewed alongside numerical models in SAP2000 or Dlubal. The goal is to estimate damper force, generate force-displacement loops, and assess energy absorption through hysteresis. This paper doesn't focus on final outcomes. Instead, it lays out the test setup, explains how measurements will be taken, and defines expected performance indicators—providing a clear, systematic foundation for the work that follows.

Keywords: Neodymium magnet, passive damper, self-centering, hysteresis

¹Yüksek Lisans Öğrencisi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Muğla

²Dr. Öğr. Üyesi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Muğla.

GİRİŞ

Dinamik etkiler altında çalışan yapı sistemlerinde yer değiştirme kontrolü, ötelenmenin sınırlandırılması ve enerji emme kapasitesinin artırılması, deprem mühendisliğinin temel hedefleri arasında yer almaktadır. Bu nedenle, pasif sönümleyici sistemler birçok araştırmada dikkatli bir şekilde incelenmektedir (Chopra, 2014; Clough ve Penzien, 2003).

Neodimyum mıknatıs tabanlı düzenekler, temassız çalışma özellikleri, görece düşük bakım gereksinimi ve geri getirici kuvvet üretme potansiyeli ile alternatif pasif sistemler arasında öne çıkmaktadır. Literatürde, pasif elektromanyetik ve manyetik düzeneklerin düşük enerji ihtiyacı ile titreşim kontrolüne önemli katkılarda bulunduğu ifade edilmektedir (Díez-Jiménez ve diğ., 2019; Zhang ve Hu, 2020).

Bu bildirinin amacı, ayrıntılı ürün optimizasyonu gerçekleştirmek değil; önerilen damper geometrisinin laboratuvar ölçeğinde gerçekten işlevsellik gösterip göstermediğini, çerçeve sistem davranışına ölçülebilir bir katkı sağlayıp sağlamadığını ve histerezis döngüleri üzerinden enerji yutma konusunda anlamlı bir alan oluşturup oluşturmadığını değerlendirmek için oluşturulan deneysel yaklaşımı sunmaktır.

ÖNERİLEN DAMPER SİSTEMİ

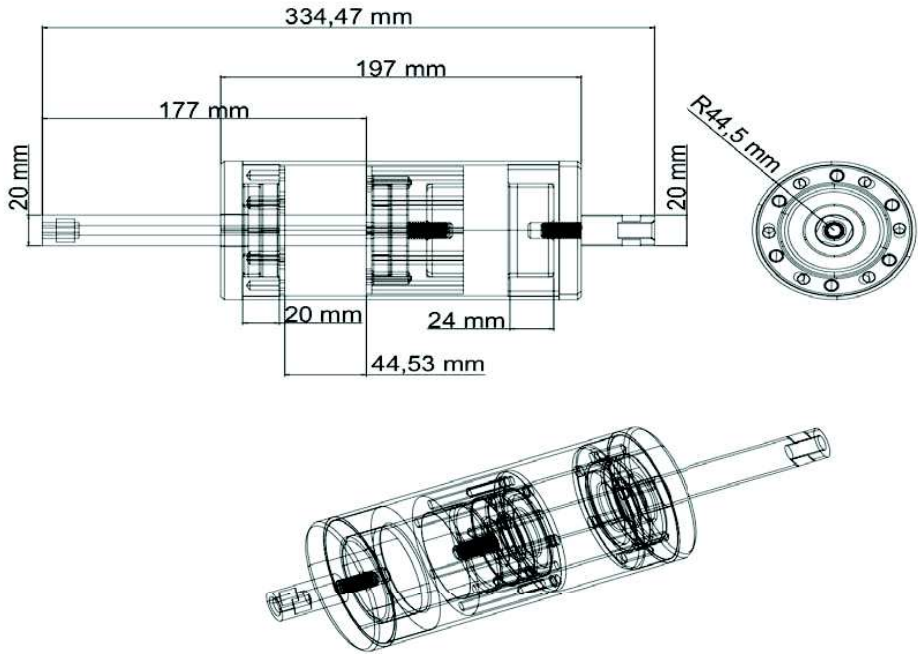
Geometri, Bileşenler ve Tasarım Mantığı

Önerilen damper sisteminde, dış yüzeyi silindirik bir gövde, uç kapaklar, piston mili ve hareketli mıknatıs bölgesinin yer aldığı bir piston ile sabit mıknatıs bölgelerini içeren eksenel hareketli pasif bir kontrol elemanı yer almaktadır. Sistem geometrisi, piston milinin halka biçimindeki mıknatıs bölgeleri arasından geçebilmesine olanak sağlayacak biçimde düzenlenmiş olup, sabit ve hareketli mıknatıs modülleri arasında strok boyunca değişen doğrusal olmayan bir manyetik etkileşim oluşturulmuştur. Prototip aşamasında altı adet neodimyum mıknatıs elemanı, damper gövdesi, piston modülü ve uç bölgelerine doğru kutup sırasıyla yerleştirilmiştir.

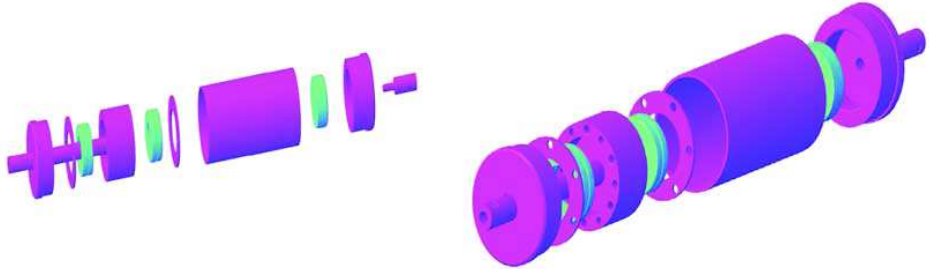
Tasarımın ana fikri, damperin sadece bir ek rijitlik sağlayan bir bileşen olarak işlev görmemesi, aynı zamanda yer değiştirmeye beraber bir geri getirici kuvvet oluşturarak sistemi mekizleme özelliğinde olmasıdır. Buna bağlı olarak mıknatıs düzenlemesi eksenel hareket sırasında itici bir etki yaratacak biçimde yapılmış olup, damperin çerçeve sistemin yatay kayma isteğini sınırlandırmasının yanı sıra deprem sonrası kalıcı kaymaları azaltmakta da etkili olması beklenmektedir. Bu bağlamda, özellikle klasik pasif sistemlerde merkezlenme davranışının sınırlı olduğu durumlarda bu özelliğin araştırılması amaçlanmaktadır.

Silindirik gövde ve eksenel detaylar, mıknatıs elemanların yerleşimini kolaylaştırmakta ve aynı zamanda laboratuvar ölçeğinde üretim ve montaj işlemleri için fizibilite sağlamaktadır. Uç kapaklar ve bağlantı noktaları, Damperin çerçeve sistemine bağlanabilme detaylarını sağlar iken, Piston mili ile çalışan doğrusal hareketin mıknatıs bölgeleri arasındaki mesafeyi değiştirmesi sebebiyle damperin yük karakterinin en önemli unsurunu oluşturmaktadır. Bu sebeple, geometri, sadece bir taşıyıcı muhafaza çözümü değil, damperin kuvvet-yer değiştirme karakterini doğrudan etkileyen işlevsel bir tasarım parametresi olarak değerlendirilmelidir.

Önerilen ilk prototip, ilerleyen aşamalarda viskoz akışkan ile geliştirilebilir bir yapıya sahip olmakla birlikte, mevcut çalışmanın amacı yalnızca manyetik mekanizmanın sisteme sağladığı katkının araştırılmasıdır. Bu kapsamda çalışma, ayrıntılı bir parametre optimizasyonundan ziyade, önerilen geometrik düzenin laboratuvar ölçeğinde çalışabilir olup olmadığını ve çerçeve sistem davranışında ölçülebilir bir etkisinin bulunup bulunmadığını incelemeye yöneliktir. Bu açıdan tasarım yaklaşımı, nihai ürün geliştirmeye değil, deneysel doğrulamaya uygun, mekanik açıdan anlamlı ve karşılaştırmalı değerlendirmeye elverişli bir ilk prototip sunmaya dayanmaktadır.



Şekil 1. Neodymium miknatıslı damperin boyutlandırılmış tasarım çizimi (ölçüler mm cinsindedir)



Şekil 2. Damperin patlatılmış görünüşü (sol) ve perspektif görünüşü (sağ)

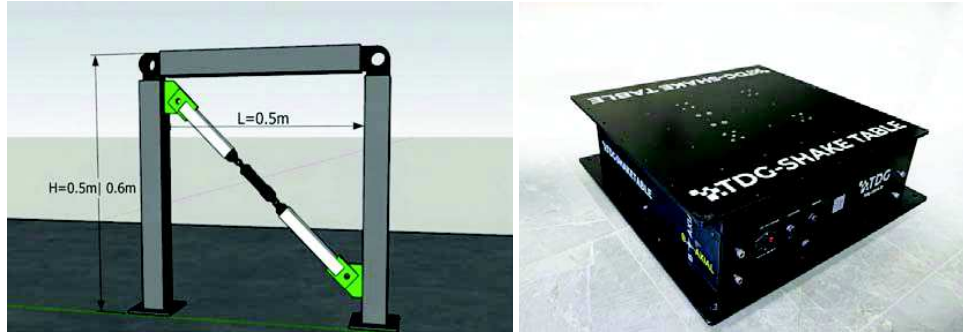
Şekil 1 ve Şekil 2'nin birlikte incelenmesi sonucunda, bu çalışmanın mevcut aşamasında sayısal ölçülerin yanı sıra damperin çerçeveye entegrasyonu, piston hareketini sağlayan iç yapı ve miknatısl bölgelerinin karşılıklı yerleşimi daha fazla ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda, tasarım çizimleri yalnızca görsel bir sunum unsuru olarak değil, aynı zamanda deney ortamında gerçekleştirilecek bağlantı ve montaj yöntemini açıklamak amacıyla da kullanılacaktır.

DENEYSEL DÜZENEK VE ÖLÇÜM PLANI

Çerçeve Sistemi ve Damper Yerleşimi

Deneylerde, zayıf eksen boyunca hareket edecek şekilde tasarlanmış üç farklı çerçeve kullanılacaktır: boş çerçeve, çaprazlı çerçeve ve çaprazlı-neodymium miknatıslı damperli çerçeve. Damper, çapraz eleman doğrultusunda çalışacak şekilde çerçeveye yerleştirilecektir; böylece sistem yatay yönde zorlandığında damper eksenel yönde çalışacaktır.

Her bir çerçevenin üzerine 5 kg veya 10 kg ağırlığında üst kütle konulacak, sistemin tepki genliği artırılabilecek, üst kütle bölgesine bir ivmeölçer yerleştirilecek ve yer değiştirmeleri Tracker yazılımı kullanılarak video görüntüsü üzerinden kayıtlandırılacaktır. Kullanılacak sarsma tablası ve damperin çerçeve içerisindeki kavramsal yeri Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Çerçeve açıklığı ($L=0.5m$) ve yüksekliği ($H=0.5m$ | $0.6m$) şematik olarak gösterilmiş damper yerleşimi (sol) ve deneylerde kullanılacak sarsma tablası (sağ)

Tablo 1. Deney düzenekleri ve karşılaştırma planı

Düzenek	Taşıyıcı tip	Damper	Üst kütle	Ölçümler	Temel amaç
D1	Boş çerçeve	Yok	5 / 10 kg	$a(t)$, $x(t)$, $v(t)$	Referans davranış
D2	Çaprazlı çerçeve	Yok	5 / 10 kg	$a(t)$, $x(t)$, $v(t)$	Rijitlik etkisi
D3	Çaprazlı çerçeve	Neodymyum mıknatıslı pasif damper	5 / 10 kg	$a(t)$, $x(t)$, $v(t)$, $F-x$	Damper katkısı ve merkezlenme

Tablo 2. Önerilen damperin ana bileşenleri ve işlevleri

Bileşen	Adet	Konum	Başlıca işlev
Silindirik gövde	1	Dış taşıyıcı kabuk	Damper bileşenlerini muhafaza etmek ve montaj bütünlüğü sağlamak
Piston mili	1	Merkezi eksen	Hareketin damper eksenine aktarılması
Halka mıknatıs bölgeleri	4 eleman	Gövde/piston ara bölgeleri	Piston milinin geçişine izin verirken manyetik etkileşim oluşturmak
Dolu mıknatıs bölgeleri	2 eleman	Uç bölgeler	Sabit-hareketli bölge etkileşimini tamamlamak
Uç kapaklar	2	Gövde uçları	Kapatma, bağlantı ve hizalama sağlamak
Bağlantı kulakları	2	Damper uçları	Çerçeveye pimli bağlantı yapılmasını sağlamak

SAYISAL MODELLEME VE DEĞERLENDİRME ÖLÇÜTLERİ

Deneilerde doğrudan damper kuvveti ölçülmeyeceğinden, elde edilen maksimum yer değiştirme ve zamana bağlı tepki kayıtları SAP2000 veya Dlubal yazılımlarıyla oluşturulacak sayısal modelin kalibrasyonu için kullanılacaktır. Böylece damper bölgesinde oluşan kuvvetler ve kuvvet-yer değiştirme ilişkisi, deney verileriyle birlikte yorumlanabilecek yardımcı bir araç olarak elde edilecektir. Bu yöntem, doğrudan ölçülmeyen büyüklüklerin açık ve izlenebilir biçimde tahmin edilmesine olanak sağlayacaktır.

Sistemin idealize edilmiş hareket denklemi, çerçeve rijitliği ve yapısal sönüm etkilerini temsil eden terimler ile manyetik geri getirici kuvvetin birlikte yer aldığı bir biçimde kavramsal olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$m \ddot{x}(t) + c_s \dot{x}(t) + k_s x(t) + F_m(x) = F_{\text{ext}}(t) \quad (1)$$

$$F_i(t) = m a(t) \quad (2)$$

$$\Delta W = \oint F dx \quad (3)$$

Burada c_s yapının genel sönüm etkisini, k_s çerçeve rijitliğini ve $F_m(x)$ manyetik geri getirici kuvveti ifade etmektedir. Denklem (2), ivmeölçerlerden elde edilecek ivme kayıtları ile atalet kuvvetinin hesaplanmasında kullanılacaktır. Denklem (3) ise sayısal modelden türetilen kuvvet-yer değiştirme çevrimleri yardımıyla manyetik damperin histerezis alanını ve çevrimsel enerji yutma kapasitesini değerlendirmek için esas alınacaktır.

Tablo 3. Ölçüm, veri işleme ve performans değerlendirme matrisi

Girdi / çıktı	Kaynak veri	Karşılaştırılacak büyüklük	Yorum amacı
İvme-zaman grafiği	İvmeölçer	Pik ivme, genlik, sönümlenme hızı	Dinamik tepki kıyası
Yer değiştirme-zaman grafiği	Tracker	Tepe ötelenme, artık ötelenme	Yanal salınım ve merkezlenme
Hız-zaman grafiği	x(t) türevi	Salınımın yerleşme süresi	Sönümlenme karakteri
Kuvvet-yer değiştirme çevrimi	Sayısal model + deney	Çevrim alanı, rijitlik eğilimi	Histerezis ve enerji yorumu
Maksimum tepki değerleri	Toplu veri özeti	D1-D2-D3 karşılaştırması	Damper katkısının nicel ifadesi
Artık ötelenme	Tracker son kayıt	Merkeze dönüş eğilimi	Merkezlenme (self-centering) değerlendirmesi

Bu bağlamda, deneyin ardından oluşturulacak temel grafikler ivme-zaman, hız-zaman ve yer değiştirme-zaman karşılaştırmaları ile kuvvet-yer değiştirme çevrimleri olacaktır. Her bir grafik, bağımsız bir biçimde incelenmekle kalmayacak, üç düzeneğin aynı giriş altında birlikte değerlendirilmesi üzerinden yorumlanacaktır. Böylece, manyetik damperin yalnızca tepe tepkisini azaltıp azaltmadığı değil, aynı zamanda kalıcı ötelenme ve çevrimsel enerji açısından sisteme ne ölçüde katkıda bulunduğu da değerlendirilebilecektir.

ÖNGÖRÜLEN DAVRANIŞ VE DEĞERLENDİRME

Bu bildiri, tamamlanmış deney sonuçlarını sunan kesin bir rapor değil; önerilen damper sisteminin deney programını, görsel tasarımını ve değerlendirme yaklaşımını ifade eden bir ön

çalışma niteliğindedir. Bu nedenle, aşağıdaki yorumlar, deney sonrasında doğrulanacak veya güncellenecek tahminler olarak değerlendirilmelidir.

İlk olarak, damperli çerçevenin boş ve yalnızca çaprazlı sisteme kıyasla daha düşük tepe yer değiştirmesi, daha sınırlı artık ötelenme ve kuvvet-yer değiştirme çevriminde anlamlı bir alan üretmesi beklenmektedir. Eğer bu eğilim gözlemlenirse, önerilen düzen yalnızca ilave rijitlik sağlayan bir eleman olarak değil, aynı zamanda merkezlenme ve enerji emme açısından ölçülebilir bir katkı sunan pasif bir mekanizma olarak değerlendirilebilecektir.

İkinci olarak, SAP2000 veya Dlubal yazılımları aracılığıyla elde edilen damper kuvveti tahminleri ile deneysel yer değiştirme verileri bir arada kullanılarak histerezis çevrimleri oluşturulacaktır. Bu çevrimlerin alanı, damperin sistemden çektiği ve çevrimsel olarak sönmülediği enerji hakkında yorum yapılmasına olanak tanıyacaktır. Bu husus, doğrudan yük hücresi kullanılmayan mevcut laboratuvar koşullarında çalışmanın en önemli sayısal destek unsurlarından birini teşkil etmektedir.

Araştırmanın özgün yönlerinden biri, ayrıntılı bir mıknatıs optimizasyonu önermek yerine neodimyum mıknatıslı pratik bir prototip sunması ve bunun laboratuvar ölçeğinde çerçeve sistemler üzerinde karşılaştırmalı olarak sınanmasıdır. Damper, gelecekte viskoz akışkan ile geliştirilebilecek şekilde tasarlanmış olsa da mevcut deneylerin ana odak noktası, manyetik mekanizmanın tek başına ürettiği davranış değişimini ortaya koymaktır.

SONUÇ

Bu çalışmada, neodimyum mıknatıslı pasif bir sönmüleyicinin tasarımı, deney düzeni ve değerlendirme yöntemleri ele alınmıştır. Metinde, ürünün nihai performansından çok, deneyin nasıl gerçekleştirileceği, hangi verilerin toplanacağı ve sönmüleyicinin katkısının nasıl değerlendirileceği açıklanmaktadır.

Bunun yanında, boyutlandırılmış tasarım çizimleri, detaylı montaj görünüşleri, prototip görünüşü, çerçeve içi yerleşim şeması ve sarsma tablası görselleri bir arada kullanılarak çalışmanın daha anlaşılır hale getirilmesi amaçlanmıştır. Oluşturulan tablolar sayesinde deney düzenekleri, bileşenler ve performans göstergeleri sistematik biçimde sunulmuştur. Deneyler tamamlandıktan sonra ivme, yer değiştirme, artık ötelenme ve histerezis çevrimlerinden elde edilecek veriler, bu ön değerlendirme çerçevesini somutlaştıracaktır.

KAYNAKLAR

- Chopra AK (2014) *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 4th Ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Clough RW and Penzien J (2003) *Dynamics of Structures*, 2nd Ed., Computers and Structures, Inc., Berkeley, CA.
- Díez-Jiménez E, Rizzo R, Gómez-García MJ, Corral-Abad E (2019) "Review of passive electromagnetic devices for vibration damping and isolation," *Shock and Vibration*, 2019:1250707.
- Mazza F and Labernarda R (2020) "Magnetic damped links to reduce internal seismic pounding in base-isolated buildings," *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18:6795-6824.
- Meram AP and Önen Ü (2019) "Vibration analysis of a novel magnetic-viscous nonlinear passive isolator via finite element simulation," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 27(3):2309-2320.
- Palomera-Arias R, Connor JJ and Ochsendorf JA (2008) "Feasibility study of passive electromagnetic damping systems," *Journal of Structural Engineering*, 134(1):164-170.
- Zhang Y and Hu G (2020) "Vibration control using passive electromagnetic damping devices: a review," *Sensors*, 20(8):2314.

MERKEZİ ÇAPRAZLI ÇERÇEVELER İÇİN KAYNAKLI BİRLEŞİMLİ EĞİLME LEVHALI SÖNÜMLEYİCİLERİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF WELDED PLATE FLEXURAL YIELDING DAMPERS FOR CONCENTRICALLY BRACED FRAMES

Süleyman Eren DURSUN¹, Cem TOPKAYA² ve Mehmet Bakır BOZKURT³

ÖZET

Çapraz elemanlarının uçlarına yerleştirilen değiştirilebilir histeretik çelik sönmüleyiciler, çerçeve tipi taşıyıcı sistemlerde pasif enerji sönmülemesi sağlamak için etkili bir çözüm sunmaktadır. Güvenilir bir deprem performansı elde edilebilmesi için bu sönmüleyicilerin hem yeterli dayanım hem de şekil değiştirme kapasitesi gereksinimlerini karşılaması gerekmektedir. Bu çalışmada, kaynaklı birleşimli eğilme levhalı sönmüleyicilerin (KBELS) davranışı kapsamlı bir deneysel çalışma ile incelenmiştir. Akma levhası sayısı, levha boyu, levha kalınlığı ve çelik sınıfı gibi temel tasarım parametrelerinin etkilerini değerlendirmek amacıyla toplam beş numune test edilmiştir. Deneyler, burkulması önlenmiş çaprazlar için AISC 341'de önerilen yükleme protokolü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sönmüleyicilerin sırasıyla 626 kN ve 891 kN'a kadar akma ve nihai dayanımlara ulaşabildiğini ve 40 mm'nin üzerinde şekil değiştirme kapasitesi sergilediğini göstermiştir. Genel olarak bulgular, KBELS'lerin değiştirilebilir olmalarının yanı sıra yüksek dayanım, önemli şekil değiştirme kapasitesi ve etkin enerji sönmüleme performansı sağlayarak deprem uygulamaları için uygun bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Merkezi Çaprazlı Çerçeveler, Sönmüleyici, Kaynaklı Bağlantı, Deneysel Araştırma

ABSTRACT

Replaceable hysteretic steel dampers positioned at the ends of diagonal braces provide an efficient solution for passive energy dissipation in frame-type structural systems. For reliable seismic performance, these devices are required to satisfy both strength and deformation capacity demands. This study investigates the component-level behavior of welded-plate flexural yielding dampers (WPFYDs) through an extensive experimental program. Five specimens were fabricated and tested to examine the effects of key design parameters, including the number of yielding plates, plate length, thickness, and steel grade. All tests were conducted using the loading protocol specified in AISC 341 for buckling-restrained braces. The experimental results demonstrated that the proposed dampers reached yield and ultimate strengths of up to 626 kN and 891 kN, respectively, and maintained stable behavior with deformation capacities exceeding 40 mm without fracture. Overall, the findings indicate that WPFYDs provide reliable strength, high deformation capacity, and effective energy dissipation, while also offering the advantage of replaceability for seismic applications.

Keywords: Concentrically Braced Frame, Damper, Welded Connection, Experimental Testing

¹ Doktor, ODTÜ, Ankara, edursun@metu.edu.tr

² Profesör, ODTÜ, Ankara, ctopkaya@metu.edu.tr

³ Doçent Doktor, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, mehmet.bozkurt@cbu.edu.tr

GİRİŞ

Değiştirilebilir metalik sönümleyiciler, yapısal sistemlerde hem dayanım hem de şekil değiştirme taleplerini karşılayarak pasif enerji sönümlemesi sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Javanmardi vd., 2020). Burkulması önlenmiş çaprazlar (BÖÇ'ler) gibi çapraz tipi histeretik sönümleyiciler etkili çözümler sunmakla birlikte, mevcut çerçevelere montajları veya değiştirilmeleri, sahip oldukları uzunluk nedeniyle zor olabilmektedir. Buna karşılık, çapraz elemanların uçlarına yerleştirilen kısa sönümleyiciler, gerekli eksenel şekil değiştirmeleri sınırlı bir uzunluk içinde karşılayabildikleri sürece, montaj ve değiştirme açısından daha pratik bir çözüm sunmaktadır. Çelik levhaların eğilme veya kesme akması yoluyla çalışan çeşitli sönümleyici sistemler literatürde incelenmiştir. Kutu kesitli sönümleyiciler (KKS) (Shirinkam ve Razzaghi, 2020) ve H-kesitli sönümleyiciler (Dursun ve Topkaya, 2023) gibi sistemler, deprem enerjisinin sönümlemesi amacıyla geliştirilmiştir. Ancak bu sistemler bazı sınırlamalara sahiptir. KKS sistemleri, basınç kuvvetleri altında burkulma ve sınırlı yer değiştirme kapasitesi gibi problemler gösterebilmektedir. H-kesitli sönümleyiciler ise daha yüksek yükler için boyutlandırıldığında malzemenin verimsiz kullanımına yol açmaktadır. Örneğin, standart haddelenmiş profiller kullanılarak üretilen geleneksel H-kesitli sönümleyiciler, yüksek eksenel dayanım elde etmek için aşırı miktarda malzeme gerektirebilmekte ve buna rağmen geometrik konfigürasyon açısından sınırlı esneklik sunmaktadır. Bu sınırlamaların üstesinden gelmek amacıyla, Eğilme Mekanizması ile Çalışan Kaynaklı Bileşime Sahip Sönümleyiciler, H-kesitli sönümleyicilerin güncellenmiş bir versiyonu olarak geliştirilmiştir.

Önerilen bu konfigürasyon, hem yeni yapılar hem de güçlendirme uygulamaları için uygun, kompakt ve malzeme açısından verimli bir çözüm sunmaktadır. Gerçek uygulamalarda, özellikle çok katlı çerçeve sistemlerde, sönümleyicilerin büyük şekil değiştirmeler altında önemli eksenel kuvvetlere dayanabilmesi gerekmektedir. Bu kuvvetler çoğunlukla 370 kN ile 2000 kN aralığında değişmektedir (Lopez and Sabelli, 2004). Bu nedenle, söz konusu sönümleyicilerin mekanik davranışının doğrulanabilmesi için yüksek yük seviyelerinde deneysel olarak incelenmesi kritik önem taşımaktadır.

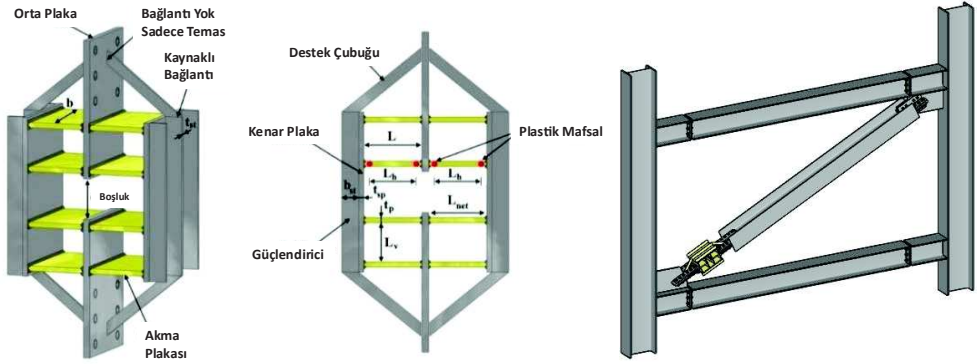
Bu çalışma, kaynaklı birleşimli eğilme levhalı sönümleyicilerin davranışını, çevrimsel yükleme protokolleri altında yürütülen kapsamlı bir deneysel çalışma aracılığıyla incelemeyi amaçlamaktadır.

ÖNERİLEN SÖNÜMLEYİCİ SİSTEMİ

1

KBELS'nin çelik çerçeve sistemi içerisine entegrasyonu, uygulama kolaylığı ve yüksek performans sağlayacak şekilde tasarlanmış olup, tipik bir yerleşimi Şekil 1'de gösterilmektedir. Sönümleyici, diyagonal çapraz elemanın ucuna yerleştirilmekte ve orta levhaları aracılığıyla hem çapraz elemanına hem de çerçevenin guse levhasına bulonlarla bağlanmaktadır. Bu yerleşim, yüklerin doğrudan ve etkin bir şekilde aktarılmasını sağlarken, deprem sonrasında hasar gören sönümleyici sistemin sökülerek kolayca değiştirilmesine de olanak tanımaktadır. Sistemin düzgün çalışabilmesi için diyagonal çapraz elemanın, akma sonrası sertleşme etkileri de dikkate alınarak sönümleyicide oluşabilecek maksimum eksenel kuvvete karşı yeterli burkulma dayanımına sahip olacak şekilde tasarlanması gerekmektedir.

Önerilen sistemin en büyük artısı, sönümleyicinin konvansiyonel çelik levhalardan oluşmasıdır. Sistem; bir orta levha, iki kenar levha ve çok sayıda akma levhasından oluşmaktadır. Orta levha, çapraz elemanı ve guse levhası ile bağlantının sağlandığı ana birleşim noktası olarak görev yapmaktadır. Akma levhaları, orta levha ile kenar levhalar arasında yük aktarımını sağlamakta ve eksenel yer değiştirme etkisi altında uç bölgelerinde plastik mafsallar oluşturarak enerji sönümlemektedir. Kenar levhaların elastik kalmasını sağlamak ve deformasyonlarını en aza indirmek amacıyla bu levhalar üzerine rijitleştiriciler kaynaklanmıştır. Ayrıca, dönmeye karşı dayanıklılığı artırmak için sönümleyicinin uç bölgelerine diyagonal destek çubuklar yerleştirilmiştir. Bu çubuklar yalnızca basınç altında çalışan bir prensiple tasarlanmış olup, kenar levhalara kaynaklıdır ancak orta levha ile temas ettikleri bölgede bağlantısız bırakılmıştır. Böylece yalnızca dönmeyi sınırlandırmakta, eksenel rijitliğe katkı sağlamamaktadır.



Şekil 1. Önerilen sönümleyicinin çerçeve sistemindeki uygulanması ve detayları

Tıpkı H-kesitli sönümleyicide (Dursun ve Topkaya, 2023) olduğu gibi önerilen bu sistemde de her bir akma levhası üzerindeki deplasman talebini azaltmak amacıyla akma levhaları sönümleyicinin her iki tarafına yerleştirilmiştir. Bu sayede, her bir akma elemanı üzerindeki deplasman talebi, sönümleyicinin toplam deplasman talebinin yarısına eşitlenmiştir. Şekil 1’de gösterildiği üzere sönümleyicinin iki tarafı arasında bir boşluk bırakılmıştır. Bu boşluğun miktarı sönümleyicinin deplasman kapasitesine bağlıdır ancak yapısal güvenliği düşünerek, beklenen deplasman değerinden daha fazla miktarda boşluk bırakılması önerilmektedir.

KBELS SİSTEMİNİN PERFORMANSININ DENEYSEL ÇALIŞMA İLE İNCELENMESİ

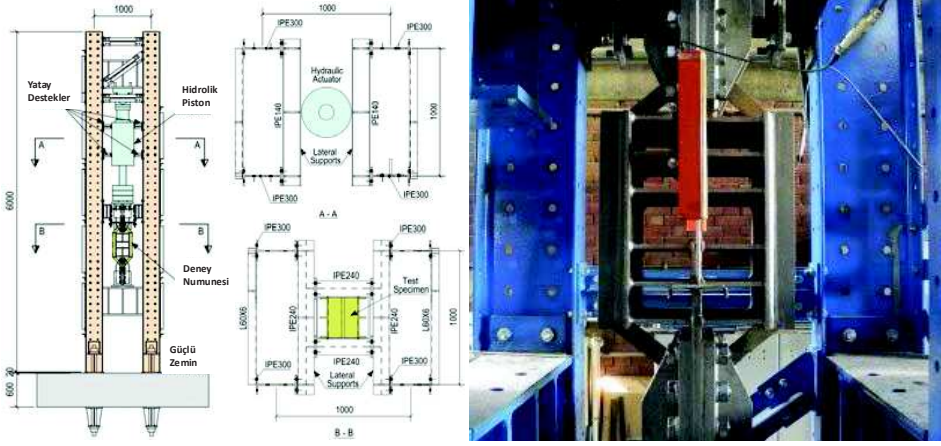
KBELS’nin davranışı çevrimsel yükleme protokollerine göre eleman seviyesinde yapılan 5 deney ile incelenmiştir. Aşağıdaki bölümlerde deney düzeneği, numunelerin özellikleri ve test sonuçlarının detayları sunulmaktadır.

Deney Düzeneği, Kullanılan Ölçüm Cihazları ve Test Numuneleri

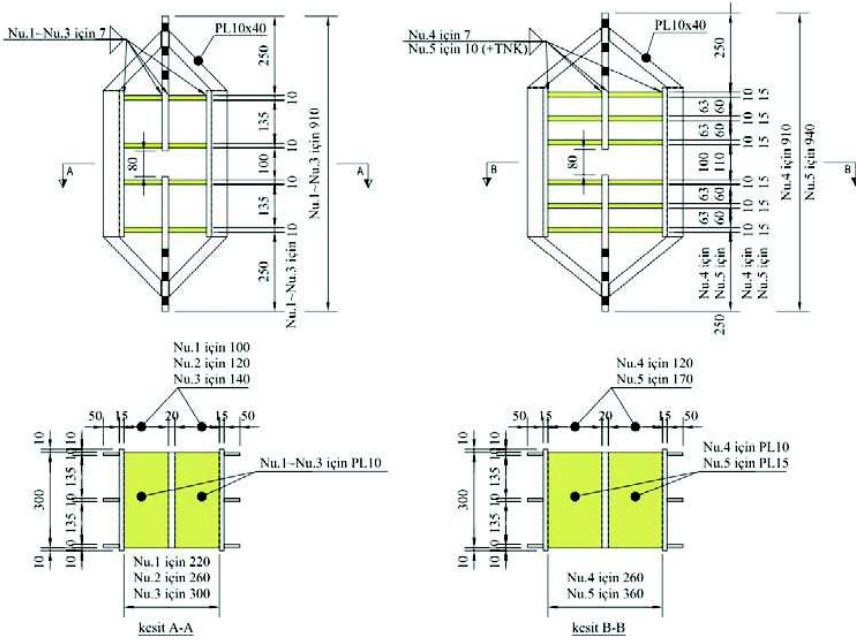
Deney düzeneğinin teknik çizimleri ve bir fotoğrafı Şekil 2’de gösterilmiştir. Deneyler için 1500 kN yük kapasitesine ve toplam 500 mm deformasyon kapasitesine sahip servo kontrollü hidrolik bir aktüatör kullanılmıştır. Gerçekçi sınır koşullarını simüle etmek ve düzlem dışı hareketleri önlemek amacıyla pistonun serbest ucunda kısıtlayıcı bir çerçeve sistemi uygulanmıştır. Ölçüm sistemi kapsamında, uygulanan aksel kuvvetin kaydedilmesi amacıyla aktüatör üzerine bir yük hücresi monte edilmiş; ortalama aksel yer değiştirmeyi ölçmek için ise Şekil 2’de gösterildiği üzere sönümleyicinin karşılıklı iki tarafına iki adet LVDT yerleştirilmiştir. Deney düzeneğine ilişkin daha ayrıntılı bilgiler önceki çalışmada sunulmuştur (Dursun vd., 2026).

Sönümleyici performansı üzerinde temel geometrik ve malzeme parametrelerinin etkisini değerlendirmek amacıyla toplam beş numune test edilmiştir. Sönümleyicilere ait teknik çizimler Şekil 3’te sunulmuştur. Başlıca değişkenler, kaynaklar arasındaki net mesafe (L_{net}), akma levhalarının kalınlığı (t_p) ve çelik malzeme sınıfı (S275, S355MC ve S355) olarak belirlenmiştir. Sönümleyici genişliği tüm numuneler için 300 mm’de sabit tutulmuştur. Deneylerde 10 mm ve 15 mm kalınlığında iki farklı levha kullanılmıştır. 15 mm kalınlığındaki levhalara sahip numunelerde kaynak hasarını önlemek amacıyla levhalara kaynak ucu açılmıştır. Deney numunelerine ait geometrik ve malzeme özellikleri Tablo 1’de özetlenmiştir.

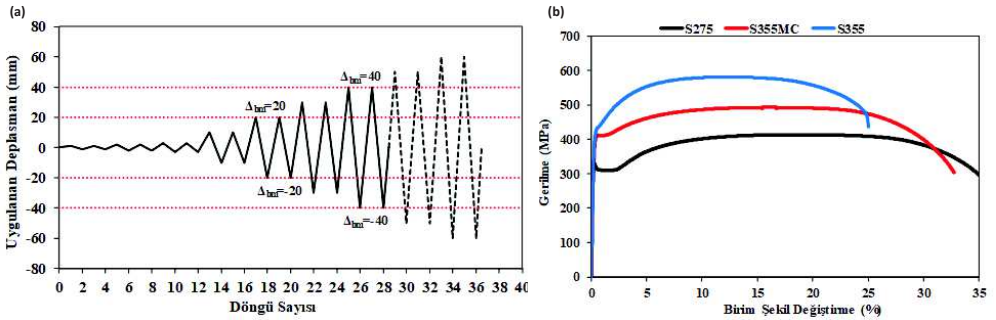
Önerilen sönümleyicinin BÖÇ elemanı yerine kullanılması hedeflendiği için deneyler AISC 341 (2022) şartnamesinde sunulan ve Şekil 4 (a)’da gösterilen BÖÇ yük protokolüne göre yapılmıştır. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla levhalardan çıkarılan numuneler üzerinde çekme deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4 (b)’de sunulmuştur.



Şekil 2. Deneysel düzeneğin teknik çizimleri ve fotoğrafı



Şekil 3. Numunelerin teknik çizimleri



Şekil 4. (a) AISC yük protokolü (b) Malzeme özellikleri

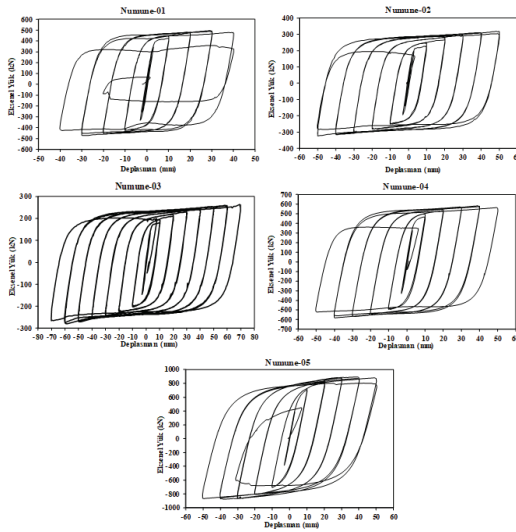
Tablo 1. Numune Özellikleri

Yer	t_p (mm)	L_{net} (mm)	Malzeme	Kaynak
Numune 1	10	80	S355MC	FW
Numune 2	10	100	S275	FW
Numune 3	10	120	S275	FW
Numune 4	10	100	S355MC	FW
Numune 5	15	150	S355	FW+CJP

Deney Sonuçları

Tüm numuneler için deney sonuçları yük deplasman cinsinden Şekil 5'te gösterilmiştir. Tersinir yükleme altında tüm numuneler kararlı ve tekrar edilebilir histeretik bir davranış göstermiştir. Sönümleyicide gözlemlenen kuvvet deplasman davranışı genellikle çekme ve basınç yükü altında simetrik bir davranış göstermiştir. Beklendiği üzere akma işlemi kaynaklı levhalarda gözlemlenmiştir. Akma kuvveti (P_y) ve deplasmanı (Δ_y) Coelho vd., (2004) tarafından önerilen çift doğrusal idealisyon yöntemi ile hesaplanmıştır.

Deney sonuçları Tablo 2'de özetlenmiştir. Akma levhalarının kaynakları arasındaki net mesafe (L_{net}), kaynaklı plaka sönümleyicilerin mekanik performansını belirleyen başlıca parametre olup, tüm temel dayanım ve deformasyon kapasitelerini doğrudan etkilemektedir.



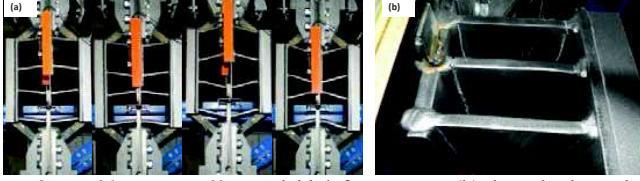
Şekil 5. KBELS deney sonuçları

Tablo 2. Deney sonuçları

Yer	Δ_p (mm)	P_y (kN)	Maksimum Yük (kN)
Numune 1	2.7	388.3	497 (T) – 474 (C)
Numune 2	2.6	212.8	319 (T) – 324 (C)
Numune 3	3.1	167.2	263 (T) – 280 (C)
Numune 4	3.9	455.4	583 (T) – 583 (C)
Numune 5	4.4	626.4	891 (T) – 876 (C)

Deney sonuçları incelendiğinde en kısa net mesafeye sahip olan Numune 1'in 30 mm deplasman seviyesinde iki döngüyü tamamladığı fakat 40 mm deplasman seviyesindeki ikinci döngüde yük taşıma kapasitesinin hızlıca düştüğü ve ikinci döngüyü tamamlamadığı gözlemlenmiştir. Sönümleyicinin deplasman kapasitesini arttırmak için Numune 2 ve Numune 3'te L_{net} değeri sırasıyla 100 mm ve 120 mm'ye arttırmıştır. Numune 2 yük taşıma kapasitesinde ufak azalmayla birlikte 50 mm deplasman seviyesinde iki döngüyü tamamlamıştır. Numune 3 ise 60 mm deplasman seviyesinde iki döngüyü yük taşıma kapasitesinde bir azalma olmadan tamamlamıştır fakat 70 mm deplasman seviyesindeki birinci döngüden sonra akma plakalarında kopmalar meydana gelmiştir.

Numune 2 ve Numune 3'ün deneylerinde Hem L_{net} değerindeki artış hem de kullanılan malzemenin akma dayanımının daha düşük olmasından dolayı ilk deneye göre sönümleyicinin yük taşıma kapasitesinde ciddi düşüş gözlemlenmiştir. Bu nedenle Numune 4'ün deneyinde hem akma plakası sayısı artırılmış hem de daha yüksek akma dayanımına sahip olan malzeme kullanılmıştır ve deney başarıyla tamamlanmıştır. Çalışma kapsamında daha yüksek yük taşıma kapasitesine ulaşabilmek adına Numune 5'in deneyinde 15 mm kalınlığında plakalar kullanılmıştır ve maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşılmıştır. Sönümleyicinin deforme olmuş fotoğrafı ve deneylerde gözlemlenen tipik plaka kopması Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. (a) Numune 3'ün ± 30 mm ve ± 60 mm'deki deformasyonu (b) deneylerde gözlemlenen tipik hasar

Genel olarak deney sonuçları, önerilen sönümleyicinin 30 mm ile 60 mm arasında değişen geniş bir deplasman kapasitesi aralığına sahip olduğunu göstermiştir. L_{net} , plaka kalınlığı ve malzeme özelliklerinin ayarlanmasıyla, KBELS'lerin çok katlı MÇÇ'lerin aksenal kuvvet taleplerine uygun, istenen dayanım ve deformasyon kapasitelerine sahip olacak şekilde tasarlanabileceği gösterilmiştir.

SONUÇLAR

Bu çalışma, merkezi çaprazlı çerçevelerde kullanılmak üzere tasarlanan kaynaklı birleşimli eğilme levhalı sönümleyicilerin (KBELS) mekanik performansına ilişkin deneysel bir inceleme sunmaktadır. Deney programı, eleman seviyesinde yapılan testlerle gerçekleştirilmiştir ve KBELS'lerin 167–626 kN aralığında akma dayanımına, 280–891 kN aralığında ise maksimum dayanım değerlerine ulaştığını göstermiştir. Ayrıca, AISC 341 tarafından BÖÇ sistemleri için önerilen yüklem protokolü altında, önerilen sönümleyiciler 30–60 mm aralığında yer değiştirme kapasiteleri sergilemiştir. Bu değerler, önerilen kaynaklı birleşimli eğilme levhalı sönümleyiciler için literatürde bugüne kadar rapor edilen en yüksek dayanım ve deplasman seviyelerini temsil etmekte olup, önerilen sistemin yüksek sismik taleplere sahip yapılar için uygunluklarını ortaya koymaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 122M255 numaralı proje kapsamında desteklenmiş olup, yazarlar kuruma katkılarından dolayı teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

- AISC. ANSI/AISC 341-22 (2022), *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- Coelho AMG, Bijlaard FSK, da Silva L S (2004) "Experimental assessment of the ductility of extended end plate connections". *Engineering structures*, 26(9), 1185-1206
- Dursun S E, Topkaya C (2023) "Development of H-shaped hysteretic dampers for steel concentrically braced frames", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 166
- Dursun S E, Topkaya C, and Bozkurt M B (2026) "Mechanical properties and displacement capacity of welded-plate flexural yielding dampers", *Journal of Constructional Steel Research*, 166: 109953
- Javanmardi A, Ibrahim Z, Ghaedi K, Benisi Ghadim H, Hanif MU (2020) "State-of-the-art review of metallic dampers: testing, development and implementation", *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27, 455-478.
- Lopez W E, Sabelli R (2024) "Seismic design of buckling restrained braced frames", Structural Steel Education Council, Steel Tips.
- Shirinkam MR, Razzaghi J (2020) "Experimental and analytical investigation on the behavior of metallic Box-Shaped Dampers (BSD)", *In Structures*, 23, 766-778.

BURKULMASI ÖNLENMİŞ ÇAPRAZLARIN DEPREM YÜKLERİ ALTINDAKİ SİSMİK PERFORMANSLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SEISMIC PERFORMANCE OF BUCKLING-RESTRAINED BRACES UNDER EARTHQUAKE LOADS

Fatma Esra UZ¹, Barış SERİN², Mehmet Bakır BOZKURT³

ÖZET

Yüksek yatay rijitlik ve üstün enerji sönmüleyebilme kapasiteleri sayesinde tamamı çelikten burkulması önlenmiş çaprazlı çerçevelerin (BÖÇÇÇ), kalıcı ötelemeler altındaki performansı deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Bu sistemlerin en büyük avantajlarından biri, deprem sonrası ağır hasar alabilecek yapıların yıkılmasını önleyerek servis ömürlerini uzatması ve böylece inşaat-yıkıntı atıklarını ve yeniden yapım kaynaklı karbon emisyonlarını minimize etmesidir. Bu amaç için dört adet tam ölçekli deney yapılmıştır. BÖÇÇÇ numunelerinde dolgusuz çelik elemanlar sargı mekanizması olarak kullanılırken sürtünmeyi önleyici yüzey için kauçuk ve teflon malzeme tercih edilmiştir. Gerçekleştirilen birinci ve dördüncü deneylerde kalıcı kat ötelemesi bulunmazken, ikinci ve üçüncü deneylerde numuneler sırasıyla +%0.5 ve -%0.5 kalıcı kat ötelemesi altında deney düzeneğine yerleştirilerek çevrimsel yüklemelere maruz bırakılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, BÖÇÇÇ'lerin depremselliği yüksek bölgelerde güvenle uygulanabileceğini ortaya koymaktadır. Numunelerin kalıcı kat ötelemeleri altında dahi deney düzeneğine yerleştirilebilmesi ve kolaylıkla çıkarılabilmesi, deprem sonrası yalnızca hasar gören çekirdek plakasının değiştirilerek çelik sargı mekanizmasının tekrar kullanılabilmesini kanıtlamaktadır. Kılıfın bu tekrar kullanımı, yeni malzeme gereksinimini ortadan kaldırıp karbon ayak izini düşürerek çevre dostu ve sürdürülebilir bir yapısal tasarım yaklaşımı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tamamı çelikten burkulması önlenmiş çapraz, kalıcı öteleme, gerçek ölçekli test, sürdürülebilirlik, tekrar kullanım.

ABSTRACT

The performance of all-steel buckling-restrained braced frames (BRBFs), which possess high lateral stiffness and superior energy dissipation capacities, under residual drifts was investigated through experimental studies. One of the major advantages of these systems is extending the service life of structures that might otherwise sustain severe damage after an earthquake, preventing their demolition and thereby minimizing construction-demolition waste and carbon emissions from rebuilding. For this purpose, four full-scale experiments were conducted. In the BRB specimens, unfilled steel elements were used as the buckling restraining mechanism, while rubber and Teflon materials were preferred for the anti-friction interfaces. In the first and fourth experiments, the specimens were subjected to cyclic loading with no residual story drift, whereas in the second and third experiments, the specimens were placed in the test setup and subjected to cyclic loading under residual story drifts of +0.5% and -0.5%, respectively. The conducted experimental studies demonstrate that BRBFs can be safely applied in regions with high seismicity. The ability to place and easily remove the specimens in the test setup even under residual story drifts proves that after an earthquake, only the damaged core

¹ Öğr. Gör. Dr., İzmir Ekonomi Üniversitesi, İzmir, esra.uz@ieu.edu.tr

² Doktora Sonrası Araştırmacı, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, baris.sern@gmail.com

³ Doç. Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, mehmet.bozkurt@cbu.edu.tr

plate needs to be replaced while the steel casing mechanism can be reused. This reuse of the casing eliminates the need for new materials and reduces the carbon footprint, offering an eco-friendly and sustainable structural design approach.

Keywords: All-steel buckling-restrained brace, residual drift, full-scale test, sustainability, reusability.

GİRİŞ

Deprem ve rüzgâr gibi yatay etkiler altında çelik yapıların güvenli davranış gösterebilmesi için uygun yatay yük taşıyıcı sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistemlerin temel gereksinimleri, yeterli rijitlik sağlamaları ve deprem enerjisini sönmüleyebilme kapasitesine sahip olmalarıdır. Çelik yapılarda kullanılan başlıca sistemler; moment aktaran çelik çerçeveler (MAÇ'ler), merkezi çaprazlı çerçeveler (MÇÇÇ'ler), dışmerkez çaprazlı çerçeveler (DÇÇÇ'ler) ve burkulması önlenmiş çaprazlı çerçevelerdir (BÖÇ'lerdir).

MÇÇÇ'lerde kullanılan çapraz elemanların mimari tasarımı sınırlaması nedeniyle, geçmişte MAÇ'lar daha yaygın tercih edilmiştir. Ancak 1994 Northridge Depremi ve 1995 Kobe Depremi sırasında MAÇ'ların birleşim bölgelerinde gözlenen gevrek hasarlar, daha gelişmiş sistemlerin geliştirilmesine neden olmuştur. Bu doğrultuda, özellikle yüksek depremselliğe sahip bölgelerde hem çekme hem de basınç etkisi altında burkulmadan plastik şekildeğiştirme kapasitesi gösterebilen burkulması önlenmiş çaprazlı çerçeveler ön plana çıkmıştır. Bu sistemler, tekrarlı yükler altında daha kararlı ve sünek bir davranış sergileyerek geleneksel çaprazlı sistemlere göre üstün performans sunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında burkulması önlenmiş çaprazlı çelik çerçeveler (BÖÇÇÇ'ler) deneysel olarak incelenmektedir. Bu çapraz sistemi, tersinir eksenel yükler altında burkulma oluşmadan hem çekme hem de basınç etkisinde akma davranışı gösterebilmeleri sayesinde yüksek süneklik kapasitesine sahiptir. BÖÇÇÇ'ler; kiriş, kolon ve BÖÇ'den oluşmaktadır.

Bu sistemlerde deprem etkilerinden doğan eksenel kuvvetler esas olarak çekirdek plaka tarafından taşınır. Literatürde yer alan BÖÇ elemanlarında çekirdek plakası olarak en yaygın tercih edilen çözüm daraltılmış kesitli plakalar (Tremblay vd., (2006), Serin ve Bozkurt (2025)) olmakla birlikte; sabit genişlikli plakalar (Eryaşar ve Topkaya (2010); Bozkurt ve Topkaya (2016)), delikli plakalar (Piedrafita vd., (2015)) ve bindirme kaynaklı plakalar (Bozkurt ve Topkaya (2016)) gibi farklı çekirdek plaka tipleri de geliştirilmiş ve uygulanmıştır. BÖÇ elemanı çekirdek plaka, ayırıcı tabaka ve burkulmayı engelleyen bir sargı sisteminden meydana gelir. Sargı sistemi, çekirdek plakanın akma dayanımına karşılık gelen eksenel basınç kuvvetinin yaklaşık 1,5 katına kadar burkulmayı önleyecek şekilde tasarlanmaktadır.

Ayrıca, bazı uygulamalarda dolgu malzemesi kullanılmaksızın yalnızca çelik bileşenlerden oluşan sargı sistemleri de tercih edilebilmektedir. Bu tür tasarımlar, uygun detaylandırma ile yeterli stabilite sağlayarak alternatif bir çözüm sunmaktadır. Burkulması önlenmiş çaprazlı çerçeve tipleri ise farklı düzenlemelere bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında, dolgunsuz çelik elemanların sargı mekanizması olarak kullanıldığı ve sürtünmeyi önleyici arayüz olarak kauçuk ile teflon malzemelerin tercih edildiği dört adet tam ölçekli BÖÇ numunesinin deneysel davranışı incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, sismik bir olay neticesinde yapıda oluşabilecek kalıcı deformasyonların BÖÇ performansına ve eleman değiştirilebilirliğine olan etkisini belirlemektir. Bu doğrultuda numuneler; sıfır kalıcı kat ötelemenin yanı sıra sırasıyla +%0,5 ve -%0,5 kalıcı kat öteleme altında deney düzeneğine yerleştirilerek çevrimsel yükleme protokollerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar çelik BÖÇ'lerin deprem bölgelerinde güvenli bir şekilde kullanılabilir olduğunu göstermişlerdir.

Önerilen tamamı çelikten BÖÇ sistemi, üstün yapısal performansının yanı sıra çevresel sürdürülebilirlik odaklı tasarımıyla da öne çıkmaktadır. Geleneksel sistemlerdeki beton dolgunun elimine edilmesi çimento kaynaklı karbon emisyonlarını ortadan kaldırırken, çelik sargı mekanizmasının deprem sonrasında tekrar kullanılabilmesi, yeni malzeme üretimi ihtiyacını ve buna bağlı çevresel maliyetleri büyük oranda düşürmektedir. Ayrıca sistemin %0.5 kalıcı öteleme altında dahi eleman değişimine imkan tanınması, deprem gören yapıların yıkılmadan onarılmasını sağlar. Binanın servis ömrünü uzatan bu değiştirilebilirlik özelliği, inşaat sektörünün karbon ayak izini azaltmaya yönelik güçlü bir tasarım çözümü sunmaktadır.

BURKULMASI ÖNLENMİŞ ÇELİK ÇAPRAZ

Toplam uzunluğu 5.70 m olan tüm BÖÇ numunelerine ait görünüş Şekil 1’de sunulmuştur. Tüm numuneler yalnızca çelik malzeme kullanılarak hazırlanmıştır. Burkulmayı önleyici sargı mekanizması 4 adet IPE100 profilden meydana gelmektedir. Üsteki ve alttaki sargı elemanları 2*20M20 bulonlar aracılığıyla birleştirilmiştir.

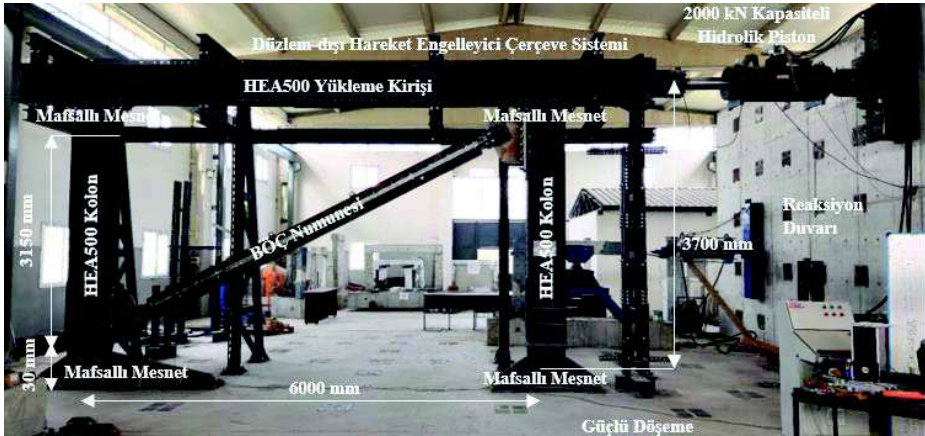


Şekil 1. BÖÇ-01 ~ BÖÇ-04 numaralı deney numunelerinin görünüşü

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deney Sistemi Tasarımı

Tasarlanan BÖÇ numunelerinin deprem performansını araştırmak için Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı’ndaki Şekil 2’de gösterilen gerçek ölçekli deney düzeneği kullanılmıştır. Açıklığı 6.0 m ve yüksekliği 3.7 m olan deney düzeneğinde, kolon ve kiriş kesitleri için S275 malzeme sınıfına sahip HEA500 profilleri tercih edilmiştir. Gerçek ölçekli deneylerde yatay yükler 2000 kN çekme ve basınç kapasiteli servo-kontrollü hidrolik piston aracılığıyla uygulanmıştır.



Şekil 2. Deney düzeneği

Malzeme Özellikleri

BÖÇ deney numunelerinde kullanılmak üzere 18 mm kalınlığına sahip çelik çekirdek plakaları hazırlanmıştır. Bu plakadan üç adet kupon hazırlanarak çekme deneyine tabi tutulmuştur. Tablo 1’de çekme testi sonuçları sunulmuştur. Bununla birlikte, çelik kuponlara ait mekanik ve geometrik özelliklerin ortalama değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Çelik kuponların çekme testi sonuçları

Kupon Adı	BÖÇ Numuneleri	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Birim Uzama (%)
18-1	BÖÇ-01~04	17.80	24.77	293.4	445.1	26.5
18-2		17.80	24.75	292.9	445.0	31.2
18-3		17.80	24.77	294.1	446.5	25.1

Tablo 2. Çelik kuponlara ait mekanik ve geometrik özelliklerinin ortalama değerleri

Kullanıldığı BÖÇ Numuneleri	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (Mpa)	Birim Uzama (%)
BÖÇ-01~04	17.80	24.76	294	446	28

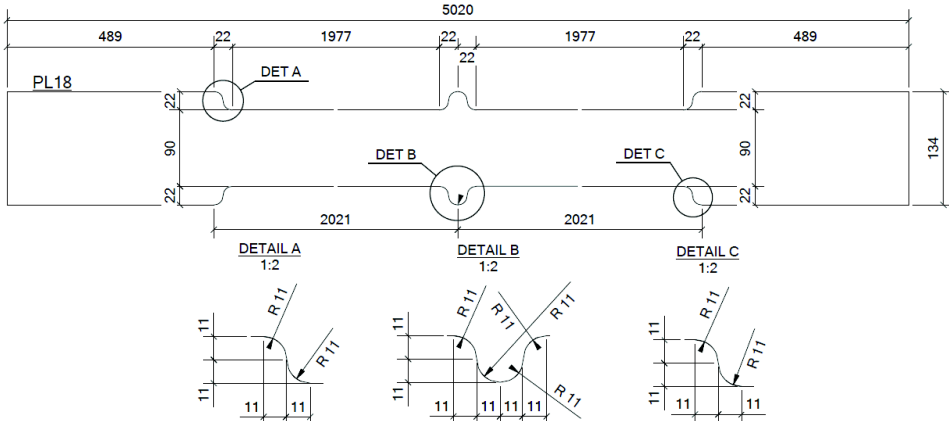
Deney Numunelerinin Özellikleri

Çalışma kapsamında toplam dört adet BÖÇ deney numunesi test edilmiştir. Tablo 3’te ise BÖÇ numunelerine ait parametreler yer almaktadır.

Tablo 3. BÖÇ deney numunelerine ait parametreler

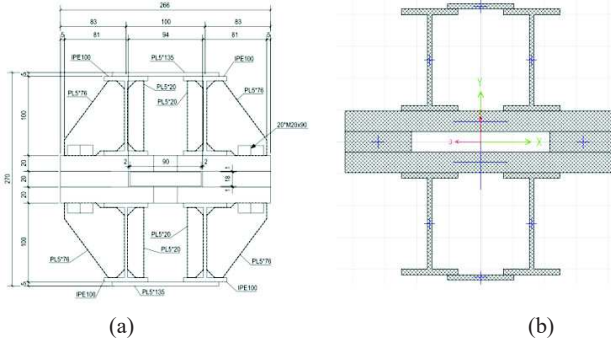
Num. No	Çekirdek Plakası Geo.	Ayrırcı Malzeme	BÖÇ Toplam Ağırlık (kg)	Cıv. Ara. Mes. (mm)	BÖÇ Uzu. (mm)	Akma Uzu. (mm)	Kalıcı Öte.	Yük. Pro.	Pcr/Pysc
BÖÇ01	Azaltılmış Enkesit (18 mm)	Kauçuk	551.8	290	5700	3954	-	YP1	7.8
BÖÇ02		Teflon					-%0.5		
BÖÇ03		Kauçuk					+%0.5		
BÖÇ04		Teflon					-		

Çekirdek plakası, 18 mm kalınlığındaki çelik levhadan üretilmiştir. BÖÇ-01~BÖÇ-04 numunelerindeki çekirdek plakalarının imalat detayları Şekil 3’te sunulmuştur.



Şekil 3. BÖÇ-01~BÖÇ-04 numunelerindeki çekirdek plakalarının imalat detayları

Çekirdek plakasının aksel basınç altında burkulmasını önlemek amacıyla tasarlanan sargı mekanizması Şekil 4’te gösterilmiş olup yalnızca çelikten üretilmiştir. BÖÇ-01~BÖÇ-04 numaralı tüm deney numunelerinde tek bir sargı mekanizması birden fazla kez kullanılmıştır.

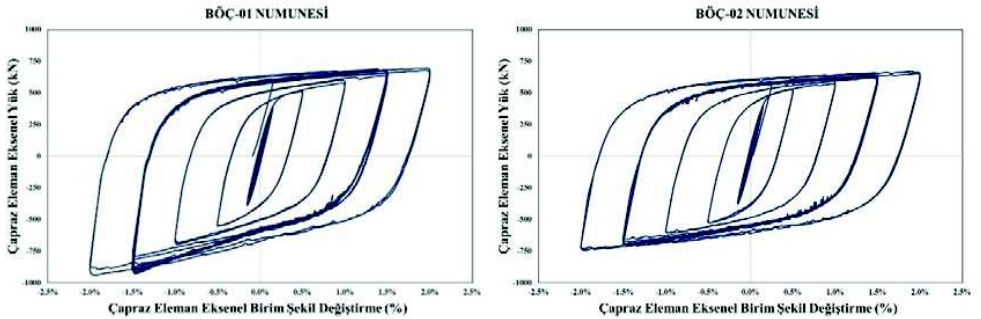


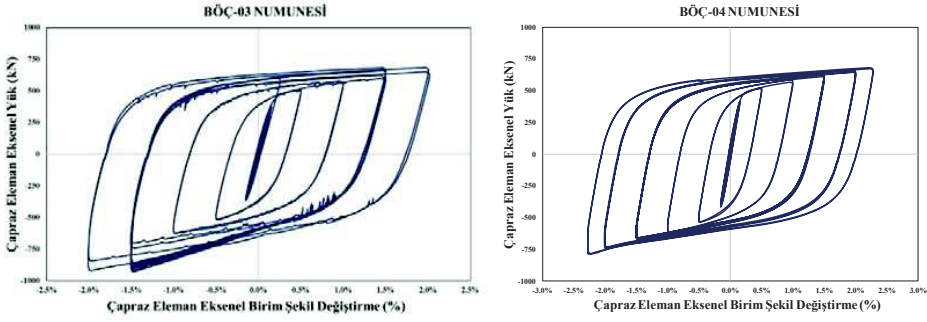
Şekil 4. BÖÇ-01~BÖÇ-04 numunelerindeki çelik sargı mekanizmasının enkesit görüntüleri: (a) imalat detayı ve (b) matematiksel temsili

DENEY SONUÇLARI

Bu çalışma kapsamında, AISC 341-22’deki ve farklı yükleme protokolleri altında BÖÇ numunelerinin deprem performansını incelemek için dört adet gerçek ölçekli deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerde dolgusuz çelik elemanlardan hazırlanan sargı mekanizması ve ayırıcı malzeme olarak kauçuk ile teflon kullanılmıştır. İlk deney numunesi kalıcı kat ötelemesiz olarak deney düzeneğine yerleştirilmiş, ikinci ve üçüncü deneylerde ise sırasıyla +%0,5 ve -%0,5 kalıcı kat ötelenmesi altında çevrimsel yarı-statik yüklemeler uygulanmıştır. Dördüncü numune de yine kalıcı kat ötelemesiz koşullarda deney düzeneğine yerleştirilmiş ve yükleme protokolü uygulanmıştır.

Birinci, ikinci ve üçüncü numunelerde deney sonrası çelik çekirdek plakalarında lokal burkulmalar gözlenmiştir. Bu durumu önlemek amacıyla dördüncü deney numunesinde detaylı bir değerlendirme yapılmıştır. İlgili numune, ayırıcı malzeme olarak kullanılan teflon yalnızca çekirdek plakası ile taban plakası arasında kalan 2 mm’lik boşluğa uygulanmış ve bu şekliyle lokal burkulmalar önlenmiştir. Deney sırasında, çekirdek plakası lokal burkulma göstermeden $2.3\Delta_{bm}$ kat ötelemesine kadar ilgili çapraz deformasyon seviyesinde kararlı bir histeretik tepki vermiş ve ardından deney tamamlanmıştır. Ulaşılan sonuçlar, çekirdek plakası ile çelik sargı arasında yer alan düzlem dışındaki boşluğun azaltılmasının, lokal burkulmalardan kaynaklanan dayanım kayıplarını önlemede etkili olduğunu göstermektedir.





Şekil 5. BÖÇ-01~BÖÇ-04 nolu deney numunelerine ait aksel yük aksel birim şekil değiştirme grafiği

SONUÇ

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, BÖÇÇ'lerin deprem riski taşıyan bölgelerde güvenli bir alternatif olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, test edilen numunelerin farklı kalıcı kat ötelemeleri altında deney düzeneğine yerleştirilip çıkarılabilmesi, deprem sonrasında yapıda meydana gelebilecek kat ötelemeleri altında kolayca sökülüp yeniden monte edilebileceğini kanıtlamıştır.

Geleneksel beton dolgululu sistemlerin aksine, tamamı çelikten sargı mekanizmasının tekrar kullanıma uygun olması gereksiz malzeme sarfiyatının önüne geçmektedir. Sistemin kalıcı öteleme altındaki üstün onarılabilirliği, hasarlı binaların yıkılmak yerine onararak servis ömrünün uzatılmasını sağlamakta; bu yönüyle yeni malzeme üretimi ihtiyacını ve buna bağlı çevresel maliyetleri minimize eden sürdürülebilir bir tasarım alternatifi sunmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 221M156 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar, sağladığı destekler için TÜBİTAK'a teşekkür eder. Bu makalede ifade edilen görüşler yazarlara aittir ve destekleyici kuruluşun görüşlerini yansıtmaz.

KAYNAKLAR

- AISC (2022), American Institute of Steel Construction. Seismic provisions for structural steel buildings, AISC 341-22, Chicago.
- Bozkurt, M. B., Topkaya, C. 2016. "Development of Welded Overlap Core Steel Encased Buckling Restrained Braces", *Journal of Constructional Steel Research*, 127: 151-164.
- Eryaşar, E., Topkaya, C. 2010. "An experimental study on steel-encased buckling-restrained brace hysteretic dampers", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39: 561-581.
- Piedrafita, D., Cahis, X., Simon, E., Comas, J. 2015. "A new perforated core buckling restrained brace", *Engineering Structures*, 85: 118-126.
- Serin, B., Bozkurt, M. B. (2025). Development of replaceable core all-steel buckling-restrained braces. *Journal of Constructional Steel Research*, 225, 109247.
- Tremblay, R., Bolduc, P., Neville, R., and Devall, R. 2006. "Seismic testing and performance of bucklingrestrained bracing systems", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33: 183-198.

Parametrik Yapı Araştırmalarında CCD-RSM Tabanlı Sayısal Deney Planlaması

CCD-RSM-Based Numerical Experiment Planning in Parametric Structural Research

Erkan POLAT¹ ve Elifcan GÖÇMEN POLAT²

ÖZET

Parametrik yapı araştırmalarında, deneysel çalışmalar yüksek maliyet, sınırlı laboratuvar kapasitesi ve kısıtlı numune sayısı nedeniyle dikkatli planlama gerektirmektedir. Bu bildiride, Merkezi Bileşik Tasarım ve Yanıt Yüzeyi Yöntemi tabanlı sayısal deney planlama yaklaşımının parametrik yapı araştırmalarında nasıl uygulanabileceği, C-şekilli ve düzlemsel kompozit perde duvarlar üzerinden tartışılmaktadır. Bu kapsamda, değişken seviyelerinin tanımlanması, deney matrisinin oluşturulması, parametrelerin mekanik temelde seçilmesi ve sonuçların yorumlanması açıklanmaktadır. Teorik taşıma kapasitesi ifadelerindeki malzeme ve geometri parametrelerinin istatistiksel modelleme için uygun aday değişkenler sunduğu, buna karşılık daha gerçekçi kapasite tahminleri için deneysel olarak doğrulanmış sonlu eleman modellerinin gerekli olduğu gösterilmektedir. Düzlemsel duvarlar için elde edilen normalize edilmiş tekil parametre eğrileri, çelik akma dayanımı, duvar derinliği ve donatı oranı arttıkça moment kapasitesinin yükseldiğini, derinlik/kalınlık oranı arttıkça ise azaldığını göstermektedir. Beton basınç dayanımının etkisi ise daha sınırlı ve doğrusal olmayan bir karakter sergilemektedir. Sonuç olarak, Merkezi Bileşik Tasarım ve Yanıt Yüzeyi Yöntemi, geniş parametre uzaylarının daha az sayıda analizle sistematik biçimde incelenmesine ve deney programlarının daha rasyonel biçimde planlanmasına katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Merkezi Bileşik Tasarım, Yanıt Yüzeyi Yöntemi, sayısal deney planlaması.

ABSTRACT

In parametric structural research, experimental studies require careful planning because of high cost, limited laboratory capacity, and restricted specimen numbers. This paper discusses the application of a numerical experiment planning framework based on Central Composite Design and Response Surface Methodology through C-shaped and planar composite shear walls. The study outlines the definition of parameter levels, the construction of the experimental matrix, the mechanical basis of variable selection, and the interpretation of results. Material and geometric parameters appearing in theoretical load-carrying capacity expressions are shown to provide suitable candidate variables for statistical modeling, while experimentally validated finite element models are needed for more realistic strength predictions. For planar walls, normalized one-at-a-time parameter curves show that increasing steel yield stress, wall depth, and reinforcement ratio increases moment capacity, whereas increasing the depth-to-thickness ratio reduces it. The effect of concrete compressive strength is comparatively limited and nonlinear. Overall, Central Composite Design and Response Surface Methodology enable wide parameter spaces to be examined systematically with fewer analyses and support more rational experimental planning.

Keywords: Central Composite Design, Response Surface Methodology, numerical experiment planning.

¹ Doçent, Munzur Üniversitesi, Tunceli, erkanpolat@munzur.edu.tr

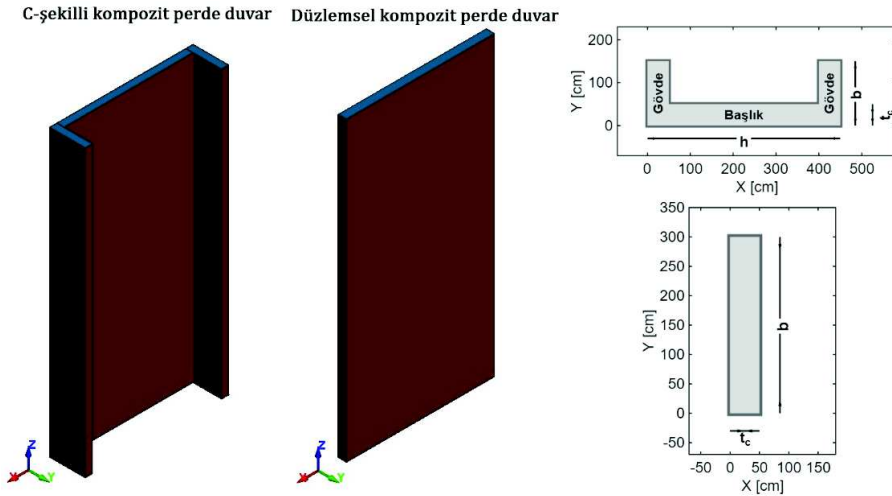
² Doçent, Munzur Üniversitesi, Tunceli, elifcangocmen@munzur.edu.tr

GİRİŞ

Parametrik yapı araştırmalarında deneysel çalışmalar, taşıyıcı sistem davranışının anlaşılması, yeni yapı elemanlarının geliştirilmesi ve mevcut tasarım yaklaşımlarının sınanması açısından büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar; numune üretim maliyeti, test altyapısı, yükleme ve ölçüm sistemleri, zaman kısıtları ve sınırlı numune sayısı gibi nedenlerle dikkatli bir planlama gerektirmektedir. Özellikle çok sayıda değişkenin davranış üzerinde etkili olduğu problemlerde, deneysel programın sistematik bir çerçevede oluşturulması zorunlu hale gelmektedir. Bu gereksinin doğrultusunda, deneysel verilerle doğrulanmış sonlu eleman modelleri, parametrik incelemeler ve istatistiksel deney tasarımı yaklaşımları giderek daha yaygın kullanılmaktadır (Lou vd., 2022, Hu vd., 2022, Sukri vd., 2024, Kuntoğlu vd., 2020, Hammoudi vd., 2019, Keshtegar vd., 2021).

Merkezi Bileşik Tasarım (CCD) ve Yanıt Yüzeyi Yöntemi (RSM), sınırlı sayıda analiz veya deneyle geniş bir parametre uzayının araştırılmasına, kritik değişkenlerin ve etkileşimlerin belirlenmesine ve deney programının daha hedefli biçimde planlanmasına olanak sağlayan etkili araçlardır. Bu bildiriye, CCD ve RSM yaklaşımlarının parametrik yapı araştırmalarında nasıl uygulanabileceği, C-şekilli ve düzlemsel kompozit perde duvarlar üzerinden tartışılmaktadır. Benzer istatistiksel yaklaşımlar, farklı perde duvar sistemlerinin taşıma kapasitesi ve davranış özelliklerinin modellenmesinde de kullanılmıştır (Bypour vd., 2021, Bypour vd., 2024). Amerikan Çelik Yapılar Enstitüsünün Yapısal Çelik Binalar için Deprem Hükümleri standardında (AISC, 2022), Bölüm H7 kapsamında tanımlanan kompozit perde duvarlar, çelik akma dayanımı, beton dayanımı, duvar boyutları, narinlik oranları ve donatı düzeyi gibi çok sayıda parametrenin birlikte etkili olduğu yanıl kuvvetlere karşı direnç sistemidir. Bu sistemlerin sismik eğilme davranışının incelenmesi amacıyla çeşitli deneysel araştırmalar gerçekleştirilmiştir (Alzeni ve Bruneau, 2017, Varma vd., 2019, Huang vd., 2018, Qin vd., 2019, Kenarangi vd., 2021, Zhang vd., 2016). Her iki duvar tipi Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir. CCD ve RSM yaklaşımları, bu tür duvarların taşıma kapasitelerinin tahmininde etkin biçimde uygulanmıştır (Polat ve G. Polat, 2024, Polat, 2026).

Bu bildiriye, söz konusu iki uygulama üzerinden CCD-RSM tabanlı istatistiksel yaklaşımın uygulama çerçevesi ve sayısal deney planlama yaklaşımının temel bileşenleri açıklanmaktadır. Bu kapsamda, CCD noktalarının yapısı, parametre seviyelerinin kullanımı, değişken seçiminde mekanik temelli yaklaşım, parametre etkileşimleri ve RSM modellerinin uygunluk ölçütleri ele alınmaktadır.



SAYISAL DENEY PLANLAMA YAKLAŞIMI

Parametrik yapı araştırmalarında temel amaç, davranışı etkileyen başlıca değişkenleri sistematik biçimde incelemek ve sınırlı sayıda deney veya analiz ile en yüksek bilgi düzeyine ulaşmaktır. Çok sayıdaki parametrenin tüm kombinasyonlarının tek tek denenmesi, hem laboratuvar deneyleri hem de ileri sayısal analizler açısından önemli zaman ve maliyet yükü oluşturmaktadır. Bu nedenle parametre uzayının rastgele değil, önceden tanımlanmış bir deney tasarımı çerçevesinde oluşturulması gerekmektedir. Bu bildiride ele alınan her iki çalışmada da, deneysel olarak doğrulanmış sonlu eleman modelleri temel alınarak parametrik araştırmalar için CCD-RSM tabanlı sayısal deney planlama yaklaşımı benimsenmiştir.

Bu çerçevede, CCD ile üretilen sayısal deney noktaları yardımıyla, taşıma kapasitesini temsil eden çıktıların ikinci dereceden bir yanıt yüzeyi ile ifade edilmesi amaçlanmaktadır. Genel RSM bağıntısı, sabit, doğrusal, karesel ve ikili etkileşim terimlerini içeren ikinci dereceden bir polinom denklemle temsil edilmekte olup Denklem (1)'de (Montgomery, 2017) verilmektedir. Böylece yalnızca tekil değişken etkileri değil, parametreler arası etkileşimler de aynı model içinde değerlendirilebilmektedir.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^n \beta_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

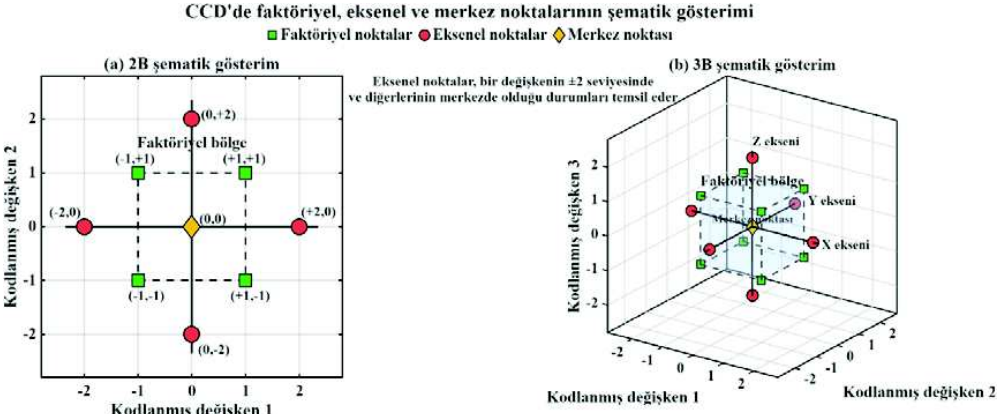
CCD noktalarının yapısı ve parametre seviyelerinin kullanımı

CCD'de, deney veya analiz noktaları faktöriyel, ekstenel ve merkez noktaları olmak üzere üç ana gruptan oluşmaktadır. Faktöriyel noktalar değişkenlerin düşük ve yüksek seviyelerindeki tüm olası kombinasyonları, merkez noktası tüm değişkenlerin orta seviyede olduğu durumu, ekstenel noktalar ise yalnızca bir değişkenin uç seviyelere taşındığı ve diğer değişkenlerin merkezde tutulduğu koşulları temsil etmektedir. Bu yapı, doğrusal etkilerin yanı sıra ikinci dereceden etkilerin ve parametre etkileşimlerinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. CCD'nin bu temel mantığı Şekil 2'de şematik olarak gösterilmiştir.

Aynı yaklaşım hem C-şekilli hem de düzlemsel kompozit perde duvar çalışmalarında kullanılmıştır. CCD'de toplam deney (*TD*) sayısı, değişken sayısı *n* ve merkez noktası sayısı *mn* kullanılarak $TD = 2^n + 2n + mn$ bağıntısı ile hesaplanmaktadır. C-şekilli duvar çalışmasında altı değişken için 64 faktöriyel nokta, 12 ekstenel nokta ve 1 merkez noktadan oluşan toplam 77 sayısal deney; düzlemsel duvar çalışmasında ise beş değişken için 32 faktöriyel nokta, 10 ekstenel nokta ve 1 merkez noktadan oluşan toplam 43 sayısal deney oluşturulmuştur. Burada faktöriyel nokta sayıları sırasıyla $2^6 = 64$ ve $2^5 = 32$ bağıntılarından, ekstenel nokta sayıları ise $2n$ bağıntısına göre sırasıyla $2 \times 6 = 12$ ve $2 \times 5 = 10$ değerlerinden elde edilmiştir. Her iki çalışmaya ait CCD bileşenleri Tablo 1'de karşılaştırılabilir olarak verilmektedir.

CCD'nin dengeli yapısı sayesinde her değişken, faktöriyel küme içinde düşük ve yüksek seviyelerde eşit sayıda yer almaktadır. Örneğin C-şekilli duvar çalışmasında altı değişken bulunduğundan toplam faktöriyel nokta sayısı $2^6 = 64$ olmakta, bu nedenle her bir değişken düşük ve yüksek faktöriyel seviyelerde 32'şer kez yer almaktadır ($64/2 = 32$). Benzer şekilde düzlemsel duvar çalışmasında beş değişken için toplam faktöriyel nokta sayısı $2^5 = 32$ olduğundan, her değişken düşük ve yüksek faktöriyel seviyelerde 16'şar kez bulunmaktadır ($32/2 = 16$). Ekstenel düşük ve ekstenel yüksek seviyeler ise her değişken için yalnızca birer kez kullanılmaktadır; çünkü bu noktalar yalnızca ilgili değişkenin kendi eksenini boyunca tanımlanmaktadır. Merkez seviye ise yalnızca tek merkez noktasını değil, aynı zamanda diğer değişkenlerin ekstenel noktalarında ilgili değişkenin merkezde kaldığı durumları da içermektedir. Bu nedenle F_y değişkeni için merkez seviye, C-şekilli duvar çalışmasında 11 kez [1 merkez noktası + diğer 5 değişkene ait 10 ekstenel nokta], düzlemsel duvar çalışmasında ise 9 kez [1 merkez noktası + diğer 4 değişkene ait 8 ekstenel nokta] yer almaktadır. Akma gerilmesi değişkeni üzerinden bu kullanım dağılımı, C-şekilli duvar için Şekil 3(a)'da ve düzlemsel duvar için Şekil 3(b)'de örnek olarak gösterilmiştir.

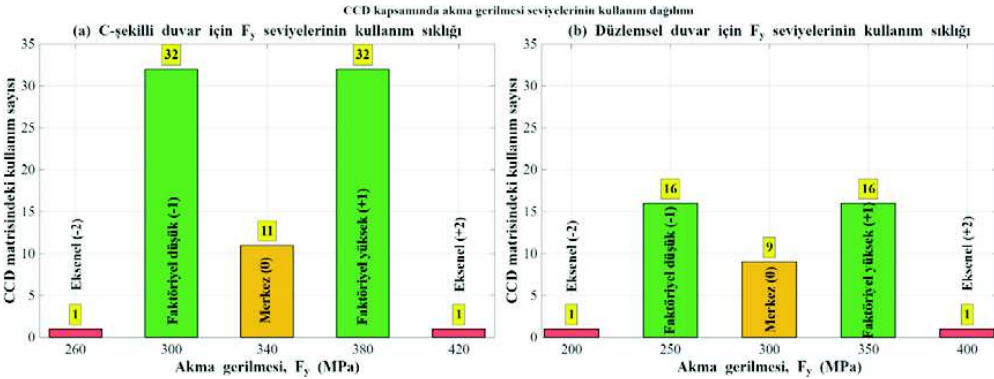
Bu karşılaştırma, aynı CCD yaklaşımının farklı duvar geometrileri ve farklı parametre kümeleri için başarıyla uygulanabildiğini göstermektedir. Böylece tam faktöriyel yaklaşımın gerektireceği çok daha yüksek sayıda kombinasyonlar yerine, yönetilebilir sayıdaki sayısal deneylerle geniş parametre uzayları sistematik biçimde taranabilmiş ve doğrusal, ikinci dereceden ve etkileşimsel davranışlar birlikte değerlendirilebilmiştir.



Şekil 2. CCD’de faktöriyel, eksenel ve merkez noktalarının şematik gösterimi

Tablo 1. C-şekilli ve düzlemsel duvar çalışmaları için CCD bileşenlerinin karşılaştırılması

Çalışma	Değişken sayısı	Faktöriyel nokta	Eksenel nokta	Merkez nokta	Toplam analiz
C-şekilli duvar	6	64	12	1	77
Düzlemsel duvar	5	32	10	1	43



Şekil 3. CCD kapsamında akma gerilmesi seviyelerinin kullanım dağılımı

Parametre Seçiminde Mekanik Esaslar

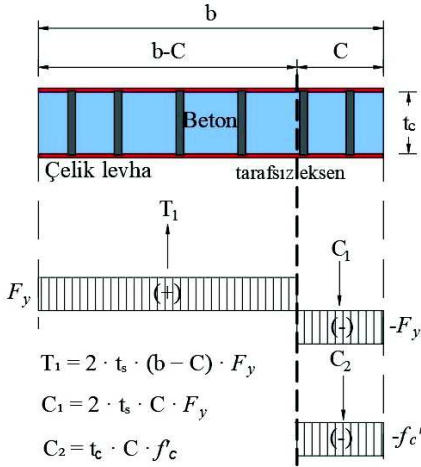
Parametrik çalışmalarda kullanılacak değişkenlerin belirlenmesi yalnızca istatistiksel bir tercih değil, aynı zamanda mekanik davranışın fiziksel temsiline dayanan bir süreçtir. Bu kapsamda, teorik taşıma kapasitesi eşitliklerinde yer alan malzeme ve geometri parametreleri, RSM modelinde doğal aday değişkenler olarak düşünülebilir. Özellikle kompozit perde duvarlar için geliştirilen plastik moment ifadelerinde kullanılan çelik akma dayanımı, beton basınç dayanımı, duvar boyutları, narinlik oranları ve donatı düzeyi gibi parametreler, davranışı doğrudan etkileyen temel değişkenler olarak öne çıkmaktadır. Bu yaklaşım, çok değişkenli problemlerde hangi parametrelerin deney tasarımına dahil edilmesi gerektiği konusunda pratik ve mühendislik temelli bir başlangıç sunmaktadır.

Düzlemsel kompozit perde duvar için mekanik tabanlı gerilme dağılımı Şekil 4’te gösterilmektedir. Bu idealizasyonda çelik levhaların çekme ve basınç altında düzgün akma

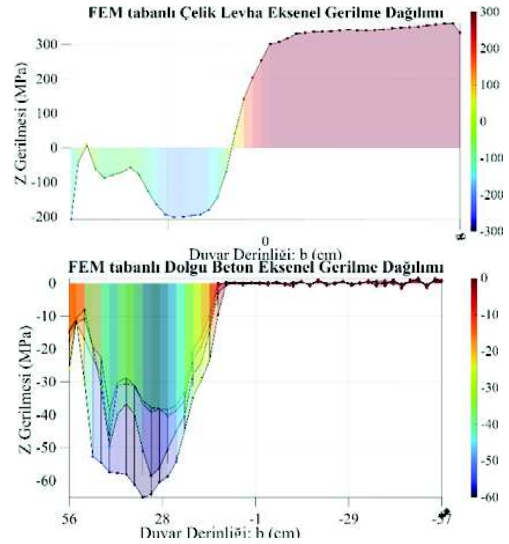
gerilmesine ulaştığı, dolgu betonun ise yalnızca basınç bölgesinde düzgün tek eksenli basınç gerilmesi taşıdığı kabul edilmektedir. Bu varsayımlar yardımıyla teorik plastik moment ifadesi kolaylıkla kurulabilmekte ve taşıma kapasitesini etkileyen temel değişkenler açık biçimde tanımlanabilmektedir.

Bununla birlikte, söz konusu yaklaşım gerçek duvar davranışını tam olarak temsil etmemektedir. Her ne kadar güvenli tarafta kalmayı amaçlasa da bu idealizasyon çoğu durumda duvarın gerçek dayanımını olduğundan düşük tahmin etmektedir. Bunun temel nedeni, yaklaşımın düzlemsel kesitler düzlem kalır varsayımına dayanması ve gerçekte oluşan gerinme sertleşmesi, yerel levha burkulması, beton sargılama etkisi ve benzeri malzeme etkileşimlerini doğrudan yansıtmasıdır.

Bu sınırlamalar, sonlu eleman analizine dayalı daha gelişmiş bir çerçevenin kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Düzlemsel kompozit perde duvar için FEM tabanlı gerilme dağılımı Şekil 5'te gösterilmektedir. Deneysel verilerle kalibre edilmiş bir sonlu eleman modelinin, CCD ile oluşturulan parametre kombinasyonları üzerinden yürütülen parametrik çalışmalarda kullanılması sayesinde, teorik yaklaşımın içeremediği davranış mekanizmaları dolaylı olarak hesaba katılabilmektedir. Böylece yalnızca mekanik tabanlı idealizasyona bağlı kalan teorik tahminler yerine, duvarın gerçek taşıma kapasitesini daha iyi temsil eden sayısal sonuçlar üzerinden kapalı polinom denklemler elde edilebilmektedir.



Şekil 4. Düzlemsel kompozit perde duvar için mekanik tabanlı gerilme dağılımı



Şekil 5. Düzlemsel kompozit perde duvar için FEM tabanlı gerilme dağılımı

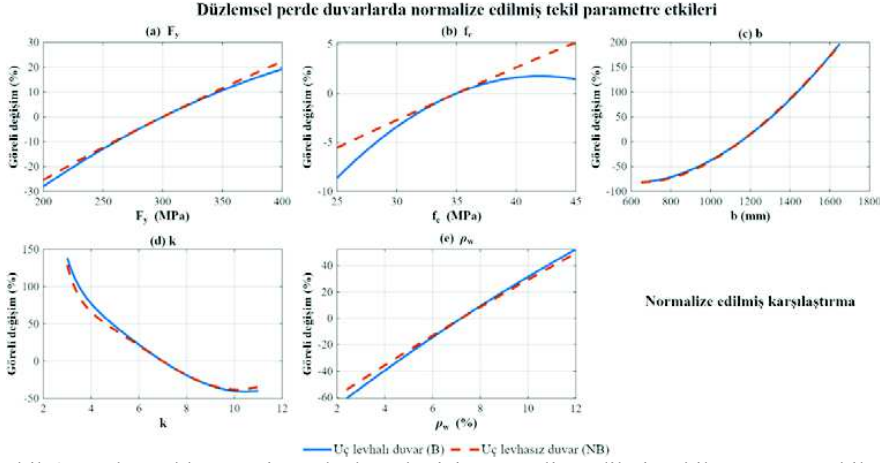
PARAMETRE ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Şekil 6'da, uç levhali (B) ve uç levhasız (NB) düzlemsel kompozit perde duvarlar için, RSM ile elde edilen kapalı form denklemlerden (Polat ve G. Polat, 2024) hesaplanan maksimum eğilme dayanımının merkez parametre değerlerine göre normalize edilmiş tekil parametre etkileri gösterilmiştir. Eğriler, çelik akma dayanımı F_y , beton basınç dayanımı f_c , duvar derinliği b , derinlik/kalınlık oranı k ve donatı oranı ρ değişkenlerinin moment kapasitesi üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Genel olarak iki duvar tipi için elde edilen eğilimlerin birbirine yakın olduğu ve parametre etkilerinin benzer mekanik davranış özellikleri sergilediği görülmektedir.

F_y ve ρ artışı ile moment kapasitesinin belirgin biçimde arttığı görülmektedir. Bu eğilim, çelik dayanımının ve donatı katkısının artmasının kesitin çekme ve basınç bölgelerindeki taşıma kapasitesini yükseltmesiyle uyumludur. Benzer şekilde, duvar derinliği b arttıkça moment

kapasitesinde önemli bir artış elde edilmektedir. Bu durum, iç kuvvet çiftinin kol uzunluğunun artmasıyla daha yüksek eğilme dayanımı oluşması bakımından mekanik olarak beklenen bir sonuçtur. Buna karşılık, derinlik/kalınlık oranı k arttıkça moment kapasitesinin azaldığı görülmektedir. k oranındaki artış, daha ince levha davranışına karşılık geldiğinden kesitin dayanım ve rijitlik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Beton basınç dayanımı f_c değişiminin etkisi ise diğer parametrelere kıyasla daha sınırlı ve doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir. Bu durum, eğilme kapasitesinin yalnızca beton dayanımıyla değil, çelik katkısı ve kesit geometrisi ile birlikte şekillenmesinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 6'da verilen eğriler, RSM ile elde edilen parametre etkilerinin yalnızca istatistiksel değil, aynı zamanda mekanik tabanlı beklentiler ve fiziksel duvar davranışı ile de uyumlu olduğunu göstermektedir. Bu yönüyle RSM yaklaşımı, düzlemsel kompozit perde duvarlarda hangi değişkenlerin daha baskın olduğunu belirlemek ve parametrik davranışı kısa ve anlaşılır biçimde yorumlamak için etkili bir araç sunmaktadır.



Şekil 6. Düzlemsel kompozit perde duvarlar için normalize edilmiş tekil parametre etkileri.

RSM MODELLERİNİN UYGUNLUĞUNUN DEĞERLENDİRİLMESİ

RSM ile geliştirilen kapalı form denklemlerin güvenilirliği, FEM sonuçları ile karşılaştırmalı hata ölçütleri ve varyans analizi (ANOVA) sonuçları üzerinden değerlendirilmelidir. Bu kapsamda, determinasyon katsayısı (R^2), kök ortalama kare hata (RMSE), ortalama mutlak hata (MAE) ve ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) gibi ölçütler modelin tahmin doğruluğunu ortaya koyarken, ANOVA sonuçları modelin genel anlamlılığını ve terimlerin katkı düzeyini göstermektedir. Düşük hata ölçütleri, anlamlı varyans analizi sonuçları ve fiziksel davranışla uyumlu parametre eğilimleri birlikte değerlendirildiğinde, geliştirilen RSM denklemlerinin hem istatistiksel hem de mekanik açıdan uygun bir tahmin aracı olduğu söylenebilir.

SONUÇ

Sunulan iki çalışma birlikte değerlendirildiğinde, CCD-RSM tabanlı sayısal deney planlamasının deney programlarının daha rasyonel biçimde oluşturulmasına katkı sağlayabileceği görülmektedir. Bu yaklaşım sayesinde, davranış üzerinde etkili parametreler ve kritik etkileşim bölgeleri deney öncesinde belirlenebilmekte, fiziksel test programı daha hedefli biçimde kurgulanabilmektedir. Bu yönüyle doğrulanmış sayısal modeller, deneysel araştırmaların yerine geçen değil, onları yönlendiren ve tamamlayan araçlar olarak değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

- AISC 2022 Seismic provisions for structural steel buildings In: AISC 341-22 American Institute of Steel Construction, Chicago, IL
- Alzeni Y ve Bruneau M (2017) "In-plane cyclic testing of concrete-filled sandwich steel panel walls with and without boundary elements," *Journal of Structural Engineering*, 143(9):04017115
- Bypour M, Kioumars M ve Yekrangnia M (2021) "Shear capacity prediction of stiffened steel plate shear walls (SSPSW) with openings using response surface method," *Engineering Structures*, 226:111340
- Bypour M, Yekrangnia M ve Kioumars M (2024) "Predicting the shear capacity of composite steel plate shear wall with the application of RSM," *Engineering Structures*, 301:117263
- Hammoudi A, Moussaceb K, Belebchouche C ve Dahmoune F (2019) "Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) prediction in compressive strength of recycled concrete aggregates," *Construction and Building Materials*, 209:425-436
- Hu S, Chen B, Song G ve Wang L (2022) "Resilience-based seismic design optimization of highway RC bridges by response surface method and improved non-dominated sorting genetic algorithm," *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(1):449-476
- Huang S-T, Huang Y-S, He A, Tang X-L, Chen Q-J, Liu X ve Cai J (2018) "Experimental study on seismic behaviour of an innovative composite shear wall," *Journal of Constructional Steel Research*, 148:165-179
- Kenarangi H, Kizilarlan E ve Bruneau M (2021) "Cyclic behavior of c-shaped composite plate shear walls–Concrete filled," *Engineering Structures*, 226:111306
- Keshtegar B, Nehdi M L, Trung N-T ve Kolahchi R (2021) "Predicting load capacity of shear walls using SVR–RSM model," *Applied Soft Computing*, 112:107739
- Kuntoğlu M, Aslan A, Pimenov D Y, Giasin K, Mikolajczyk T ve Sharma S (2020) "Modeling of cutting parameters and tool geometry for multi-criteria optimization of surface roughness and vibration via response surface methodology in turning of AISI 5140 steel," *Materials*, 13(19):4242
- Lou H, Xiao Z, Wan Y, Quan G, Jin F, Gao B ve Lu H (2022) "Size optimization design of members for shear wall high-rise buildings," *Journal of Building Engineering*, 61:105292
- Montgomery D C 2017 Design and analysis of experiments John Wiley & sons
- Polat E (2026) "Flexural Response Prediction of C-Shaped Concrete-Filled Composite Plate Shear Walls (C-PSW/CF) using Response Surface Methodology," *Structures*:(in press)
- Polat E ve G. Polat E (2024) "Predicting and optimizing maximum flexural strength of planar composite plate shear walls – concrete filled with the application of LR and RSM," *Structures*, 69:107353
- Qin Y, Shu G-P, Zhou G-G ve Han J-H (2019) "Compressive behavior of double skin composite wall with different plate thicknesses," *Journal of Constructional Steel Research*, 157:297-313
- Sukri N R, Husain N A, Nordin S Z ve Abu A. Response surface methodology for structural damage identification using FRF curvature. American Institute of Physics Conference Series, June 01, 2024 2024. AIP, 030003.
- Varma A H, Shafaei S ve Klemencic R (2019) "Steel modules of composite plate shear walls: Behavior, stability, and design," *Thin-Walled Structures Thin-Walled Structures*, 145:106384
- Zhang X, Qin Y, Chen Z ve Jie L (2016) "Experimental behavior of innovative T-shaped composite shear walls under in-plane cyclic loading," *Journal of Constructional Steel Research*, 120:143-159

DONATILI BETON NUMUNELERİN ADERANS TESPİTİ İÇİN PUSH-OUT DENEY DÜZENEGİ

PUSH-OUT TEST SETUP FOR DETERMINING THE ADHESION OF REINFORCED CONCRETE SPECIMENS

Orhan DOĞAN¹ ve Melek AKGÜL²

ÖZET

Betonarme yapılarda aderans kaybı, yapısal performansı ve durabiliteyi doğrudan etkileyen temel sorunlardan biri olup, bu kaybın başlıca nedenlerinden biri donatı korozyonudur. Aderans performansının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri Pull-out deneyidir. Ancak bu yöntem, uzun donatı çekme boyu gerektirmesi nedeniyle mevcut yapıların aderans değerlendirilmesinde uygulanabilirliği sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle, donatı çekme boyu gerektirmeyen ve mevcut yapılardan alınabilen donatılı karot numunelerine uygulanabilen Push-out yöntemi önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, mevcut betonarme yapılardan elde edilen donatılı ve donatısız karot numuneleri üzerinde gerçekleştirilen basınç ve Push-out deneyleri aracılığıyla, betonun basınç dayanımındaki değişim ile aderans kaybı birlikte değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, Push-out deneyinin mevcut yapıların aderans performansının belirlenmesinde uygulanabilir ve pratik bir yöntem olduğunu göstermektedir

Anahtar Kelimeler: Aderans kaybı, Pull-out, Push-out,

ABSTRACT

Bond deterioration in reinforced concrete structures is a critical issue that directly affects structural performance and durability, with reinforcement corrosion being one of the primary causes of such degradation. The pull-out test is one of the most commonly used methods for evaluating bond performance. However, this method requires a relatively long embedment length, which limits its applicability for in-situ assessment of existing structures. Therefore, the push-out test method, which does not require long anchorage lengths and can be applied to reinforced core samples extracted from existing structures, emerges as a practical and efficient alternative. In this study, both compressive strength and bond degradation were evaluated through compressive and push-out tests conducted on reinforced and plain concrete core samples obtained from existing reinforced concrete structures. The results demonstrate that the push-out test provides a reliable and practical approach for assessing the bond performance of existing structures.

Keywords: Loss of adhesion, Pull-out, Push-out

GİRİŞ

Gelişmekte olan ülkelerde kentleşme ve kentsel dönüşüm süreçlerinin yanı sıra yıkım gücü büyük depremler sonrası çok sayıda yapı, öngörülen servis ömrünü tamamlayamadan yıkılmakta ya da güçlendirilmeye ihtiyaç duymaktadır. Bununla birlikte, bu süreçlerden bağımsız olarak mevcut yapılarda çeşitli nedenler ve mekanizmalasmlar sonucu performans kayıpları da benzer sonuçlara yol açabilmektedir. Bu mekanizmalasmlar arasında en önemlilerinden biri, korozyona bağlı olarak

¹ Prof. Dr., Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, odogan@kku.edu.tr

² Doç. Dr., Munzur Üniversitesi, Tunceli, melekakgul@munzur.edu.tr

gelişen aderans kaybidir. Beton, inşaat sektöründe uzun yıllardır en çok tercih edilen yapı malzemesidir. Büyüyen inşaat sektörü, beraberinde kullanım alanları her geçen gün artan ve bu hali ile de ülkelerin ekonomik hacimlerinde önemli bir finansal paya sahip olan beton endüstrisini beslemektedir (Ahmad et al., 2022; Van Damme, 2018). Yapısal olarak kolay üretilen beton; ekonomik ve teknolojik açıdan yenilikçi uygulamalara uyum sağlayabilen bir yapı malzemesidir. Beton diğer yapı malzemelerine kıyasla üstün olan mekanik özelliklerinden dolayı çoğu yapı türü için sıklıkla tercih edilir (Rodrigues, Gaboreau, Gance, Ignatiadis, & Betelu, 2021). Buna rağmen beton, kullanım alanı ve üretim içeriğine bağlı olarak çok değişken iç/dış, fiziksel/kimyasal dayanıklılık sorunlarıyla karşı karşıyadır (Chikhi et al., 2024; Makul, 2020; Sangoju, Gopal, & Bhajantri H, 2021). Betonun basınç dayanımı ne kadar yüksek olsa da çekme ve eğilme dayanımı da bir o kadar düşüktür (Badarloo, Kari, & Jafari, 2018; Liu et al., 2021). Yapılarda muhtemel çekme gerilmeleri vardır ve bu gerilmelerin karşılanması büyük önem taşır. Bu amaçla çekme gerilmelerinin betonarme donatısı tarafından karşılanması beklenir (Akgül, 2022; Windisch, 2021). Betonun çekme zayıflığını gidermek için demir veya çelik takviyesi kullanma fikri, çimento endüstrisinin yükselişiyle neredeyse eş zamanlı olarak ortaya çıkmıştır (Van Damme, 2018).

Sonuç olarak, beton ve çelik bir araya gelerek en yaygın kullanılan yapı malzemesi olan betonarmeyi oluşturur. Betonarme söz konusu olduğunda, ana bileşen malzemeler neredeyse her zaman beton ve çeliktir olsa da betonarme, birbirini tamamlayan çok farklı özelliklere sahip çeşitli malzemelerden oluşan kompozit bir malzemedir (Xue et al., 2022). Beton ve betonarme donatısının betonarme olarak kabul edilebilmesi için iki önemli koşul vardır. Birincisi, betonda kullanılan çimentonun, doğası gereği betonarme donatısını koruyucu bir tabaka olarak sarması; ikincisi ise, beton ile donatı arasında, ikisinin birlikte çalışabileceği şekilde yeterli bir yapışma (aderans) sağlanmasıdır. Bu aderansın düzeyi betonarmede beklenen yapısal ve mekanik performansı belirleyen en önemli etkenlerdendir (Abushanab & Alnahhal, 2023; Sirico et al., 2025). Donatı, doğası gereği korozyona eğilimli bir yapı malzemesidir. Ancak, donatı betonarme sistemi içine bir eleman olarak eklendiğinde, betonun dayanıklılığını önemli ölçüde etkileyebilir. Bunun ana nedeni, donatıda, özellikle beton-donatı arayüzünde meydana gelen korozyon ve kimyasal reaksiyona bağlı olarak artan donatı hacminin yarattığı gerilimdir. Bu nedenle, donatıyı korozyona karşı koruyacak şekilde saran betonun koruma performansı önemlidir. Artan korozyon oluşumu ilerleyen süreçte aderans kaybı anlamına gelir (Sathe & Devsalle, 2025) ve beton-donatı arayüzündeki bağın gelişimi korozyon nedeniyle önemli ölçüde azalabilir. Beton ile donatı arasındaki aderansın incelendiği birçok akademik çalışmada çekme (Pull-out) yönteminin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir (El Alami et al., 2022; Sirico et al., 2025; Yudoprasetyo, Piscesa, & Rasyid, 2022). Bu yöntemde, uzun donatı çekme boyuna ihtiyaç vardır ve bu gerekliliğin mevcut yapılardan alınan donatılı karot örnekleri ile sağlanması çoğu zaman mümkün değildir. Bu hali ile Pull-out yöntemi, zahmetli ve uygulanabilirliği sınırlı bir yöntemdir. Pull-out yönteminin en önemli alternatifi itme (Push-out) deneyidir ve bu hali ile Push-out deneyi daha pratik ve uygulanabilir bir yöntemdir. Bu iki yöntem arasında gerekli dönüşüm denklemlerinin belirlenmesi ve mevcut yapılardan alınan karot numunelerini de kapsayan geniş bir uygulama alanına hizmet etmesi, Push-out deney düzeneginin tasarlanmasını ve uygulanmasını önemli ve gerekli kılmaktadır.

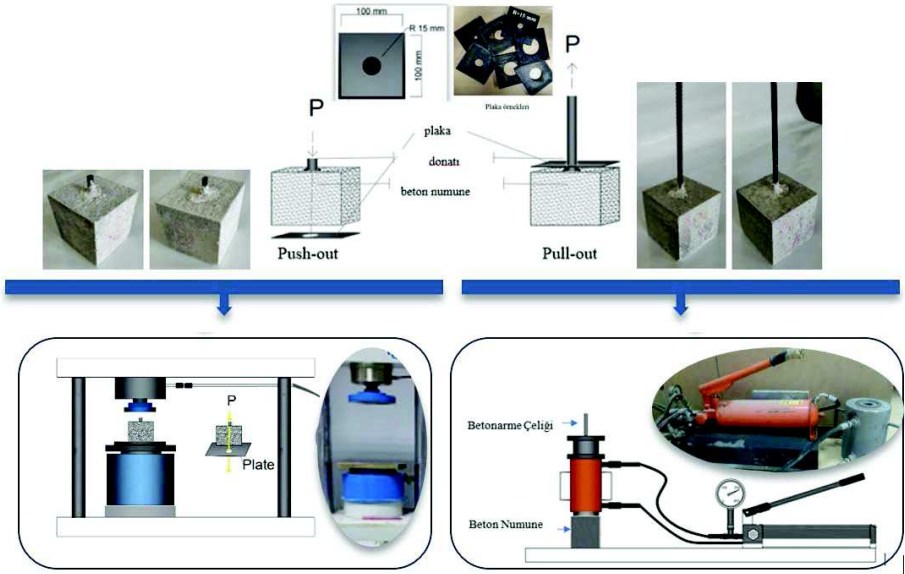
DENEYSSEL PROGRAM

Bu çalışma, daha önce doktora tezi olarak tamamlanmış olan (Akgül, 2022) deneysel araştırma verilerinin sonuçlarına dayanmaktadır. Söz konusu çalışmada, Pull-out ve Push-out deneyleri arasındaki ilişki ampirik denklemler ile ortaya konulmuş; farklı beton sınıflarına sahip donatılı betonlarda aderans davranışı incelenmiştir. Tüm bu veriler ışığında Push-out aderans deneyine yönelik bir deney düzenegi tasarlanmıştır. Bu bölümde ise Pull-out ve Push-out aderans deneyleri arasındaki ampirik ilişkilerin elde edilmesi ile Push-out deney düzenegine ait bilgiler alt başlıklar halinde sunulmuştur.

Çalışmada beton sınıfı ve donatı türü, mevcut yapı stokunu temsil edecek şekilde seçilmiştir. C5-35 bandında basınç dayanımına sahip beş farklı beton grubuna ait numune setlerinin hazırlanmasında, S220 nervürlü ve S420 nervürlü donatılar kullanılmıştır. Toplamda 60 adet donatılı ve 30 adet donatısız olmak üzere, 100×100×100 mm boyutlarında 90 adet küp numune üretilmiştir. Donatılı numunelerin yarısı Push-out diğer yarısı ise Pull-out deneylerinde kullanılmıştır. Ayrıca donatılı numunelerin yarısı nervürlü, diğer yarısı nervürlü donatılı olarak imal edilmiştir. Elde edilen deneysel veriler kullanılarak Push-out ve Pull-out aderans deneyleri arasında ampirik denklemler geliştirilmiştir. Oluşturulan denklemler ve grafikler, mevcut yapılardan alınan donatılı numunelere uygulanacak Push-out aderans deneyi ile literatürde yaygın olarak kullanılan Pull-out aderans deneyleri arasındaki ilişkinin belirlenmesine olanak sağlayacak niteliktedir.

Deney Numuneleri

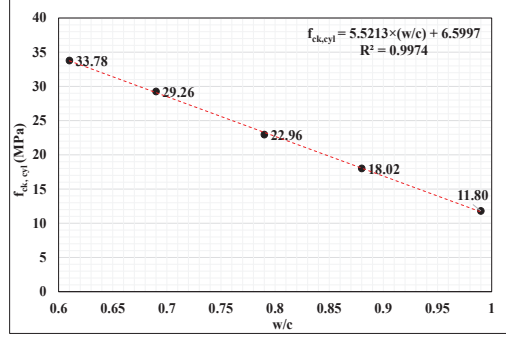
Üretilen donatılı ve donatısız beton numunelerde mevcut yapı stoğunu temsil edebilmek amacıyla, farklı basınç dayanımlarına sahip beş ayrı beton serisi tasarlanmıştır (TS EN 802., 2016). Betonların karışım tasarımlarına ve üretim sonrası elde edilen basınç dayanımı değerlerine ait veriler Tablo 1’de sunulmaktadır (TS EN 12390-3, 2003). Geleneksel beton üretim yöntemiyle, herhangi bir katkı kullanılmaksızın hazırlanan numuneler, 28 gün boyunca kirece doygun su küründe olgunlaştırılmış ve ardından gerekli basınç ve aderans deneyleri gerçekleştirilmiştir. Aderans deneylerinde kullanılan numuneler ile deneysel prosedür ise Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Pull-put ve Push-out deney düzenekleri ve numune örnekleri

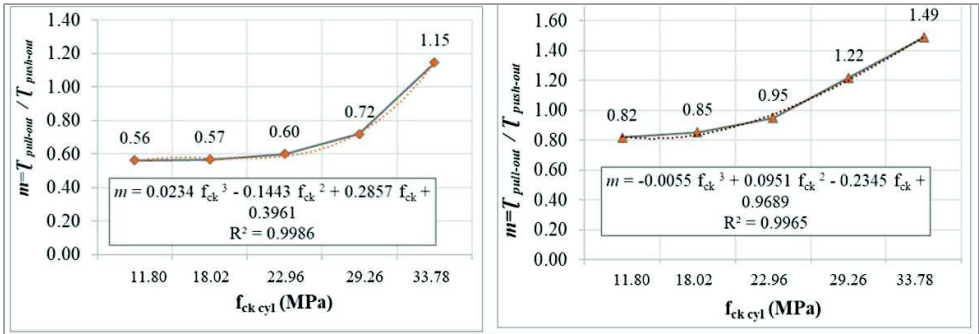
Tablo 1. 1m³ beton için karışım tasarımı (kg/m³), donatısız numune basınç dayanımı-S/Ç ilişkisi

Kod	S/Ç	Agrega (kg)		Çimento (kg)	Basınç dayanımı f _{ck,cyl} (MPa)
		KT1 (0-4 mm)	KT1 (4-8 mm)		
A	0,99	1086,14	509,91	256,57	11,80
B	0,88	1068,52	501,64	288,64	18,02
C	0,79	1050,46	493,16	321,52	22,96
D	0,69	1024,86	481,14	368,12	29,26
E	0,61	998,34	468,69	416,39	33,78



Pull-Out, Push-Out Aderans Deneylerine Bağlı Denklemler

Donatılı beton numuneleri ile gerçekleştirilen aderans deneyleri ışığında, beton basınç dayanımına bağlı olarak grafikler yardımıyla nervürlü ve nervürlü donatılı numuneler için denklemler oluşturulmuştur (Şekil 2). $f_{ck,cyl}$ ve Ppull-out/Ppush-out oranına (m) bağlı olarak elde edilen denklemlerin R^2 değerleri, sırasıyla nervürlü ve nervürlü numuneler için 0,9986 ve 0,9965'tir. Nervürlü ve nervürlü donatılı numunelerde en yüksek m değeri olan 33,78 MPa'ya sahip E beton grubunda; en düşük m oranı ise $f_{ck,cyl}$ değeri 11,80 MPa olan A beton grubunda kaydedilmiştir. Bu oran E beton grubunda nervürlü ve nervürlü numuneler için sırasıyla 1,15 ve 1,49 iken, A beton grubunda sırasıyla 0,56 ve 0,82'dir (Şekil 2).



Şekil 2. a) Nervürlü b) Nervürlü donatılı beton serileri için $f_{ck,cyl}$ ve m ilişkisi

Nervürlü donatılı numunelerde $f_{ck,cyl}$ değerinin yaklaşık 32 MPa olması durumunda Ppull-out \approx Ppush-out ve $m \approx 1,0$ sonuçları desteklenmektedir. Nervürlü donatılı numunelerde $f_{ck,cyl} < 32$ MPa olduğunda Ppull-out $<$ Ppush-out, $f_{ck,cyl} > 32$ MPa olduğunda ise Ppull-out $>$ Ppush-out olmaktadır. Ayrıca deneysel verilerin sonuçlarında, $f_{ck,cyl} < 10$ MPa olan betonlar için m değerinin yaklaşık 0,55 olarak kabul edilebileceği öngörülmüştür.

Nervürlü donatılı yerleştirilen numuneler için ise $f_{ck,cyl} = 25$ MPa (\sim C25/30) seviyesinde Ppull-out \approx Ppush-out durumu ve $m \approx 1,0$ değeri belirlenmiştir. Nervürlü donatılı numunelerde $f_{ck,cyl} < 25$ MPa durumunda Ppull-out $<$ Ppush-out; $f_{ck,cyl} > 25$ MPa durumunda ise Ppull-out $>$ Ppush-out olmaktadır. Ayrıca $f_{ck,cyl} < 10$ MPa olan betonlar için m değerinin yaklaşık 0,80 olarak kabul edilebileceği öngörülmüştür. Şekil 10 ve 11'den elde edilen verilere göre m oranı donatı tipine ve $f_{ck,cyl}$ değerine bağlıdır. Ancak $f_{ck,cyl}$ değerinin 10 MPa seviyesinde olması durumunda m oranı nervürlü ve nervürlü donatılı numuneler için sırasıyla 0,80 ve 0,55'tir. Ayrıca bu iki oran arasında %46'lık bir fark hesaplanmıştır.

Push-Out Deney Düzenegi

Donatılı numunelerin aderansının belirlenmesi amacıyla kullanılan Push-out deney düzenegi Şekil 3'te verildiği gibidir. Bu deney düzeneginde, mevcut yapılardan elde edilen donatılı karot numunelerine aksel doğrultuda uygulanan yük ile donatının beton içinden itilmesi sağlanmakta ve maksimum yük değeri belirlenmektedir. Elde edilen bu yük değeri kullanılarak aderans gerilmesi, Denklem 1 ile hesaplanmaktadır. Denklemde; F maksimum yükü, d donatı çapını, l aderans (ankraj) boyunu temsil etmektedir.

$$\tau = \frac{F}{\pi dl} \quad (1)$$

Elde edilen aderans dayanımı değerleri, gerekli düzeltme katsayıları ve ampirik denklemler yardımıyla değerlendirilerek, Push-out ve Pull-out deney sonuçları arasındaki ilişki ortaya konulabilmektedir.



Şekil 3. Push-Out deney düzenegi ve donatılı numune örnekleri

SONUÇ

Betonarme yapılarda aderans kaybı, yapının durabilitesini doğrudan etkileyen kritik bir problemdir ve bu kaybın başlıca nedenlerinden biri donatı korozyonudur. Korozyon sürecinin başlangıç aşamalarında, donatı yüzeyinde oluşan pürüzlülük nedeniyle aderans dayanımında geçici bir artış gözlemlenebilmekte; ancak ilerleyen süreçte donatı kesitinde meydana gelen kayıplar ve betonun çatlaması ile birlikte aderans hızla azalmaktadır. Bu durum, aderans davranışının zamana bağlı olarak parabolik bir değişim gösterdiğini ortaya koymaktadır. Yapılan değerlendirmeler, mevcut betonarme yapılardan alınan donatılı ve donatısız karot numuneleri üzerinde gerçekleştirilen basınç ve Push-out deneyleri aracılığıyla, hem betonun basınç dayanımındaki değişimin hem de aderans kaybının belirlenebileceğini göstermektedir. Betonarme yapıların ekonomik ömrünün yaklaşık 50 yıl olarak kabul edilmesine rağmen, günümüzde birçok yapının bu sürenin ötesinde hizmet vermeye devam ettiği görülmektedir. Bu durum, durabilite kaynaklı problemlerin daha da önem kazanmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda, yapıların servis ömrünün doğru şekilde belirlenebilmesi için, malzeme özelliklerinin yanı sıra korozyon ve diğer durabilite etkilerine bağlı hasar oluşum hızlarının da dikkate alındığı bütüncül değerlendirme yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Türkiye’de 1975 ve öncesinde C10 olan projede öngörülen beton basınç dayanımının yıllar içinde C25’e kadar çıkarılmış olması, özellikle yerinde dökülmüş betonlarda öngörülen beton basınç dayanımının altında kaldığı gerçeği ile değerlendirildiğinde, mevcut yapıların basınç dayanımının çok değişken olduğuna işaret eder. Buda aderans ile doğrudan ilişkilidir. Bu çalışmada farklı beton sınıflarının aderans ve servis ömrü ilişkisinin kurulmasındaki ana amaçta mevcut yapıların doğru ve yerinde değerlendirilmesine olanak sağlamaktır. Sonuç olarak, korozyonun betonarme yapılarda hem aderans kaybına hem de donatı kesitinde ciddi azalmalara yol açarak yapısal güvenliği tehdit ettiği açıkça görülmektedir. Bu nedenle, mevcut yapıların değerlendirilmesi ve güçlendirme kararlarının alınmasında korozyon ve aderans ilişkisini esas alan deneysel ve analitik yöntemlerin kullanılması büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla geliştirilmiş olan Push-out aderans deneyi için önerilen bu yöntemin mevcut yapılardan alınacak yeter sayıda donatılı numune ile aderans deneylerinin gerçekleştirilebileceğini göstermektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: 2021/058

KAYNAKLAR

- Abushanab, A., & Alnahhal, W. (2023). Bond strength of corroded reinforced recycled aggregate concrete with treated wastewater and fly ash. *Journal of Building Engineering*, 79, 107778. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103240>
- Ahmad, J., Kontoleon, K. J., Majdi, A., Naqash, M. T., Deifalla, A. F., Ben Kahla, N., Qaidi, S. M. A. (2022). A Comprehensive Review on the Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) in Concrete Production. *Sustainability*, 14(14), 8783. <https://doi.org/10.3390/su14148783>
- Akgül, M. (2022). *Betonarme yapılarda donatı korozyon oranının ve yaşının belirlenmesi* (Doktora Tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- Badarloo, B., Kari, A., & Jafari, F. (2018). Experimental and Numerical Study to Determine the Relationship between Tensile Strength and Compressive Strength of Concrete. *Civil Engineering Journal*, 4(11), 2787–2800. <https://doi.org/10.28991/cej-03091198>
- Chikhi, A., Rebai, B., Benaddi, H., Tidjani, M., Lakhemissi, T., Abdelhak, B., & Hadji, M. (2024). Impact of aggressive environments on the mechanical and physico-chemical properties of concrete. *Studies In Engineering And Exact Sciences*, 5(2), e9846. <https://doi.org/10.54021/seesv5n2-402>
- El Alami, E., Fekak, F.-E., Garibaldi, L., Moustabchir, H., Elkhalfi, A., Scutaru, M. L., & Vlase, S. (2022). Numerical Study of the Bond Strength Evolution of Corroded Reinforcement in Concrete in Pull-Out Tests. *Applied Sciences*, 12(2), 654. <https://doi.org/10.3390/app12020654>
- Liu, S., Zhu, M., Ding, X., Ren, Z., Zhao, S., Zhao, M., & Dang, J. (2021). High-Durability Concrete with Supplementary Cementitious Admixtures Used in Corrosive Environments. *Crystals*, 11(2), 196. <https://doi.org/10.3390/cryst11020196>
- Makul, N. (2020). Advanced smart concrete - A review of current progress, benefits and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122899. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122899>
- Rodrigues, R., Gaboreau, S., Gance, J., Ignatiadis, I., & Betelu, S. (2021). Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring. *Construction and Building Materials*, 269, 121240. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121240>
- Sangoju, B., Gopal, R., & Bhajantri H. B. (2021). A review on performance-based specifications toward concrete durability. *Structural Concrete*, 22(5), 2526–2538. <https://doi.org/10.1002/suco.201900542>
- Sathe, S., & Devsale, A. (2025). Influence of corrosion on bond strength in reinforced recycled aggregate concrete with fly ash. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 29(10), 1953–1986. <https://doi.org/10.1080/19648189.2025.2472055>
- Sirico, A., Palii, O., Belletti, B., Bernardi, P., Pappalardo, M., Sanchez, J., Medina, C. (2025). Bond performance assessment of uncorroded and corroded reinforced recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 470(9), 139951. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.139951>
- TS EN 802. (2016). *Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları*. Ankara.
- TS EN 12390-3. (2003). *TS EN 12390-3*. Ankara.
- Van Damme, H. (2018). Concrete material science: Past, present, and future innovations. *Cement and Concrete Research*, 112, 5–24. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.002>
- Windisch, A. (2021). The tensile strength: The most fundamental mechanical characteristics of concrete. *Concrete Structures*, 22, 1–4. <https://doi.org/10.32970/CS.2021.1.1>
- Xue, Q., Zhang, L., Mei, K., Li, X., Newell, P., Wang, Y., Zheng, W. (2022). CO₂-induced evolution of chemical, structural and mechanical properties of reinforced concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 353. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129069>
- Yudoprasyto, K., Piscesa, B., & Rasyid, H. Al. (2022). Modeling Pull-Out Behavior Of The Deformed Rebar Embedded Inside The Reinforced Concrete. *Journal of Civil Engineering*, 37(1), 10. <https://doi.org/10.12962/j20861206.v37i1.11871>

LİFLİ BETONLARIN KARIŞIK MOD (MOD-I-II GEÇİŞİ) KIRILMASINDA BETON DAVRANIŞININ STATİK VE DİNAMİK YÜKLEME ALTINDA İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF CONCRETE BEHAVIOR IN THE MIXED-MODE (MODE I-II TRANSITION) FRACTURE OF FIBER-REINFORCED CONCRETES UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADING

A. Samet ARSLAN, Hüseyin KALKAN, Çağatay M. BELGİN, Youstra A. M. MUSTAFA ve
Yousef M. F. ALWINDAWI

ÖZET

Betonarme yapılarda betonun karışık modda (Mod-I çekme ve Mod-II kesme) kırılması yaygın bir durumdur ve bu davranışın doğru anlaşılması, güvenli tasarım açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, çelik lifle güçlendirilmiş betonların (SFRC) kırılma davranışı; farklı beton dayanımları (C40, C80, C120) ve dört farklı lif oranı (%0, %0.75, %1.50, %2.25) kullanılarak incelenmiştir. Toplamda 96 adet çentikli kiriş numunesi (70×140×550 mm) üzerinde üç noktali eğilme deneyleri gerçekleştirilmiş, numunelerin yarısı statik, diğer yarısı ise sabit enerji seviyeli impakt yüklemeye tabi tutulmuştur. Çentikler, kiriş ortasından mesnede doğru farklı konumlarda yerleştirilerek Mod-I'den Mod-II'ye geçiş davranışı araştırılmıştır. Deneylerde Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) yöntemi ile deformasyonlar belirlenmiştir. Ayrıca ivmeölçerler ve yüksek hızlı kamera kullanılarak çatlak ilerlemeleri ve dinamik davranış izlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, lif katkısı betonun kırılma tokluğunu ve enerji yutma kapasitesini önemli ölçüde artırmıştır. Beton dayanımının artmasıyla kırılma enerjisinde %62'ye, Mod-I gerilme yoğunluk faktöründe %25'e ve Mod-II'de %51'e varan artışlar gözlenmiştir. Statik yükleme altında, çentik kiriş ortasından uzaklaştıkça kırılma enerjisinin arttığı ve kırılma modunun saf Mod-I'den karışık moda (Mod-I + Mod-II) dönüştüğü belirlenmiştir. İmpakt yüklemelerde ise lif oranı, beton dayanımı ve çentik konumu arttıkça maksimum ivme ve enerji yutma kapasitesi artış göstermiştir. Ayrıca çentik mesafesi arttıkça çatlak uzunluğunun da büyüdüğü gözlenmiştir. Sonuç olarak, lif oranı, beton dayanımı ve çentik konumu; hem statik hem de dinamik yükler altında betonun kırılma davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Ancak çalışmada çatlak uzunluğunun yükde değişimi ve kırılma işlem bölgesinin detaylı analizi yapılmamıştır.

Anahtar Kelimeler: Çelik lifli betonlar, Karışık Mod Kırılma, Kırılma Enerjisi, Betonun Kırılma Mekaniği

ABSTRACT

Mixed-mode (Mode-I tensile and Mode-II shear) fracture is a common phenomenon in reinforced concrete structures, and understanding this behavior is critical for safe and accurate design. In this study, the fracture behavior of steel fiber reinforced concrete (SFRC) was

1 Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, Ankara, aarslan@gazi.edu.tr

2 Öğr. Gör. Dr., Gazi Üniversitesi, Ankara, hkalkan@gazi.edu.tr

3 Doç. Dr., Gazi Üniversitesi, Ankara, cmbelgin@gazi.edu.tr

4 Yük. Öğr., Gazi Üniversitesi, Ankara, abdyousra70@gmail.com

5 Yük. Öğr., Gazi Üniversitesi, Ankara, yusuf.windawee@gmail.com

investigated using three different concrete strength classes (C40, C80, and C120) and four steel fiber ratios (0%, 0.75%, 1.50%, and 2.25%). A total of 96 notched beam specimens (70 × 140 × 550 mm) were tested under three-point bending; half of the specimens were subjected to static loading, while the other half were tested under constant-energy impact loading. The notch positions were varied from the mid-span toward the support to examine the transition from Mode-I to Mode-II fracture behavior. During the experiments, deformations were measured using Digital Image Correlation (DIC), while accelerometers and a high-speed camera were employed to monitor crack propagation and dynamic response. The results showed that the addition of steel fibers significantly enhanced fracture toughness and energy absorption capacity. With increasing concrete strength, fracture energy increased by up to 62%, while the Mode-I stress intensity factor increased by 25% and Mode-II by 51%. Under static loading, it was observed that as the notch moved away from the mid-span, fracture energy increased and the fracture mode shifted from pure Mode-I to mixed-mode (Mode-I + Mode-II). Under impact loading, increases in fiber ratio, concrete strength, and notch distance led to higher maximum acceleration and greater energy absorption capacity. Additionally, crack length increased with increasing notch distance. In conclusion, fiber content, concrete strength, and notch position significantly influence the fracture behavior of concrete under both static and dynamic loading conditions. However, the variation of crack length with load and the detailed analysis of the fracture process zone were not addressed in this study.

Keywords: Steel Fiber Reinforced Concrete, Mixed-Mode Fracture, Fracture Energy, Fracture Mechanics of Concrete

GİRİŞ

Günümüzde beton, ekonomik, dayanıklı ve uzun ömürlü olması nedeniyle en yaygın kullanılan yapı malzemelerinden biridir. Uzun açıklıklı köprüler, yüksek yapılar, yeraltı sistemleri ve kritik altyapı projelerinde artan performans gereksinimleri; yüksek mukavemet, rijitlik, tokluk, süneklik ve dayanıklılık gibi gelişmiş mekanik özelliklere sahip malzemelere olan ihtiyacı artırmıştır. Bu doğrultuda geliştirilen ileri düzey malzemeler, geleneksel yapı malzemelerinden ayrılarak “yüksek performanslı malzemeler” olarak tanımlanmakta olup, özellikle süneklik önemli bir performans göstergesi olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, yapısal elemanların deprem, darbe ve patlama gibi dinamik yüklere maruz kalması durumunda, birleşik normal ve teğetsel gerilmeler altında çatlakların nasıl oluştuğu ve yayıldığına anlaşılmaması, yapısal bütünlüğün korunması açısından kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda, betonun dinamik karışık modlu kırılma davranışı; çatlak başlangıcı ve ilerlemesi mekanizmalarıyla birlikte detaylı olarak incelenmelidir. Bu tür bir anlayış, darbe dayanımı yüksek betonarme yapıların tasarlanması ve karmaşık yükleme koşulları altında malzeme performansının iyileştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Beton; çimento, agrega ve bu iki bileşen arasındaki arayüzlerden oluşan üç fazlı bir kompozit malzeme olup, özellikle çekme dayanımı, enerji yutma kapasitesi ve süneklik açısından sınırlı performans sergilemektedir. Betonun bu zayıf özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla lif katkısı yaygın olarak kullanılmakta ve bu sayede özellikle darbe dayanımı, eğilme ve çekme dayanımı, süneklik ve dayanıklılık gibi mekanik özelliklerde önemli gelişmeler sağlanmaktadır. Liflerin etkisi; malzeme türü, geometrisi ve oranına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Öte yandan, darbe yüklemeleri altında beton davranışının incelenmesi deneysel açıdan zor ve maliyetli olup, bu nedenle çekiç test düzenekleri gibi simülasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Darbe etkisi altında beton, eş zamanlı çekme ve kesme gerilmelerine maruz kalarak karışık mod (Mod-I ve Mod-II) kırılma davranışı sergilemektedir. Bu kırılma süreci; malzeme özellikleri, yükleme koşulları ve mikro yapı gibi birçok parametrenin etkisiyle oldukça karmaşık olup henüz tam olarak açıklığa kavuşturulamamıştır. Karışık mod kırılma mekanizmasının daha iyi anlaşılması, dinamik yüklere karşı daha dayanıklı, güvenli ve yüksek performanslı beton yapıların tasarlanmasına olanak sağlamaktadır.

Arslan ve Mütevellî Özkan (2017), kesme kırılması üzerine yaptıkları çalışmada tek çentikli beton kirişler kullanmış ve deneysel sonuçlara dayanarak çatlak oluşumunun temel nedeninin asal gerilmeler olduğunu, çatlakların ise bu gerilmelere dik yönde geliştiğini ifade etmişlerdir. Bazant ve arkadaşları (1986), karşılıklı iki çentikli kiriş elemanlar kullanılarak sınırlı bir kesme bölgesi elde etmiş ve çentik uçlarından başlayarak kirişin merkezinde birleşen kesme çatlaklarını gözlemlemişlerdir. Reinhardt ve arkadaşları (1989), kesme çatlaklarının en büyük asal gerilme kriterine göre değil, maksimum enerji yayılma yönüne bağlı olarak geliştiğini ortaya koymuşlardır. Kırılma mekaniği, malzemelerde bulunan çatlak ve boşluk gibi süreksizliklerin yükler altındaki davranışını ve kırılmaya yol açan hasar mekanizmalarını inceleyen bir disiplindir. Sorucu (2007), Doğrusal Elastik Kırılma Mekaniği (LEFM) ve Elastik-Plastik (Doğrusal Olmayan) Kırılma Mekaniği yaklaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır. Darbe yükleri altında beton davranışının incelenmesinde çeşitli deneysel yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan biri olan ağırlık düşürme testinde, belirli bir kütle numune üzerine serbest düşürülerek darbe direnci; ilk çatlak oluşumu veya nihai kırılmaya neden olan darbe sayısı ile tanımlanmaktadır. Bu yöntem; düşürülen kütlelerin özellikleri, düşme yüksekliği ve numune boyutuna bağlıdır. Ramakrishnan (1980), bu yöntemi çelik lif takviyeli betonun performansını değerlendirmek amacıyla kullanmıştır. Bhargava (1975), patlayıcı yükler ve yüksek hızlı görüntüleme teknikleri ile saf ve polimer modifiyeli betonun dinamik çatlama davranışını incelemiştir. Mayrhofer ve Thor (1982) ise patlama simülatörü kullanarak lifli ve lifsiz betonun dinamik tepkilerini araştırmıştır. Gopalratnam ve arkadaşları (1984) kullandıkları Charpy darbe testi, başlangıçta metal malzemeler için geliştirilmiş olup, sarkaç tipi bir çekicinin numuneye çarpması esasına dayanmaktadır. Bu testte darbe tokluğu, numunenin kırılması için gerekli toplam enerji ile ifade edilmekte ve bu enerji, çarpma sonrası sarkacın hareketi üzerinden hesaplanmaktadır. Johnston ve Krenchel (1974), bu yöntemi çelik lif takviyeli betonun enerji yutma kapasitesini değerlendirmek amacıyla kullanmışlardır. Ayrıca, Suaris ve Shah (1983) tarafından geliştirilen çekiç düşürme yöntemi ile normal ve lifli betonların darbe davranışı incelenmiş; Naaman ve arkadaşları (1983) ise bu yaklaşımı çelik lifli betonarme elemanların darbe etkisi altındaki performansını araştırmak için kullanmıştır.

METARYAL VE METOD

Bu çalışma kapsamında; beton dayanımı, lif oranı ve çentiğin merkezden uzaklığı temel değişkenler olarak ele alınmıştır. Geniş bir dayanım aralığını temsil edebilmek amacıyla üç farklı beton sınıfı (C40, C80 ve C120) seçilmiştir. Çelik lifler ise beton ağırlığının %, 0.75, %1.50 ve %2.25'i oranlarında, iki farklı tipte kullanılmıştır. Betonun kırılma davranışını farklı geometriler altında daha kapsamlı inceleyebilmek ve değerlendirmek amacıyla, numunelerde dört farklı konumda çentik oluşturulmuştur. Bu çentikler; kiriş açıklığının tam ortasında ve merkezden mesnete doğru sırasıyla 40 mm, 80 mm ve 120 mm uzaklıklarda yerleştirilmiştir. Kullanılan liflere ait özellikleri ilgili tabloda sunulmuştur. Mikro liflerin tercih edilmesinin temel nedeni, beton içerisinde oluşabilecek mikro çatlakların başlangıç ve yayılımını sınırlamaktır. Buna karşılık, makro lifler ise özellikle çatlak oluşumu sonrası ve kırılma sürecinde çatlak yüzeylerini köprüleyerek çekme dayanımını ve sünekliği artırmaları nedeniyle tercih edilmektedir.

Tablo 1. Kullanılan çelik liflerin fiziksel özellikleri

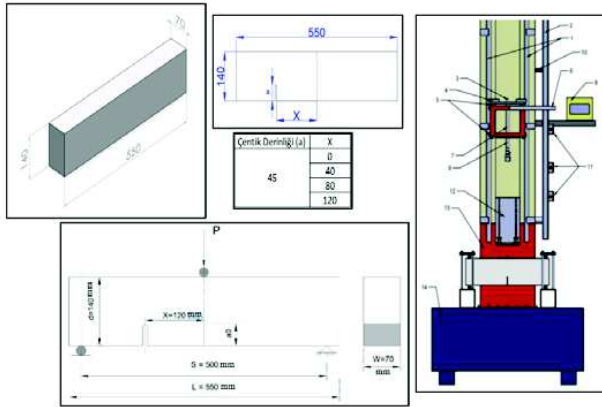
Lif Türü	Lif Boyu, l (mm)	Lif Çapı, d (mm)	Narinlik l/d	Çekme Dayanımı
Dramix Düz Lif	13	0.16	81.25	2600
Ucu Kancalı Lif	25	0.4	62.5	2900

Beton davranışını incelemek amacıyla üç farklı basınç dayanımı seviyesi belirlenmiştir. Bu kapsamda, biri yaklaşık 40 MPa hedef basınç dayanımına sahip normal dayanımlı beton, diğer ikisi ise 80 MPa ve 120 MPa hedef basınç dayanımlarına sahip yüksek dayanımlı beton olarak tasarlanmış ve üretilmiştir.

Numune Geometrisi, Statik ve Dinamik Deneysel Sistemleri

Statik davranışı incelemek için, Mod-I'den karışık moda geçişi değerlendirmek ve gerilme yığılmasının dağılım karakteristiğini analiz etmek amacıyla çentikli elemanlar üzerinde üç noktalı eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Buna bağlı olarak, çentik boyu, kiriş geometrisi ve yükleme düzenine ilişkin detaylar Şekil 1 de sunulmuştur.

Dinamik davranışı incelemek için; deney numunelerinin hazırlanmasını takiben, deney düzeneğinin kurulumu sistematik bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda; düşme yüksekliği, mesnet koşulları, ivmeölçerlerin seçimi ve deneyin kesintisiz ve güvenilir biçimde yürütülmesini sağlayacak tüm parametreler detaylı olarak belirlenmiştir. Deney süresince numunelerin davranışını yüksek doğrulukla gözlemleyebilmek amacıyla uygun aydınlatma koşulları sağlanmıştır. Deney sistemi, çarpma anında potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşümü esasına dayanmaktadır. Bu enerji dönüşümü, özellikle çentik uçlarında ani ve yüksek düzeyde gerilme yığılmalarına neden olarak kırılma sürecinin başlatılmasında belirleyici bir rol oynamaktadır.



Şekil 1. Numune geometrisi, açılan çentikler ve yükleme düzeneği

STATİK VE DİNAMİK DENEY BULGULARI

Statik deneylerde hedef basınç dayanımı 40 MPa olarak tasarlanan ve %1.5 lif içeriğine sahip kiriş numuneleri üzerinde farklı çentik konumlarının etkisi incelenmiştir. Çentik konumunun kiriş ortasında, merkezden 40 mm, 80 mm ve 120 mm mesafelerde olduğu numunelere ait yük-deplasman eğrileri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, maksimum yük değerleri sırasıyla 3.19 kN, 3.19 kN, 4.44 kN ve 7.25 kN olarak belirlenmiştir. Çentik mesafesinin artmasıyla birlikte maksimum yük kapasitesinde belirgin bir artış gözlenmiştir. Ayrıca tüm numunelerde, maksimum yük değerine ulaşıldıktan sonra yük taşımaya devam edildiği ve gevrek kırılma davranışı sergilenmediği tespit edilmiştir. Bu durum, lif katkısının süneklik ve enerji yutma kapasitesini artırıcı etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

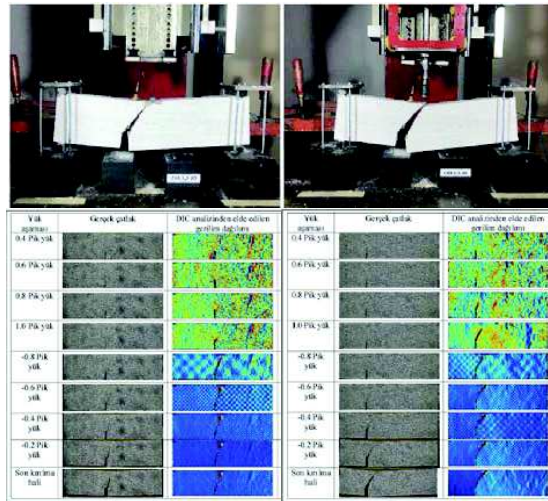
Dinamik deneylerde, hedef basınç dayanımı 40 MPa olan ve %1.5 oranında lif katkısı içeren kiriş numunelerinde çentik konumunun kırılma davranışına etkisi incelenmiştir. Çentiğin kiriş merkezinde olduğu numunede kırılma modu Mod-I olarak gözlenmiş ve çatlak, çentik doğrultusunda yaklaşık 90° açı ile ilerlemiştir. Çentiğin merkezden uzaklaştırıldığı numunelerde ise kırılma davranışının karışık moda dönüştüğü ve çatlak yörüngesi açılarının sırasıyla yaklaşık 70°, 52° ve 57° olduğu belirlenmiştir. Özellikle 120 mm çentik konumunda, lif katkısının etkisiyle çatlak yörüngesinde çatallanma meydana geldiği gözlenmiştir. Tüm numunelerde kırılma için iki darbe uygulanmış olup, lif katkısının beton matrisini güçlendirdiği ve kırılma davranışını gevrekten yarı gevrek (sünekleşmiş) bir karaktere dönüştürdüğü tespit edilmiştir. Deney sonuçları; hasar durumu, ivme-zaman, çarpma yükü-zaman ve yük-deplasman ilişkileri üzerinden değerlendirilmiş olup, lif katkısı ve çentik konumunun kırılma modu, çatlak ilerleme yönü ve süneklik üzerinde belirleyici etkileri olduğu ortaya konmuştur.

C40 sınıfı beton kirişler üzerinde statik deneyler sonucunda yapılan analizler, lif katkı oranındaki artışın malzemenin kırılma mekaniği parametrelerini dramatik ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir; nitekim lif oranının %0'dan %2.25'e çıkarılması, enerji yutma kapasitesini (Gf) yaklaşık 40 kat artırırken, Mod-I (K_{II}) ve Mod-II (K_{II}) gerilme yoğunluk faktörlerinde sırasıyla %70 ve %47 oranında bir yükselme sağlamıştır. Çentik konumu ile lif oranı arasındaki etkileşim



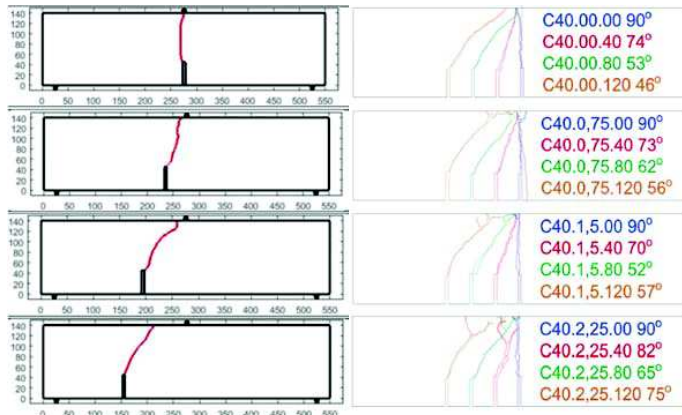
Şekil 2. Statik ve Dinamik deney görselleri

incelendiğinde, düşük lif oranlarında çentiğin merkezden uzaklaşması enerji yutma kapasitesini %50'ye varan oranlarda düşürürken, yüksek lif oranlarında bu durumun tersine dönerek kapasitede artış sağladığı ve lif takviyesinin betonun çatlak ilerlemesine karşı direncini hem eğilme hem de kesme zorlanmalarında önemli ölçüde optimize ettiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 3. Deney sonu görselleri

C40 sınıfı beton kirişler üzerinde gerçekleştirilen dinamik deneysel çalışmalar sonucunda; lif oranı, çentik konumu ve basınç dayanımının malzemenin kırılma mekaniği ile enerji sönümlenme kapasitesi etkilediği, beton karışımındaki lif oranının artışı ve çentiğin kiriş merkezinden uzaklaşması, hem maksimum ivme değerlerini hem de enerji emme kapasitesini arttırdığı ve özellikle çentiğin 120 mm merkezden uzaklaşmasıyla karmaşık modlu kırılma mekanizması tetiklenerek enerji emiliminde %79'luk bir iyileşme sağlanmaktadır. Lif takviyesi, çatlak yörüngesinin kararlılığını etkileyerek ana çatlak çevresinde dallanmalara ve mikro çatlak oluşumlarına sebebiyet vermekte, bu da çatlağın yatay eksenle yaptığı açığı büyütürken kırılma tokluğuna katkıda bulunmaktadır. Sonuç olarak, C40 betonunda enerji emme kapasitesini ve çatlak morfolojisini optimize eden en baskın değişkenlerin sırasıyla çentik uzaklığı, lif oranı ve basınç dayanımı olduğu; asimetric yükleme koşullarının Mod-II/Mod-I oranını değiştirerek numuneyi basit eğilme çatlağından daha dirençli bir karmaşık mod kırılmasına sevk ettiği tespit edilmiştir.



Şekil 4. Deney sonu statik ve dinamik kırılma yörüngeleri

SONUÇ

Kirişlerin statik ve dinamik davranışını belirleyen temel parametrelerin lif oranı, çentik konumu ve basınç dayanımı olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen veriler, beton matrisindeki lif takviyesinin artırılmasının ve matris dayanımının yükseltilmesinin, malzemenin darbe direncini ve enerji sönmüleme kapasitesini doğrudan iyileştirdiğini göstermektedir. Özellikle çentiğin orta açıklıktan mesnetlere doğru kaydırılmasıyla değişen yükleme geometrisi, çatlak yörüngesinin uzamasına ve dolayısıyla enerji yutma kapasitesinde belirgin bir artışa yol açmıştır. Sonuç olarak; ivme-zaman ölçümleriyle desteklenen bu bulgular, lifli betonun, lifli betonun darbe etkileri altındaki yapısal bütünlüğünü korumada yüksek performans sergilediğini ve asimetrik çentik konfigürasyonlarının karmaşık modlu kırılma mekanizmalarını tetikleyerek enerji absorpsiyonunu maksimize ettiğini ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

- Arslan, A., (1995) Mixed-mode fracture performance of fibre reinforced concrete under impact loading, *Materials and Structures*, Vol. 28, pp. 473-478
- Arslan, A. and Mütevellı, I. (2017). A study on effect of micro fiber ratios on shear fracture of high performance concrete. *2nd International Conference on Civil and Environmental Engineering*, Nevşehir, 3660-3673
- Bazant, Z. P. and Pfeiffer, P. A. (1986). Shear fracture tests of concrete. *Materials and Structures*, 19, 111–121
- Sorucu, A. (2007). The determination of crack propagation and fracture toughness in orthotropic materials, Master Thesis, *Dokuz Eylül University, Institute of Science and Technology*, İzmir, 26-32
- Reinhardt, H. W., Cornelissen, H. A. W. and Hordijk, D. A. (1989). Mixed mode fracture tests on concrete. In S.P. Shah and S.E. Swartz (Eds.), *Fracture of concrete and rock*. New York, Springer, 117-130
- Ramakrishnan, V., Brandshaug, T., Coyle, W. V. and Schrader, E. K. (1980). A comparative evaluation of concrete reinforced with straight steel fibers and fibers with deformed ends glued together into bundles. *Journal Proceedings*, 77(3), 135-143
- Bhargava, J. and Rehnström, Å. (1975). High-speed photography for fracture studies of concrete. *Cement and Concrete Research*, 5(3), 239-247
- Mayerhofer, C. and Thor, H. J. (1982). Dynamic response of fibre and steel reinforced concrete plates under simulated blast-load. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 5(3), 140-147
- Gopalaratnam, V. S., Shah, S. P. and John, R. (1984). A modified instrumented Charpy test for cement-based composites. *Experimental Mechanics*, 24, 102-111
- Johnston, C. D. (1974). Steel fiber reinforced mortar and concrete: a review of mechanical properties. *Special Publication*, 44, 127-142
- Suaris, W. and Shah, S. P. (1983). Properties of concrete subjected to impact. *Journal of Structural Engineering*, 109(7), 1727-1741
- Naaman, A. E. and Gopalaratnam, V. S. (1983). Impact properties of steel fibre reinforced concrete in bending. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 5(4), 225-233

KOROZYONA MARUZ BIRAKILMIŞ HİBRİT FRP-ÇELİK DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞI

BENDING BEHAVIOR OF CORRODED HYBRID FRP-STEEL RC BEAMS

Hayrettin KARACA¹, Saruhan KARTAL², Handan ADIBELLİ³, İlker KALKAN⁴

ÖZET

Bu çalışmada, hızlandırılmış korozyon etkisine maruz kalan hibrit Cam Lifli Polimer (GFRP)-çelik donatılı betonarme kirişlerin eğilme performansı deneysel olarak incelenmiştir. Araştırma kapsamında, korozyonun taşıma kapasitesi, süneklik ve enerji sönümleme kapasitesi gibi kritik yapısal performans parametreleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla farklı donatı konfigürasyonlarına sahip toplam 10 adet kiriş numunesi üretilmiştir. Deney programı; referans (korozyonsuz), %10 ve %20 hedef korozyon oranlarına tabi tutulmuş salt çelik donatılı, salt GFRP donatılı ve hibrit donatılı kiriş elemanlarını kapsamaktadır. Korozyon süreci elektrokimyasal yöntemle gerçekleştirilmiş, ardından tüm numuneler iki noktalı yükleme altında eğilme testine tabi tutulmuştur. Elde edilen deneysel bulgular, korozyon oranındaki artışın tüm kiriş tiplerinde yapısal performans kaybına yol açtığını, ancak bu kaybın şiddetinin donatı düzenine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermiştir. Korozyondan en çok salt çelik donatılı kirişler etkilenmiştir. Salt çelik donatılı kirişlerde artan korozyon etkisiyle; yük kapasitesi düşmüş ve gevrek adersan kırılması meydana gelmiştir. Buna karşın hibrit donatılı kirişlerde, çelik donatıların korozyondan etkilenmesine rağmen korozyon dayanımı yüksek GFRP donatıların katkısıyla, kapasite kayıpları sınırlanmış ve korozyonsuz numunelerde gözlemlenene çok benzer ve daha kontrollü bir göçme davranışı tespit edilmiştir. Analizler sonucunda, hibrit konfigürasyonların korozyon altında taşıma gücü ve enerji sönümleme kapasitesini daha yüksek seviyede koruduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit donatı, GFRP, Korozyon, Eğilme davranışı, Süneklik

ABSTRACT

At the present study, the flexural performance of hybrid Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)-steel reinforced concrete beams exposed to accelerated corrosion was experimentally investigated. Within the scope of the research, a total of 10 beam specimens with different reinforcement configurations were produced to determine the effects of corrosion on critical structural performance parameters such as load-carrying capacity, ductility and energy dissipation capacity. The experimental program includes reference (un-corroded), 10%, and 20% target corrosion levels for only steel-reinforced, only GFRP-reinforced, and hybrid-reinforced beams. The corrosion process was carried out using the electrochemical method, followed by subjecting all specimens to flexural testing under two-point loading. The experimental findings demonstrated that an increase in the corrosion rate led to a loss of structural performance in all beam types; however, the severity of this degradation varied significantly depending on the reinforcement layout. Only steel-reinforced beams were the most adversely affected by corrosion. In these specimens, increasing corrosion levels resulted in a reduction in load capacity and the occurrence of brittle bond failure. In contrast, although the steel reinforcements in hybrid-reinforced beams were affected by corrosion, capacity losses were limited due to the contribution of corrosion-resistant GFRP bars. Furthermore, a more controlled failure behavior, highly similar to that observed in un-corroded specimens, was identified in the hybrid beams. Consequently, the analysis revealed that hybrid configurations maintain higher levels of load-carrying capacity and energy dissipation capacity under corrosive conditions.

Keywords: Hybrid reinforcement, GFRP, Corrosion, Flexural behavior, Ductility

¹ Arş. Gör. Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, Yozgat, hayrettin.karaca@yobu.edu.tr

² Doç. Dr., Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, saruhankartal@kku.edu.tr

³ Dr. Öğr. Üyesi, Yozgat Bozok Üniversitesi, Yozgat, handan.adibelli@bozok.edu.tr

⁴ Prof. Dr., Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, ilkerkalkan@kku.edu.tr

GİRİŞ

Betonarme yapıların servis ömürlerini tehdit eden en kritik durabilite sorunu olan donatı korozyonu, klorür saldırısı veya karbonatlaşma neticesinde betonun pH seviyesinin 9,5 eşik değerinin altına düşmesiyle tetiklenmektedir. Bu süreçte oluşan korozyon ürünlerinin (pas) yol açtığı hacimsel genişleme, beton içerisinde iç basınç oluşturarak mikro çatlaklara, beton örtüsünün dökülmesine ve donatı-beton aderansının yitirilmesine neden olmaktadır (Bohni, 2005; Huang vd., 1997). Korozyonun maliyeti sadece teknik bir problem değil, aynı zamanda küresel bir finansal yüküdür. ABD Federal Karayolu İdaresi (FHWA) verilerine göre, altyapı sektöründeki yıllık korozyon maliyeti 22,6 milyar dolara ulaşmakta ve bu bedelin %37'si doğrudan karayolu köprülerindeki hasarlardan kaynaklanmaktadır (Koch vd., 2002). Bu durum, donatının akma kapasitesini düşürerek süneklik ve rijitlik performansını zayıflatmakta, yapıları gevrek göçme riskiyle karşı karşıya bırakmaktadır (Apostolopoulos vd., 2006; Yalciner vd., 2020).

Korozyon riskine karşı Cam Elyaf Takviyeli Polimer (GFRP) donatılar; yüksek korozyon direnci, çekme dayanımı ve hafiflikleri ile sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır. Ancak GFRP donatıların düşük elastisite modülleri ve gevrek kopma karakteristiği, yapısal süneklik beklentilerini karşılamakta yetersiz kalmaktadır (Shin vd., 2009; Yang vd., 2017). Bu zıt özellikleri optimize etmek amacıyla geliştirilen "hibrit GFRP-çelik" donatılı sistemlerde; çelik bileşen rijitlik, süneklik ve çatlak kontrolüne katkı sağlarken, GFRP bileşen korozyon direnci ve nihai yük kapasitesini korumaktadır (Pang vd., 2016; El Refai vd., 2015). Literatürdeki çalışmalar, hibrit donatı kullanımının yapısal performansı çok yönlü iyileştirdiğini göstermektedir. Pang vd. (2016), uygun donatı oranları seçildiğinde hibrit kirişlerin sünek bir davranış sergilediğini ifade etmiştir. Hibrit sistemlerin mekanik davranışı ve analitik modellenmesi üzerine Kartal vd. (2021, 2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar; bu kirişler için enerji tabanlı süneklik yaklaşımları geliştirmiş ve sekant modülü kullanımının sehim tahminlerindeki doğruluğunu kanıtlamıştır. Buna karşın, mevcut modeller korozyonsuz koşullar için geçerlidir. Hibrit sistemlerin korozyon etkisi altındaki performansına dair literatürde ulaşılan nadir çalışmalardan biri olan T. H. Nguyen vd. (2024), korozyonlu hibrit kirişlerdeki GFRP donatının katkısıyla yük taşıma kapasitesini salt çelik donatılı kirişlere göre iyileştirdiğini göstermiştir.

Doğal korozyon sürecinin laboratuvar ortamında simüle edilmesi, performans bozulmalarının öngörülebilirliği açısından stratejik öneme sahiptir. Bu bağlamda hızlandırılmış korozyon testleri, korozyon oranındaki artışın moment kapasitesi ve süneklik üzerindeki yıkıcı etkilerini analiz etmek için vazgeçilmez bir metodolojidir (Yalciner vd., 2020; Azad vd., 2007; Jung vd., 2019). Literatürde hibrit sistemlerin korozyonsuz durumdaki mekanik davranışı geniş ölçüde yer alsa da, bu sistemlerin korozyon etkisi altındaki yapısal tepkilerine dair veriler oldukça kısıtlıdır. Bu çalışma, özellikle farklı hibrit konfigürasyonların artan korozyon seviyeleri karşısındaki performans hiyerarşisini doğrudan karşılaştırmalı olarak ele alması bakımından literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Bu motivasyonla planlanan çalışmada; salt çelik, salt GFRP ve iki farklı hibrit düzende olmak üzere toplam 10 adet tam ölçekli betonarme kiriş üretilmiş, bunlardan dokuzu hızlandırılmış korozyon testine (%10 ve %20 hedefli) tabi tutulduktan sonra eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Kirişlerin yük-deplasman ilişkileri, göçme modları, yük taşıma kapasiteleri ve süneklik düzeyleri analiz edilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

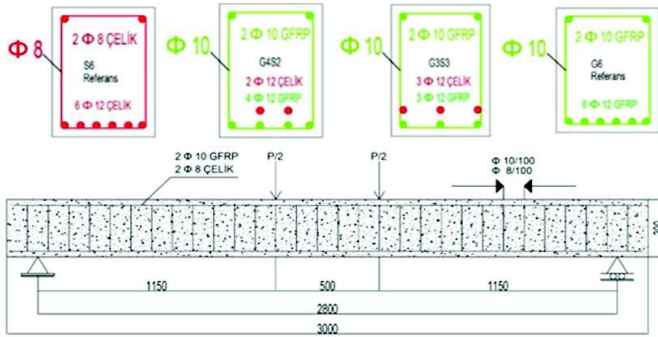
Deneysel Çalışma

Bu çalışmada; korozyon hasarının farklı donatı konfigürasyonları üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla, tamamı $220 \times 300 \times 3000$ mm boyutlarında toplam 10 adet yarım ölçekli betonarme kiriş üretilmiştir. Deneysel program kapsamında; salt çelik (S6) ve iki farklı hibrit düzende (G3S3 ve G4S2) grupların her birinden, aynı kesit özelliklerine sahip 3'er adet numune hazırlanmıştır. Bu grupların kendi içindeki dağılımı; bir adet korozyonsuz referans, bir adet %10 hedefli ve bir adet %20 hedefli hızlandırılmış korozyon numunesi şeklinde yapılandırılmıştır. Söz konusu 9 kirişe ek

olarak, 1 adet salt GFRP donatılı kiriş korozyonsuz referans eleman olarak üretilerek deney setine dahil edilmiştir.

Tüm deney elemanlarının çekme bölgesinde Ø12 mm toplam 6 adet boyuna donatı kullanılmıştır. Salt çelik (S6) ve salt GFRP donatılı kirişlerde pas payı 25 mm olarak belirlenmiş ve donatılar dış katmanda konumlandırılmıştır. Hibrit konfigürasyonlarda (G3S3 ve G4S2) ise korozyon etkisini minimize etmek amacıyla çelik donatıların iç katmanda (50 mm paspayı), GFRP donatıların ise dış katmanda yerleştirildiği tasarım felsefesi benimsenmiştir. Etriye olarak; salt çelik kirişlerde Ø8/100 mm aralıklı çelik etriyeler kullanılırken, salt GFRP ve hibrit kirişlerde fabrikasyon üretimi Ø10/100 mm aralıklı GFRP etriyeler tercih edilmiştir. Numune isimlendirme sisteminde kullanılan G ve S harfleri sırasıyla GFRP ve çelik donatı tiplerini temsil etmekte, harflerin hemen ardından gelen rakamlar ise çekme bölgesinde kullanılan ilgili donatı tipinin adet miktarını ifade etmektedir. Kirişlerin En kesit ve boy kesit detayları Şekil 1’de verilmiştir.

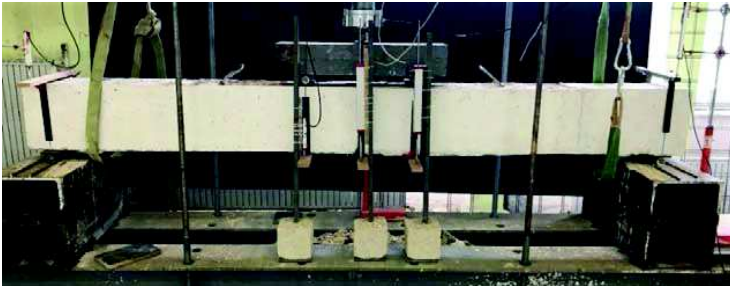
Beton basınç dayanımının tespiti için döküm esnasında alınan 25 adet 150 × 150 × 150 mm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde yapılan aksenal basınç testleri neticesinde, ortalama basınç dayanımı 30 MPa olarak belirlenmiştir. Boyuna donatıların mekanik özelliklerini belirlemek üzere gerçekleştirilen çekme testlerinde; Ø12 çelik donatıların ortalama akma dayanımı 525,33 MPa, ortalama çekme dayanımı ise 636 MPa olarak ölçülmüştür. Aynı çap değerine sahip (Ø12) GFRP donatılar üzerinde gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda ise ortalama çekme dayanımı 919,33 MPa ve elastisite modülü yaklaşık 55 GPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 1. Kirişlerin En kesit ve boy kesit detayları

Test Düzenegi

Tüm testler, Kırıkkale Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı’nda bulunan çelik deney çerçevesi üzerinde, iki noktalı yükleme konfigürasyonunda icra edilmiştir. Basit mesnetli olarak tasarlanan tüm kirişlerde yük, açıklık ortasına 250 mm mesafedeki iki noktadan uygulanmıştır. Deneysel verilerin hassasiyetle kaydedilmesi için 25 ton kapasiteli bir yük hücresi, 6 adet potansiyometre ve bir data logger kullanılmıştır. Potansiyometrelerin ikisi kiriş orta kesitinin ön ve arka yüzlerine yerleştirilmiştir. Diğerleri ise yük uygulama noktalarının hemen altına ve mesnet noktalarına konumlandırılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Eğilme test ve ölçüm düzenegi

Kirişlerde hedeflenen korozyon seviyelerine ulaşmak amacıyla laboratuvar ortamında elektro-kimyasal bir korozyon havuzu oluşturulmuştur. Deney düzeneğinde, 30V/5A kapasiteli ayarlanabilir DC güç kaynakları kullanılarak elektro-kimyasal devre tamamlanmıştır. Bu sistemde, korozyon sürecini başlatmak için donatı iskeletinden geçirilen bakır kablolar aracılığıyla çelik donatılar anot (pozitif kutup), havuz içerisine yerleştirilen bakır levhalar ise katot (negatif kutup) olarak işlev görmüştür. Elektrolit ortamı sağlamak adına havuz, ağırlıkça %5 oranında NaCl içeren su ile doldurulmuş; numunelerin zeminle teması takozlar vasıtasıyla kesilerek çözeltinin kiriş yüzeyine tam nüfuz etmesi sağlanmıştır.

Teorik kütle kaybı hesaplamalarında, betonun elektriksel direncini ve fiziksel özelliklerini dikkate alan, deneysel doğrulama temelli Yalciner vd. (2012) tarafından önerilen modifiye edilmiş yaklaşımdan yararlanılmıştır. Elde edilen kütle kaybı verileri Faraday Kanunu'na uyarlanarak, her bir numune grubu için hedeflenen %10 ve %20 korozyon oranlarına ulaşmak için gerekli süreler belirlenmiştir. Bu doğrultuda numuneler, 5 Amper sabit akım altında hesaplanan gün süresi boyunca kesintisiz olarak elektriksel yüklemeye maruz bırakılmıştır.



Şekil 3. Hızlandırılmış korozyon test düzeneği

TARTIŞMA VE BULGULAR

Hızlandırılmış korozyon süreci sonunda hedeflenen kütle kaybı oranlarına ne derece ulaşıldığını belirlemek amacıyla, eğilme testleri tamamlanan kirişler hilti yardımıyla kırılmış ve çelik donatılar beton bünyesinden çıkarılmıştır. Donatı yüzeylerinde biriken beton kalıntıları ve korozyon ürünlerinin (pas) ölçüm hassasiyetini etkilememesi için numuneler önce mekanik, ardından standartlara uygun kimyasal temizleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Temizlenen donatıların hassas terazi ile tartılması sonucunda her bir kiriş için gerçek korozyon oranları hesaplanmıştır (Tablo 1). Hedeflenen ve gerçekleşen kütle kaybı değerleri karşılaştırıldığında, genel olarak hızlandırılmış korozyon testinin başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 1. Gerçek korozyon yüzdeleri

Kirişler	%10 hedefi için gerçek korozyon yüzdeleri (%)	%20 hedefi için gerçek korozyon yüzdeleri (%)
G4S2	8.12	17.03
G3S3	3.67	19.23
S6	15.05	18.7

Testlerden elde edilen yük-deplasman eğrileri Şekil 4'te ve karakteristik kırılma modları Şekil 5'te; maksimum yük kapasiteleri, enerji sönümlenme kapasiteleri ve süneklik değerleri ise Tablo 2'de sunulmuştur. Tüm deney elemanlarının eğilme kapasitelerine ulaştığı görülmüştür. Korozyonsuz referans numunesi olan S6, klasik denge altı donatılı davranışı sergileyerek beklenen deformasyon kabiliyetini göstermiştir. Ancak korozyon oranının %15.05'e yükselmesiyle birlikte yük kapasitesinde kısmi bir azalma meydana gelmiş, aderans çatlakları korozyon etkisiyle daha belirgin

hale gelse de sünek davranış hakimiyeti devam etmiştir. Korozyon oranının %18,70 seviyesine ulaştığı numunede ise kapasite kaybı artmış; çelik donatının akmasından hemen sonra korozyon kaynaklı aderans kaybının tetiklediği gevrek bir kesme kırılması gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek korozyon seviyelerindeki salt çelik donatılı kirişlerin süneklik kapasitelerinin önemli ölçüde azalışını göstermektedir. Hibrit donatılı G3S3 serisinde, çelik donatıların iç katmanda konumlandırılmasının korozyon direncine katkısı gözlemlenmiştir. %3.67 korozyon oranına sahip numunede sadece aderans çatlakları belirginleşirken; korozyon oranının %19.23'e çıktığı numunede aderans ve kesme çatlaklarının birleşmesiyle beton ezilmesi meydana gelmiş, ayrıca yaklaşık 120 kN yük seviyesinde çelik donatıda kopma meydana gelmiştir. Benzer şekilde, G4S2 serisinde %8.12 korozyonlu numunede 130 kN civarında çelik donatıda kopma gerçekleşirken; %17.03 korozyonlu numunede taşıma gücü anında belirginleşen aderans çatlakları kesme çatlaklarıyla birleşmiş ve betonun da aynı anda ezildiği bir hasar mekanizması oluşmuştur. Salt GFRP donatılı G6 kirişinde ise, nihai eğilme kapasitesine ulaştığı anda aderans çatlaklarının kesme çatlakları ile etkileşime girdiği bir eğilme-kesme kırılma modu meydana gelmiştir.

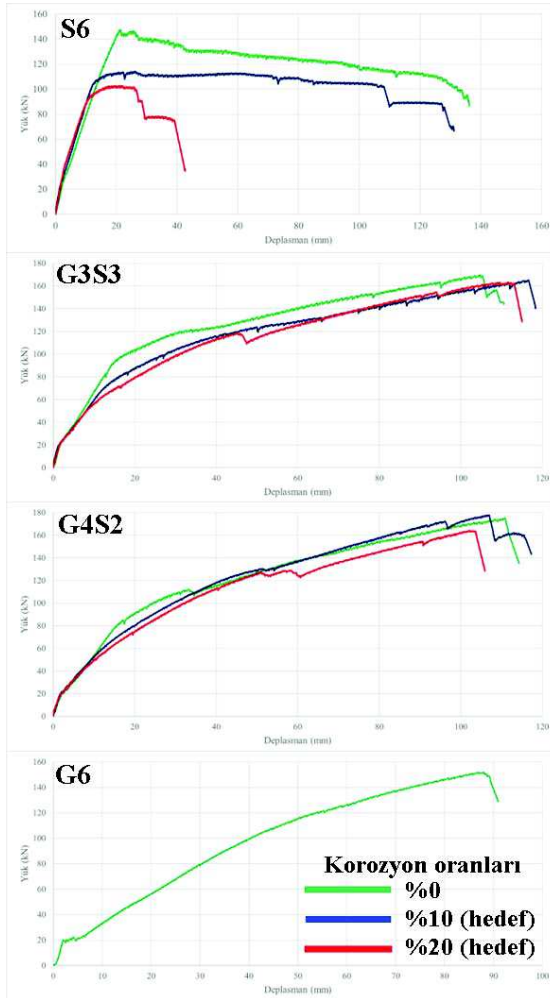
Tüm deney elemanlarının yük-deformasyon eğrileri incelendiğinde; hibrit donatılı G4S2 ve G3S3 elemanlarının karakteristik davranışlarının korozyon artışından belirgin düzeyde etkilenmediği görülmüştür. Bu durumun, korozyon etkisi altındaki çelik donatıların kesit içerisinde iç katmanda konumlandırılmasından ve korozyona uğramayan GFRP donatıların yapısal bütünlüğü korumaya devam etmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Buna karşın S6 numunelerinin korozyondan en çok etkilenen deney grubu olduğu açıktır (Şekil 4-5). Elde edilen bu bulgular; hibrit tasarım felsefesinin, korozyonun tetiklediği kapasite kayıplarını sınırlandırmada ve yapısal performansı sürdürülebilir kılmada salt çelik sistemlere kıyasla daha üstün bir performans sergilediğini açıkça ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada; hibrit donatılı kirişlerin süneklik performansını; salt çelik ve salt GFRP donatılı numunelerle rasyonel bir zeminde kıyaslayabilmek amacıyla Kartal (2020) tarafından önerilen enerji esaslı süneklik tanımı benimsenmiştir. Bu yaklaşımda süneklik, sistemin deformasyon kapasitesinin bir göstergesi olarak tüketilen toplam enerjinin, tüketilen elastik enerjiye oranına bağlı olarak hesaplanmıştır. Hem enerji sönümlenme kapasitesi hem de süneklik analizlerinde, toplam enerji miktarının belirlenmesinde yük-deplasman eğrilerinde maksimum yükün %85'ine düşüldüğü nokta sınır kabul edilmiştir.

Tablo 2 verileri korozyon hasarının yapısal performans üzerindeki etkileri açısından incelendiğinde; korozyonla birlikte hibrit donatılı kirişlerin yük taşıma kapasitesinde meydana gelen kayıp maksimum yaklaşık %6 seviyesinde kaldığı, buna karşın salt çelik donatılı (S6) kirişlerde bu durumun maksimum yaklaşık %30 mertebesine ulaştığı saptanmıştır. Sayısal sonuçlar, hibrit donatı düzeninin korozyon etkisinde kesit kaybı ve taşıma gücündeki azalmayı engellemedeki başarısını teyit etmektedir. Süneklik performansına yönelik analizlerde; korozyonsuz referans elemanlar arasında en yüksek süneklik değerlerinin salt çelik donatılı kirişlerde, en düşük değerlerin ise salt GFRP donatılı kirişte gözlemlendiği; hibrit kirişlerin ise literatürdeki Kartal (2020) bulgularıyla uyumlu olarak ara değerler aldığı tespit edilmiştir. Ancak korozyon etkisiyle meydana gelen süneklik değişimleri korozyonsuz numunelerle kıyaslandığında; salt çelik donatılı kirişlerde yaklaşık %71 oranında dramatik bir kayıp yaşanırken, hibrit kirişlerde bu kayıp maksimum yaklaşık %20 ile sınırlı kalmıştır. %20 hedefli korozyon seviyesindeki tüm numuneler ve salt GFRP donatılı G6 referans kirişi karşılaştırıldığında, korozyon hasarı altındaki S6 numunesinin süneklik performansının hibrit donatılı kirişlerin seviyesine kadar gerilediği belirlenmiştir. Enerji sönümlenme kapasiteleri bakımından da benzer bir eğilim gözlemlenmiştir. Korozyonsuz durumda en yüksek enerji tüketimi S6 numunelerinde, en düşük tüketim ise G6 numunelerinde gerçekleşmiş; hibrit numuneler yine ara değerlerde konumlanmıştır (Kartal, 2020). Korozyon etkisi dahil edildiğinde ise enerji sönümlenme kapasitesindeki azalış salt çelik elemanlarda maksimum yaklaşık %70'e ulaşırken, hibrit kirişlerde maksimum yaklaşık %20 düzeyinde seyretmiştir. Özellikle %20 korozyon hedefindeki tüm numuneler ve G6 kirişi bir arada değerlendirildiğinde, en yüksek enerji sönümlenme kapasitesini G3S3 kirişinin sergilediği saptanmıştır. Dikkat çekici bir diğer bulgu ise, ağır korozyon hasarı altındaki S6 kirişinin enerji sönümlenme kapasitesinin, salt GFRP donatılı G6 kirişininin yaklaşık yarısının bile altında kaldığının tespit edilmiş olmasıdır. İşte elde edilen tüm bu bulgular, korozyon riski altındaki yapılar için hibrit kiriş tasarımının kritik önemine işaret etmektedir.

Tablo 2. Kirişlerin kırılma modları, süneklikleri, yük ve enerji sönmüleme kapasiteleri

Kirişler	Korozyon (%)	Kırılma modları	Pmax (kN)	Et (kJ)	μ
S6	0	Eğilme	147.44	7.11	6.41
S6	15.05	Eğilme ve Aderans çatlakları	114.20	6.99	6.3
S6	18.70	Eğilme ve Aderans kaynaklı kesme	102.72	2.07	1.86
G3S3	0	Eğilme	169.57	7.16	2.15
G3S3	3.67	Eğilme ve Aderans çatlakları	165.15	6.02	1.81
G3S3	19.23	Eğilme ve Aderans kaynaklı kesme	163.21	5.69	1.71
G4S2	0	Eğilme	174.98	6.86	1.52
G4S2	8.12	Eğilme	177.73	6.21	1.38
G4S2	17.03	Eğilme ve Aderans kaynaklı kesme	164.08	5.52	1.22
G6	0	Eğilme ve Aderans kaynaklı kesme	151.73	5.47	1.31



Şekil 4. Deney elemanlarının yük deformasyon eğrileri



Şekil 5. Deney elemanlarının kırılma modları

SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel analizler neticesinde elde edilen temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Korozyon etkisiyle salt çelik donatılı kirişlerde yük taşıma kapasitesinde yaklaşık %30 mertebesinde kayıplar yaşanırken, hibrit donatılı kirişlerde bu kayıp maksimum yaklaşık %6 seviyesinde kalarak yapısal kararlılık korunmuştur.
- Salt çelik donatılı kirişlerde korozyon kaynaklı süneklik ve enerji sönümlenme kaybı yaklaşık %70-71 seviyelerine ulaşırken, hibrit kirişlerde bu performans kaybı maksimum yaklaşık %20 ile sınırlanmıştır.
- Korozyon artışıyla birlikte salt çelik kirişlerde gevrek bir aderans kırılması gözlemlenirken; hibrit kirişlerde çelik donatıların iç katmanda korunması ve korozyon direnci yüksek GFRP donatıların varlığı sayesinde daha kontrollü bir hasar mekanizması elde edilmiştir.
- Yüksek korozyon altındaki S6 kirişinin enerji sönümlenme kapasitesinin, G6 (salt GFRP) kirişinin yaklaşık yarısının bile altına düşmesi dikkat çekicidir.

KAYNAKLAR

- Apostolopoulos CA, Papadopoulos MP, Pantelakis SG (2006) “Tensile behavior of corroded reinforcing steel bars BSt 500s”, *Construction and Building Materials*, 20(9), 782–789.
- Azad AK, Ahmad S, Azher SA (2007) “Residual Strength of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams”, *ACI Materials Journal*, 104(1), 40–47.
- Bohni H (2005) “Corrosion in reinforced concrete structures”, *Woodhead Publishing Limited*, Abington Hall, Abington, Cambridge.
- El Refai A, Abed F, Al-Rahmani A (2015) “Structural performance and serviceability of concrete beams reinforced with hybrid (GFRP and steel) bars”, *Construction and Building Materials*, 96, 518–529.
- Huang R, Yang CC (1997) “Condition assessment of reinforced concrete beams relative to reinforcement corrosion”, *Cement and Concrete Composites*, 19(2), 131–137.
- Jung JS, Lee BY, Lee KS (2019) “Experimental Study on the Structural Performance Degradation of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams”, *Advances in Civil Engineering*, 2019(1), 1–14.
- Kartal S (2020) Lifli Polimer Donatı Oranının Hibrit FRP-Çelik Donatılı Beton Kirişlerin Eğilme Davranışı Üzerindeki Etkileri, Ph.D. Thesis, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.
- Kartal S, Kalkan I, Beycioglu A, Dobiszewska M (2021) “Load-Deflection Behavior of Over- and Under-Reinforced Concrete Beams with Hybrid FRP-Steel Reinforcements”, *Materials*, 14(18), 5341.
- Kartal S, Kalkan I, Mertol HC, Baran E (2023) “Influence of the proportion of FRP to steel reinforcement on the strength and ductility of hybrid reinforced concrete beams”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 27(12), 3546–3565.
- Koch GH, Brongers MPH, Thompson NG, Virmani YP, Payer JH (2002) “Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States”, *FHWA-RD-01-156*, Federal Highway Administration, USA.
- Nguyen TH, Nguyen VT, Phan MT (2024) “Experimental study on the flexural behaviour of corroded concrete beams reinforced with hybrid steel/GFRP bars”, *Structure and Infrastructure Engineering*, 20(6), 834–845.
- Pang L, Qu w, Zhu P, Xu J (2016) “Design Propositions for Hybrid FRP-Steel Reinforced Concrete Beams”, *Journal of Composites for Construction*, 20(4), 04015082.
- Shin S, Seo D, Han B (2009) “Performance of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars”, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 8(1), 197–204.
- Yalciner H, Eren O, Sensoy S (2012) “An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete cover, strength and corrosion level”, *Cement and Concrete Research*, 42(5), 643–655.
- Yalciner H, Kumbasaroglu A, El-Sayed AK, Balkıs AP, Dogru E, Turan AI, Karimi A, Kohistani R, Mermit MF, Bicer K (2020) “Flexural Strength of Corroded Reinforced Concrete Beams”, *ACI Structural Journal*, 117(1), 29–41.
- Yang W, He X, Dai L (2017) “Damage behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars”, *Composite Structures*, 161, 173–186.

KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ EPOKSİNİN DENİZ SUYUNA MARUZ GFRP SARGILI BETONUN DAVRANIŞINA ETKİSİ

Effect of Carbon Nanotube Modified Epoxy on The Behavior of GFRP-Confined Concrete Exposed to Seawater

Ahmed Adan MOHAMUD¹, Emre AKIN² ve Alper GÜNÖZ³

ÖZET

Bu çalışmada, deniz suyuna maruz kalan betonun cam fiber takviyeli polimer (GFRP) ile sargılanmasında kullanılan epoksi matrisine ağırlıkça %0.3 oranında çok duvarlı karbon nanotüp (CNT) eklenmesinin etkisinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Düşük ve normal dayanımlı olmak üzere iki gruba ayrılan numuneler karbon nanotüp içeren veya içermeyen epoksi kullanılarak GFRP ile sargılanmıştır. Bu numuneler deniz suyuna bırakılmamış veya 3/6 ay süreyle deniz suyuna maruz kalacak şekilde alt gruplara ayrılmışlardır. Ayrıca karbon nanotüpün farklı hasar durumlarında etkisini gözlemleyebilmek için GFRP sargı bindirme boyu da 10 mm veya 150 mm olacak şekilde ayrı bir parametre olarak ele alınmıştır. Mevcut durumda toplam on altı adet deniz suyuna maruz bırakılmamış beton numune, saf epoksi veya CNT ile modifiye edilmiş epoksi kullanılarak GFRP ile sarılmış ve monotonik aksenal basınç altında test edilmiştir. Yetersiz GFRP bindirme boyuna (10 mm) sahip numunelerde, CNT kullanımı nihai yanıl (çevresel) birim şekil değıştirme ve basınç dayanımında sınırlı artışlar sağlarken, nihai aksenal birim şekil değıştirmede azalmaya neden olmuştur. Yeterli bindirme boyuna (150 mm) sahip düşük dayanımlı beton numunelerinde ise CNT modifikasyonu beklenmedik şekilde sargılama etkinliğini azaltmış ve erken kopmalara yol açmıştır. Buna karşılık, normal dayanımlı beton numunelerinde CNT ile modifiye edilmiş epoksi kullanımı; sargılama etkinliği, dayanım ve birim şekil değıştirme artış oranlarında önemli iyileşmeler sağlamıştır. Kalan numunelere ait testlerin de tamamlanmasıyla CNT modifikasyonunun deniz suyuna maruz farklı dayanıma sahip betonların GFRP ile sargılanmasındaki etkisi ortaya konulabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Güçlendirme, Sargılı beton, Cam fiber takviyeli polimer, Karbon nanotüp

ABSTRACT

In this study, the aim is to investigate the effect of adding 0.3% by weight multi-walled carbon nanotubes (CNT) to the epoxy matrix used for wrapping concrete exposed to seawater with glass fiber reinforced polymer (GFRP). The samples, divided into two groups as low and normal strength, were wrapped with GFRP using epoxy containing or not containing carbon nanotubes. These samples were further subdivided based on whether they were not exposed to seawater or exposed to seawater for 3 or 6 months. Additionally, to observe the effect of CNT under different damage scenarios, GFRP wrap overlap length was considered as a separate parameter and set at either 10 mm or 150 mm. Currently, a total of sixteen concrete samples not exposed to seawater have been wrapped with GFRP using either neat epoxy or CNT-modified epoxy, and tested under monotonic axial compression. In samples with an insufficient GFRP overlap length (10 mm), the use of CNT provided limited increases in the ultimate lateral (circumferential) strain and compressive strength, while causing a decrease in the ultimate axial strain. In low-strength concrete samples with a sufficient overlap length (150 mm), CNT modification unexpectedly reduced the wrapping effectiveness and led to premature failures. In contrast, in

¹ YL Öğrenci, Mersin Üniversitesi, Mersin, aamohamud100@gmail.com

² Prof. Dr., Mersin Üniversitesi, Mersin, ekin@mersin.edu.tr

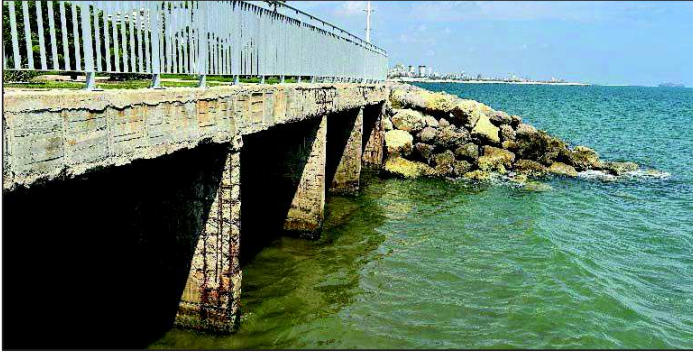
³ Doç. Dr., Mersin Üniversitesi, Mersin, alpergunöz@mersin.edu.tr

normal-strength concrete samples, the use of CNT-modified epoxy resulted in significant improvements in confinement effectiveness, strength, and strain increment rates. Once the tests on the remaining samples are completed, the effect of CNT modification on the confinement of concrete with varying strengths exposed to seawater with GFRP will be revealed.

Keywords: Strengthening, Confined concrete, Glass fiber reinforced polymer, Carbon nanotube.

GİRİŞ

Artan nüfus yoğunluğu ve ekonomik faaliyetler, kıyı bölgelerinde altyapı ve inşaat yatırımlarının hız kazanmasına yol açmıştır. Bu nedenle kıyı yapılarının güvenliği, hizmet ömrü ve sürdürülebilirliği inşaat mühendisliğinde stratejik bir araştırma konusu olarak öne çıkmaktadır. Deniz ortamlarındaki betonarme yapılarda klorür iyonları betona nüfuz ederek donatı korozyonunu tetiklemekte, oluşan hacim artışı betonun çatlamasına ve parçalanmasına yol açmaktadır. Sülfatlar gibi zararlı kimyasallar da bu bozunma sürecini hızlandırmakta; yapıların hizmet ömrünü kısaltmakta ve onarım maliyetlerini artırmaktadır (Guo vd., 2018). Şekil 1'de görülen Mersin-Yenişehir'de bulunan küçük köprü yapısı, deniz suyu etkisine maruz kıyı altyapılarına tipik bir örnek oluşturmaktadır. Bu tür yapılarda, deniz suyunun doğrudan teması ve dalga etkisi nedeniyle beton ve donatı sistemlerinde zamanla ciddi bozulmalar gözlemlenmektedir.



Şekil 1. Mersin-Yenişehir'de Deniz Suyu Etkisine Maruz Kıyı Köprüsü Örneği

Bu zorlu çevre koşullarında geleneksel güçlendirme yöntemleri sıklıkla yetersiz kalmaktadır. Fiber takviyeli polimer (FRP) sistemleri, hafifliği, korozyona tam direnci, uygulama kolaylığı ve yüksek mukavemet/ağırlık oranı gibi avantajları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Cam fiber takviyeli polimer (GFRP), yüksek mukavemeti ve düşük maliyetiyle özellikle kıyı bölgelerindeki uygulamalar için ideal bir seçim olarak değerlendirilmektedir (Hassan vd., 2021).

Bununla birlikte, GFRP sistemlerinin deniz ortamlarındaki uzun dönem davranışı konusunda literatürde kısıtlı miktarda bilgi bulunmaktadır. Epoksi matris, su ve kimyasal maddelerle temas ettiğinde yumuşama ve hidroliz süreçlerine maruz kalmakta; deniz suyundaki alkali iyonlar cam fiberlere zarar verebilmekte ve mekanik özelliklerde kalıcı kayıplara yol açabilmektedir (Rodríguez-González & Rubio-González, 2021). Öte yandan karbon nanotüpler (CNT), üstün mekanik ve kimyasal özellikleri nedeniyle epoksi matrisine eklendiğinde kompozitin çevresel etkilere karşı direncini önemli ölçüde artırabilmektedir (Rousakis vd., 2014).

Betonda FRP sargı pasif sargılama prensibi üzerine çalışmaktadır; aksel basınç yükü arttıkça beton yanal yönde genişlemek ve FRP manto bu genişlemeyi kısıtlayarak üç eksenli gerilme durumu oluşturmaktadır. Bu mekanizma betonun dayanımını ve sünekliğini dikkate değer şekilde artırmaktadır (Lam & Teng, 2003). FRP sargı aksel yüklemeye altında yanal sınırlama basıncı (f_l) uygulayarak betonun çevresel yönde genişmesini kısıtlamaktadır. Lam ve Teng (2004) tarafından vurgulanan kritik bir hususa göre, FRP malzemelerinin gerçek sargılama uygulamalarında

ölçülen halka kopma şekil değiştirmeleri ($\epsilon_{h,rup}$), standart çekme deneylerinden elde edilen değerlerden (ϵ_{fu}) daha düşüktür; bu durum gerinim azaltma katsayısı ($k_e = \epsilon_{h,rup}/\epsilon_{fu}$) kavramını ortaya çıkartmaktadır (Lam & Teng, 2004).

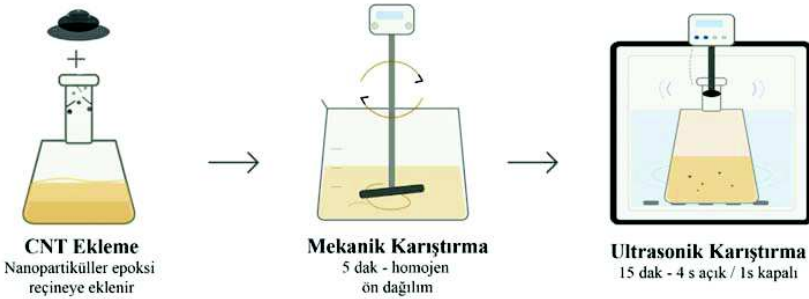
Deniz ortamları FRP sistemleri için en zorlu çevresel koşulları barındırmaktadır. Carlos ve Morales (2020), 60°C'de 24 aylık hızlandırılmış maruziyet sonrası GFRP çekme dayanımında %28 azalma, Li vd. (2018) 6 aylık 40°C maruziyet sonrası %25.9 basınç dayanımı kaybı, El-Hassan vd. (2018) ise 9000 saat tuzlu su maruziyeti sonrası gerinim verimlilik faktöründe %43 azalma tespit etmiştir. Bu bulgular, deniz ortamının GFRP performansı üzerindeki tahripkâr etkisini açıkça ortaya koymaktadır (Carlos & Morales, 2020; El-Hassan vd., 2018; Li vd., 2018).

CNT takviyesinin FRP güçlendirme sistemlerine entegrasyonu literatürde umut verici sonuçlar sunmaktadır. Rousakis vd. (2014), %0.5 ağırlık oranında CNT ilavesinin çekme dayanımında %125 ve süneklilikte %227 artış sağladığını raporlamıştır. Joseph vd. (2022) ise %1 CNT konsantrasyonunun ağırlama tokluğunu önemli ölçüde artırdığını, bununla birlikte yüksek konsantrasyonlarda aglomerasyon sorunlarının ortaya çıktığını göstermiştir (Joseph vd., 2022; Rousakis vd., 2014).

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde beton silindir numuneler kullanılmıştır. Düşük dayanımlı beton (LSC ~10 MPa) ve normal dayanımlı beton (NSC ~35 MPa) olmak üzere iki farklı beton sınıfı hazırlanmıştır. LSC numunelerine iki katman, NSC numunelerine dört katman GFRP sargısı uygulanmıştır. 330 g/m² yoğunluğunda, 0.2 mm kalınlığında tek yönlü GFRP kumaşı kullanılmış olup üretici spesifikasyonlarına göre çekme dayanımı 1302 MPa, elastisite modülü 85 GPa ve kopma uzaması %1.48'dir.

Epoksi matrisi olarak iki farklı sistem uygulanmıştır: saf epoksi (P) ve ağırlıkça %0.3 çok duvarlı karbon nanotüp (CNT) içeren modifiye epoksi (C). CNT'ler epoksi reçineye 5 dakika mekanik karıştırma ve ardından 650 W, 20 kHz frekanslı ultrasonik cihaz ile 15 dakika prob sonikasyonu uygulanarak dağıtılmıştır. Şekil 2'de gösterildiği üzere, CNT takviyeli epoksi hazırlama süreci iki temel aşamadan oluşmaktadır: mekanik karıştırma ve ultrasonik dispersiyon. Kullanılan CNT'lerin dış çapı 6 nm'den küçük, yüzey alanı 350-550 m²/g ve saflık derecesi %96'nın üzerindedir. Bu yöntem, nanotüplerin homojen dağılımını sağlayarak aglomerasyonu önlemekte ve epoksi matrisinin mekanik özelliklerini optimize etmektedir.



Şekil 2. CNT Takviyeli Epoksi Hazırlama Süreci

GFRP sargısı 10 mm ve 150 mm bindirme boyuyla uygulanmış; numunelerin deniz suyuna maruziyeti 0 ay (kontrol), 3 ay ve 6 ay olarak belirlenmiştir. Her grupta ikişer numune içerecek şekilde planlanan deneysel program Tablo 1'de özetlenmiştir. Basınç deneyleri 3000 kN kapasiteli üniversal deney cihazında 4 kN/s sabit yükleme hızında monotonik olarak gerçekleştirilmiştir. Her numune üzerine 180° aralıkla yerleştirilen iki gerinim ölçer yanal birim şekil değiştirmeyi, üç doğrusal potansiyometre ise eksenel deformasyonu kaydetmiştir.

Tablo 1. Deney Grupları ve Özellikleri

Dayanım (MPa)	Numune	Maruziyet (Ay)	Katman Sayısı	Bindirme (mm)	CNT (%)
10	LR-0	0	-	-	-
	LP-10-0	0	2	10	0
	LP-150-0	0		150	0
	LP-150-3	3			0
	LP-150-6	6			0
	LC-10-0	0		10	0.3
	LC-150-0	0		150	
	LC-150-3	3			
	LC-150-6	6			
35	NR-0	0		-	-
	NP-150-0	0	4	150	0
	NP-150-3	3			0
	NP-150-6	6			0
	NC-150-0	0			0.3
	NC-150-3	3			
	NC-150-6	6			

Not: L ve N sırasıyla düşük ve normal dayanımlı betonu; P ve C sırasıyla katkısız ve CNT katkılı epoksiyi; 10 ve 150 bindirme boyunu (mm); 0 ise deniz suyu maruziyet süresini (ay) ifade etmektedir (Örn: NC-150-0; CNT katkılı epoksi ve 150 mm bindirme boyuna sahip, deniz suyuna maruz kalmamış normal dayanımlı beton numunesidir).

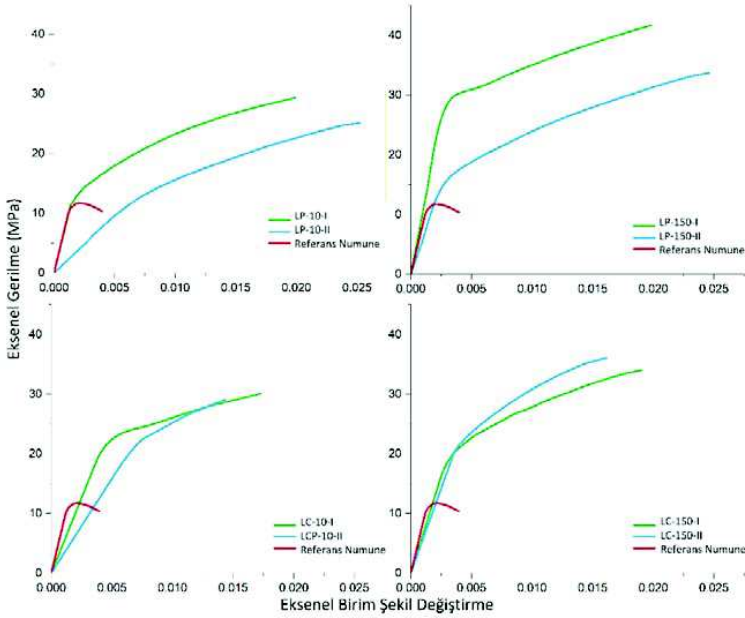
BULGULAR

Deniz suyuna maruz bırakılmamış numunelerin (0 ay) testleri tamamlanmış olup, 3 aylık ve 6 aylık maruziyet gruplarına ait numunelerin testleri deniz suyu bekleme süreleri tamamlandığında gerçekleştirilecektir. Deneyleri tamamlanan, deniz suyuna maruz bırakılmamış düşük ve normal dayanımlı beton gruplarındaki numunelere ait eksenel gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri sırasıyla Şekil 3 ve 4'te sunulmaktadır. Bu numunelere ait ortalama nihai dayanım (f_{cc}) ve eksenel birim şekil değiştirme (ϵ_{cu}), gerinim azaltma katsayısı (k_e), sargılama basıncının (f_{iu}) sargısız beton dayanımına (f_{co}) oranı olan sargılama oranı (f_{iu}/f_{co}) ile sargılama elde edilen dayanım ve eksenel birim şekil değiştirme artışı (sırasıyla f_{cc}/f_{co} ve $\epsilon_{cu}/\epsilon_{co}$) değerleri Tablo 2'de sunulmuştur. LSC ve NSC gruplarında ortalama sargısız beton dayanımları, f_{co} sırasıyla 11.14 MPa ve 38.25 MPa olarak belirlenmiştir. Karşılık gelen eksenel birim şekil değiştirme değerleri, ϵ_{co} (sırasıyla LSC ve NSC için) 0.00287 ve 0.00337'dir.

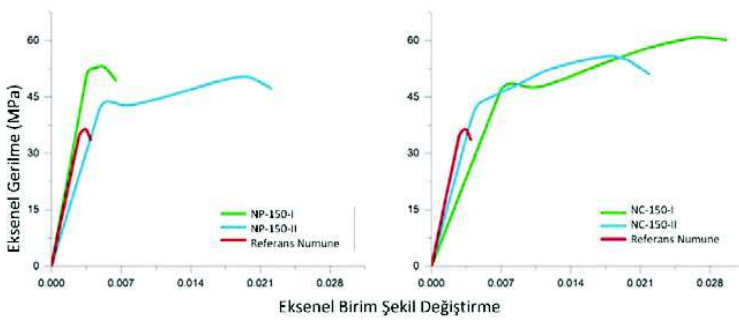
Düşük dayanımlı betonlar için 10 mm bindirme boylu GFRP ve saf epoksi kullanılarak (LP-10-0) yapılan sargılamayla, sargısız betona kıyasla dayanımda 2.45 ve eksenel birim şekil değiştirmede ise 7.83 artış değerleriyle davranışta önemli bir iyileşme sağlanmıştır. Ancak k_e için elde edilen 0.42'lik düşük değer, kısa bindirme boyunun gerilme aktarımını sınırladığını göstermiştir. 10 mm bindirme boyuna sahip CNT takviyeli epoksi grubunda (LC-10-0) ise sargılama oranı ve dayanım artışında LP-10-0 grubuna göre küçük bir miktar artış gözlenmekle birlikte, bu iyileşme birim deformasyon artışı için gözlenememiştir. 150 mm bindirme boyuna sahip grupta (LP-150-0) ise LSC serisi içindeki en yüksek f_{cc}/f_{co} (3.38) ve k_e (0.62) değerlerine ulaşılmıştır. CNT ile modifiye edilmiş epoksi içeren grupta (LC-150-0) saf epoksi grubuna kıyasla sargılama parametrelerinde bir miktar azalma görülmüş olup, epoksi içerisine CNT takviyesiyle sargılamada bir iyileşme sağlanamadığı söylenebilir.

NSC için, saf epoksi grubunda (NP-150-0) k_e , f_{cc}/f_{co} ve $\epsilon_{cu}/\epsilon_{co}$ değerleri sırasıyla 0.47, 1.33 ve 6.53 olarak bulunmuştur. Epoksi içerisinde CNT içeren grupta (NC-150-0) ise k_e değeri 0.77 olmuş ve bu değerle çalışmanın tüm 0 ay grupları arasındaki en yüksek gerinim verimliliği katsayısına ulaşılmıştır. CNT takviyesiyle f_{iu}/f_{co} oranında yaklaşık %64, dayanımda %16 ve eksenel deformasyon kapasitesinde ise %15 oranında artış sağlanmıştır.

3 ve 6 aylık deniz suyu maruziyet gruplarına ait sargılı numunelerin testlerinin gerçekleştirilmesinin ardından deniz suyunun GFRP sargılı numuneler üzerindeki etkisi ve bu etki altında epoksi içerisinde CNT kullanımının olası sonuçları ele alınan parametreler ışığında değerlendirilebilecektir.



Şekil 3. Düşük dayanımlı beton (LSC) gruplarında eksenel gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri



Şekil 4. Normal dayanımlı beton (NSC) gruplarında eksenel gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

Tablo 2. GFRP ile Sargılanmış Numunelerin Temel Oransal Parametre Sonuçları

Numune	f_{cc} (Mpa)	ϵ_{cu}	k_{ϵ} (Ort.)	f_{lu}/f_{co} (Ort.)	f_{cc}/f_{co} (Ort.)	$\epsilon_{cu}/\epsilon_{co}$ (Ort.)
LP-10-0	27.30	0.0225	0.42	0.26	2.45	7.83
LC-10-0	29.60	0.0157	0.45	0.28	2.66	5.46
LP-150-0	37.64	0.0222	0.62	0.39	3.38	7.70
LC-150-0	35.09	0.0175	0.43	0.27	3.15	6.09
NP-150-0	50.70	0.0220	0.47	0.17	1.33	6.53
NC-150-0	58.86	0.0254	0.77	0.28	1.54	7.54

Hasar Biçimleri

10 mm bindirme boylu numuneler yetersiz ara yüzey üzerinde gerinim aktarımı nedeniyle, lokal olarak bindirme bölgesinde sıyrılmaya hasarı sergilemiştir. Özellikle hedeflenen bu hasar durumunda, epoksi içerisinde CNT takviyesinin etkisi gözlenmek istenmiştir. Belirli sargılama parametrelerinde küçük bir miktar artış gözlenince de epoksi matris içerisinde CNT kullanımının sıyrılmaya mekanizmasında olumlu bir etkisi net olarak ortaya konulamamıştır. Öte yandan 150 mm

bindirme boyuna sahip numunelerde, FRP sargılı betonda sıkça görüldüğü gibi, sargının ani olarak yırtılmasıyla güç tükenme durumuna ulaşılmıştır.

SONUÇ

Mevcut sonuçlar betonun GFRP ile sargılamaında epoksi matris içerisinde karbon nanopartikül ilavesinin sargılama oranının (f_{iu}/f_{co}) görece yüksek olduğu düşük dayanımlı beton numune gruplarında bir etkisinin olmadığını ve özellikle aksel deformasyon kapasitesinde bir miktar azalmalara yol açabildiğini göstermektedir. Ancak sargılama oranı daha düşük olan normal dayanımlı beton grubunda CNT ilavesiyle sargılama etkinliğinde bir iyileşme sağlandığı söylenebilir. Bu sonuçlar ışığında epoksi içerisinde CNT takviyesinin düşük sargılama oranlarında bir fark ortaya koyabildiği, ancak hali hazırda sargılama oranı yüksek olduğunda bu farkın gözlenemediği değerlendirilmesi yapılabilir. Ancak bu sonucun geliştirilebilmesi için ilave deneysel gözleme ihtiyaç bulunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Morales-Mangual, C.N. (2020). Flexural and Durability Performance of Seawater-Mixed GFRP-Reinforced Concrete, Ph.D. Thesis, University of Miami, Florida, USA.
- El-Hassan, H., El-Maaddawy, T., Al-Sallamin, A., & Al-Saidy, A. (2018). Durability of glass fiber-reinforced polymer concrete conditioned in moist seawater-contaminated concrete under sustained load. *Construction and Building Materials*, 175, 1-13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.107>
- Guo, Q., Chen, L., Zhao, H., Admilson, J., & Zhang, W. (2018). The Effect of Mixing and Curing Sea Water on Concrete Strength at Different Ages. *MATEC Web Conf.*, 142. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201714202004>
- Hassan, A., Khan, R., Khan, N., Aamir, M., Pimenov, D. Y., & Giasin, K. (2021). Effect of seawater ageing on fracture toughness of stitched glass fiber/epoxy laminates for marine applications. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2), 1-9. <https://doi.org/10.3390/jmse9020196>
- Joseph, L., Kumar, P. S., Deeraj, B. D. S., Joseph, K., Jayanarayanan, K., & Mini, K. M. (2022). Modification of epoxy binder with multi walled carbon nanotubes in hybrid fiber systems used for retrofitting of concrete structures: evaluation of strength characteristics. *Heliyon*, 8(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09609>
- Lam, L., & Teng, J. G. (2003). Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete. *Construction and Building Materials*, 17(6-7), 471-489. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(03\)00045-X](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(03)00045-X)
- Lam, L., & Teng, J. G. (2004). Ultimate Condition of Fiber Reinforced Polymer-Confined Concrete. *Journal of Composites for Construction*, 8(6), 539-548. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2004\)8:6\(539\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2004)8:6(539))
- Li, Y. L., Zhao, X. L., & Singh Raman, R. K. (2018). Mechanical properties of seawater and sea sand concrete-filled FRP tubes in artificial seawater. *Construction and Building Materials*, 191, 977-993. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.059>
- Rodríguez-González, J. A., & Rubio-González, C. (2021). Seawater effects on interlaminar fracture toughness of glass fiber/epoxy laminates modified with multiwall carbon nanotubes. *Journal of Composite Materials*, 55(3), 387-400. <https://doi.org/10.1177/0021998320950788>
- Rousakis, T. C., Kouravelou, K. B., & Karachalios, T. K. (2014). Effects of carbon nanotube enrichment of epoxy resins on hybrid FRP-FR confinement of concrete. *Composites Part B: Engineering*, 57, 210-218. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.044>

YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİM ÇALIŞMALARINI İÇİN TASARLANAN LAMİNER ZEMİN TANKININ SARISMA MASASI DENEYİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

ASSESSMENT OF A LAMINAR SHEAR SOIL BOX DESIGNED FOR SOIL- STRUCTURE INTERACTION WITH SHAKE TABLE TEST

Esin ERTÜRK ATMACA¹, Berk DİKMENOĞLU², Burak AKÇAY³, Muhammet Cihat ŞAHİN⁴, Fezayil SUNCA⁵, Fatih Yesevi OKUR⁶, Murat GÜNAYDIN⁷, Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU⁸, Esra Ece ESELLER-BAYAT⁹, Kemal Önder ÇETİN¹⁰, Ertuğrul TACİROĞLU¹¹, Osman SİVRİKAYA¹², Ahmet Can ALTUNIŞIK¹³

ÖZET

Yapı-zemin etkileşimi, özellikle dinamik yükler altında yapıların performansını belirleyen temel faktörlerden biridir. Yapıların bu tür yüklemeler altındaki davranışlarının doğru ve güvenilir bir şekilde tahmin edilebilmesi, zemin ve yapı arasındaki karmaşık etkileşimin gerçekçi biçimde temsil edilmesini gerektirmektedir. Bu kapsamda fiziksel model deneyleri, yapı-zemin etkileşiminin daha gerçekçi ve doğrudan gözlemlenmesine olanak tanıyan önemli araştırma yöntemleri arasında yer almaktadır. Fiziksel model deneylerinde, yapı-zemin sistemlerinin dinamik davranışını kontrollü laboratuvar koşulları ve sismik yüklemeler etkisi altında inceleyebilmek amacıyla farklı tiplerde ve çeşitli malzemelerden üretilmiş zemin tankları kullanılmaktadır. Bu tanklar arasında laminer zemin tankları, sınır etkilerini minimize edebilme yetenekleri, serbest saha koşullarını başarıyla temsil edebilmeleri ve zemin ortamının doğal deformasyonuna izin vermeleri nedeniyle öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, yapı-zemin etkileşiminin deneysel olarak incelenmesine yönelik olarak tasarlanan ve üretimi gerçekleştirilen bir laminer zemin tankının dinamik davranışı deneysel yöntemlerle değerlendirilmiştir. Operasyonel Modal Analiz yöntemi uygulanmış ve zemin tankına ait mod şekli, ilgili doğal frekans ve sönüm oranı belirlenmiştir. Harmonik hareket etkisi altında sarsma masası testi gerçekleştirilmiş, yükseklik boyunca zemin tankının ivme ve yatay yer değiştirme değerleri incelenmiştir. Geliştirilen laminer zemin tankının güvenilir, tekrarlanabilir ve etkin bir şekilde çalıştığı değerlendirilmiş olup, gerçekleştirilecek yapı-zemin etkileşimi çalışmalarına önemli bir altyapı teşkil edeceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Laminer Zemin tankı, Operasyonel modal analiz, Sarsma masası testi, Yapı-zemin etkileşimi

¹ Arş. Gör., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, esinerturk@ktu.edu.tr

² İnş. Yük. Müh., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, berkdikmenoglu@gmail.com

³ Arş. Gör., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, burak.akcay@ktu.edu.tr

⁴ İnş. Yük. Müh., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, mcshivil@gmail.com

⁵ Doç. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, fezayilsunca@ktu.edu.tr

⁶ Doç. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, yesevi@ktu.edu.tr

⁷ Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, muratgunaydin@ktu.edu.tr

⁸ Prof. Dr., İstanbul Üniversitesi, İstanbul, kelesoglu@iuc.edu.tr

⁹ Doç. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, ebayat@itu.edu.tr

¹⁰ Prof. Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, oacetin@metu.edu.tr

¹¹ Prof. Dr., University of California, Los Angeles, etacir@ucla.edu

¹² Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, osivrikaya@ktu.edu.tr

¹³ Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, ahmetcan@ktu.edu.tr

ABSTRACT

Soil-structure interaction (SSI) is one of the fundamental factors effecting the performance of structures, particularly under dynamic loading conditions. Accurate and reliable evaluation of structural behaviour under such loadings requires a realistic representation of the complex interaction between soil and structure. In this context, physical model testing constitutes one of the most important research approaches, enabling a more realistic and direct observation of soil-structure interaction phenomena. In physical model testing, various types of soil boxes made of different materials are employed to investigate the dynamic behaviour of soil-structure systems under controlled laboratory conditions and seismic loading. Among these, laminar shear soil boxes stand out due to their ability to minimize boundary effects, effectively represent free-field conditions, and allow natural deformation of the soil domain. In this study, the dynamic response of a laminar shear soil box, designed and fabricated for the experimental investigation of soil-structure interaction, were evaluated through experimental methods. Operational Modal Analysis was conducted, and the mode shape, corresponding natural frequency, and damping ratio of the laminar shear soil box were determined. A shake table test was conducted under the harmonic input motion, and the acceleration and horizontal displacement values of the soil box were examined along its varying heights. The developed and fabricated laminar shear soil box is considered to operate reliably, consistently, and effectively, and it is anticipated that the findings will provide a significant basis for soil-structure interaction studies.

Keywords: Laminar shear soil box, Operational modal analysis, Shake table test, Soil-structure interaction

GİRİŞ

Bir yapının deprem anındaki performansı, yalnızca yapı tasarımı ve inşası ile değil; aynı zamanda deprem dalgalarının yayıldığı zemin özellikleri ve yapı-zemin etkileşimi ile de doğrudan ilişkilidir. Zemin ve yapı çoğu zaman birbirinden bağımsız olarak ele alınsa da gerçek davranış bu iki sistemin karşılıklı etkileşimi ile şekillenmektedir. Bu nedenle, yapı-zemin etkileşiminin doğru bir şekilde modellenmesi, yapıların güvenli ve ekonomik tasarımı açısından büyük önem taşımaktadır.

Yapı-zemin etkileşiminin incelenmesinde sayısal yöntemler yaygın olarak kullanılmakla birlikte (Requena-Garcia-Cruz vd., 2022a, 2022b; Shabani ve Kioumarsi, 2023; Ekrami Kakhki vd., 2023), zemin ortamının doğrusal olmayan davranışı, sınır koşullarının karmaşıklığı ve modelleme kabulleri elde edilen sonuçların doğruluğunu etkilemektedir. Bu aşamada fiziksel model deneyleri, karmaşık zemin davranışının daha gerçekçi bir şekilde temsil edilmesine olanak sağlayarak önemli bir alternatif sunmaktadır. Fiziksel model deneylerinde kullanılan zemin tankları, deney sonuçlarının doğruluğu üzerinde belirleyici bir role sahiptir. Literatür çalışmalarında zemin ortamının kayma deformasyonunu gerçekçi bir şekilde yansıtmak amacıyla rijit, esnek ve laminar tiplerde farklı birçok zemin tankı tasarlanmış ve üretilmiştir (Lu vd., 2002; Xu vd., 2020; Kim vd., 2020). Ancak, zemin tanklarının boyutu laboratuvar ortamındaki sarsma masalarının sınırlı boyut ve taşıma kapasiteleri nedeniyle sınırlı kalmaktadır. Dolayısıyla, üretilen zemin tanklarının yanal sınırları zemin deformasyonunu kısıtlamakta ve sismik dalgaların zeminde iletilirken yansıma ve saçılma etkileri üretmesine neden olmaktadır. Bu durum, dinamik testlerde zemin tanklarının yarı-sonsuz zemin sınır koşullarını temsil etmekte yetersiz kalmasına ve sınır etkisi olarak adlandırılan hatanın oluşmasına neden olmaktadır (Mizuno ve Liba, 1982). Bu sınır etkisinin oluşmasını engellemek için son yıllarda yapı-zemin etkileşimi üzerine yapılan deneysel çalışmaların önemli bir bileşeni haline gelen ve tipik olarak birbirlerine göre hareket edebilen çerçevelerden oluşan laminar zemin tankları geliştirilmiştir. Literatürde mevcut olan laminar zemin tanklarının boyutları farklılık gösterse de dikdörtgen (Yang vd., 2010; Goit vd., 2013; Tabatabaiefar vd., 2014; Alaie ve Chenari, 2018; Mohsan vd., 2018; Bandini vd., 2019; Shi vd., 2021; Jia vd., 2022; Li vd., 2024; Feng vd., 2025; Mittal ve Samanta, 2025), silindirik (Suzuki vd., 2008; Lei vd., 2020), kübik (Bagheri ve Eseller-Bayat, 2024) ve sekizgen (Fan vd., 2024) formlarda olup yaygın olarak alüminyum (Ecemis 2013; Hokmabadi vd., 2015; Durante vd., 2016; Alaie ve Chenari, 2018; Bandini vd., 2019; Mittal ve Samanta, 2025), çelik (Vivek ve Raychowdhury, 2019; Xu vd., 2020; Shi vd., 2021; Li vd., 2024; Feng vd., 2025) ve şeffaf (Bagheri ve Eseller-Bayat, 2024) malzemelerden üretilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, yapı-zemin etkileşiminin deneysel olarak incelenmesine yönelik olarak tasarlanan ve üretilen bir laminer zemin tankının dinamik performansı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, tankın dinamik karakteristikleri Operasyonel Modal Analiz yöntemi ile belirlenmiştir. Ayrıca, harmonik hareket etkisi altında sarsma masası testi gerçekleştirilmiş ve yükseklik boyunca zemin tankının ivme ve yatay yer değiştirme değerleri incelenmiştir.

DENEYSEL ÇALIŞMA

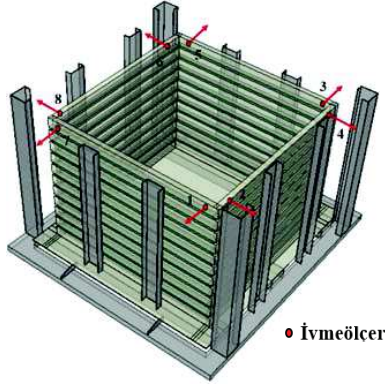
Bu çalışma kapsamında deneysel çalışmalarda Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi tarafından proje kodu FAY-2024-16026 ile desteklenen ve yürürlüğe giren “Laminer Zemin Tankının Tasarımı ve Geliştirilmesi” isimli Alt Yapı Projesi kapsamında tasarlanan ve üretilen laminer zemin tankı kullanılmıştır (Şekil 1). Kullanılan laminer zemin tankının boyutları ve özellikleri literatürde mevcut olan çalışmalar dikkate alınarak 200x200x160cm olarak belirlenmiştir. Laminer zemin tankı yükseklik boyunca, kesit boyutları 12x6cm olan ve %92'den fazla ışık geçirgenliğine sahip Plexiglass malzemeden üretilmiş 11 adet lamineden oluşmaktadır. Lamineler arasındaki boşlukların geçirimsizliğini sağlamak ve dinamik yüklenme sırasında laminelerin birbirine göre göreceli hareketine olanak tanıyacak esnek bir arayüz oluşturmak için, lamineler arasına Sikaflex bazlı 30mm kalınlığında esnek birleştirici malzeme kullanılmıştır. Zemin tankının uygulanacak dinamik harekete paralel karşılıklı iki kenarına 1m aralıklarla iki sıra halinde dinamik harekete dik doğrultudaki hareketi kısıtlayan yanal destek makaraları ve laminelerin göreceli hareketini yatay olarak serbestçe yapmasını sağlayan ve laminaların kendi ağırlıkları altında dikey yer değiştirme yaparak esnek birleştirici malzemenin sıkışmasını önleyen dikey rulmanlar yerleştirilmiştir.



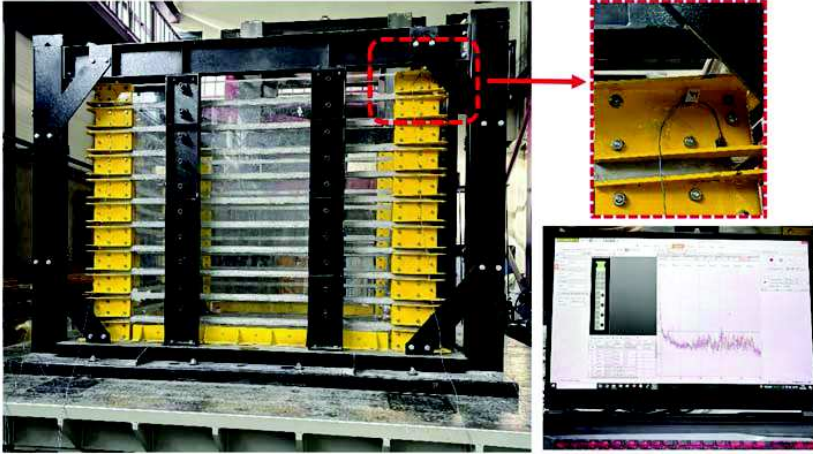
Şekil 1. Tasarlanan ve üretilen laminer zemin tankına ait genel görsel

Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi yapıların dinamik karakteristikleri olarak adlandırılan doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranlarını elde etmek için hasarsız bir yöntem olduğundan yaygın olarak tercih edilmektedir (Baghiee vd., 2009; Altunışık vd., 2017; Akhlaghi vd., 2021; Kita vd., 2021; Sunca vd., 2021). OMA yönteminde yapıya yerleştirilen hassas ivmeölçerler ile yapının ham titreşim verileri elde edilmekte, veri toplama sistemine aktarılmakta ve elde edilen ham veriler yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek için özel bir yazılım tarafından işlenmektedir. Bu çalışma kapsamında laminer zemin tankının dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla OMA yöntemi uygulanmıştır. Laminer zemin tankının en üst laminelerinin köşelerine 8 adet Brüel & Kjaer 4507 B005 tipi tek eksenli ivmeölçerler yerleştirilmiştir (Şekil 2). İvmeölçerler yardımı ile zemin tankından elde edilen ham sinyaller Brüel & Kjaer 3053 tipi 12 kanallı veri toplama sistemi tarafından toplanmış, PULSE (PULSE, 2006) ve OMA (OMA, 2006) yazılımları kullanılarak işlenmiştir. Ölçüm süresi 10 dakikadır. Deneysel ölçüme ait bazı görüntüler Şekil 3'te verilmiştir. Modal parametreler, frekans alanında Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) yöntemiyle elde edilmiştir. Şekil 4, GFOA yöntemiyle elde edilen veri setinin spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerlerini (SVSDM) ve laminer zemin tankının serbest

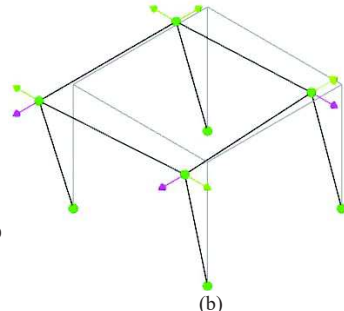
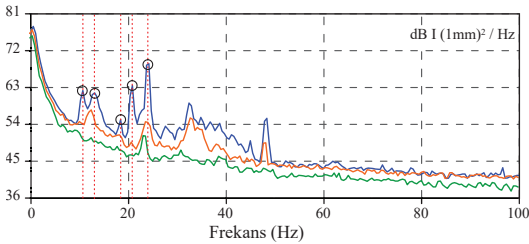
hareketini gerçekleştirebileceği doğrultudaki deneysel mod şeklini göstermektedir. Laminer zemin tankının serbest hareketi doğrultusundaki birinci mod şekli için deneysel doğal frekansı 11,143Hz olarak elde edilmiştir. Sönüm oranı ise %5.53 olarak bulunmuştur.



Şekil 2. İvmeölçer yerleşim planı



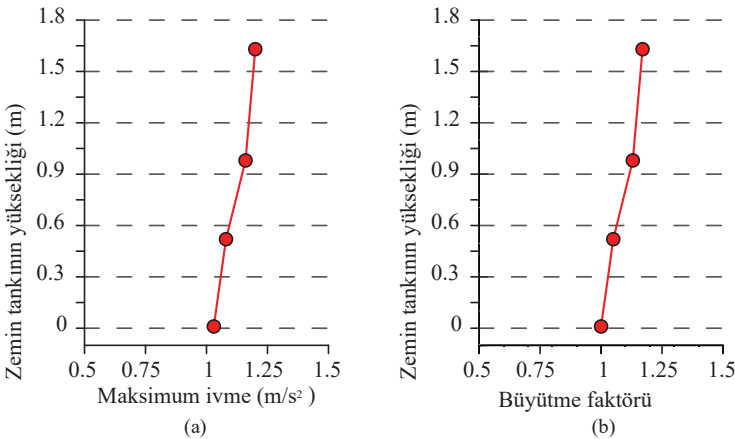
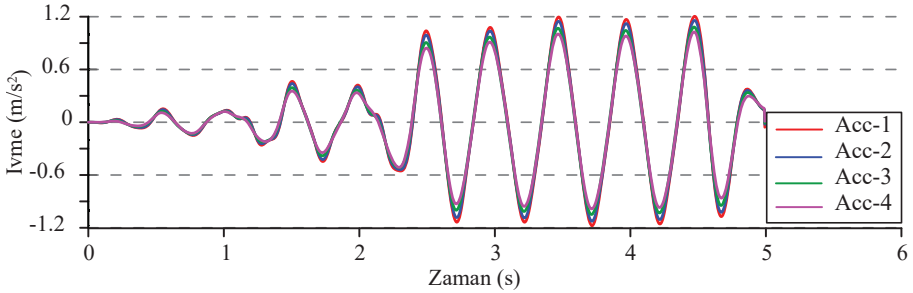
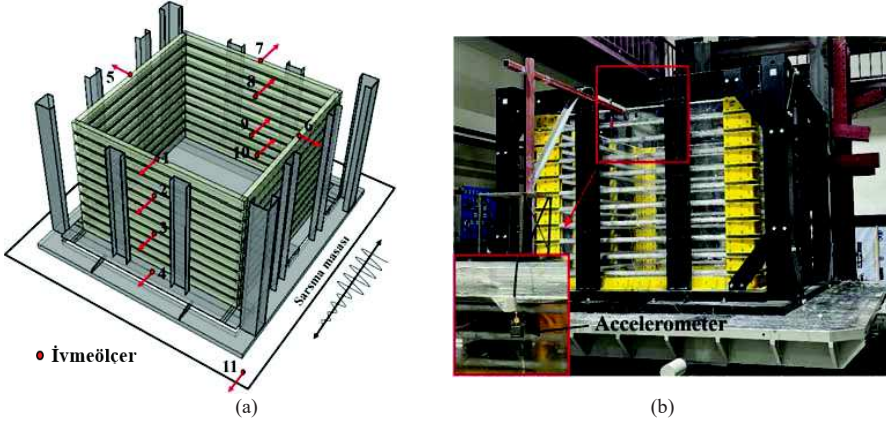
Şekil 3. OMA yönteminin uygulanması



Şekil 4. (a) GFOA yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk grafiği ve (b) mod şekli

Tasarlanan ve üretilen laminer zemin tankının dinamik performansının değerlendirilmesi amacıyla frekansı 2Hz ve genliği 6.5mm olan harmonik hareket etkisi altında sarsma masası deneyi gerçekleştirilmiştir. Sarsma masası deneyi için ivmeölçer yerleşim planı ve deney düzeneği Şekil

5'te verilmiştir. Farklı yüksekliklerdeki ivmeölçerlerden elde edilen ivme-zaman grafikleri Şekil 6'da, yükseklik boyunca maksimum ivme değerlerinin ve büyütme faktörlerinin değişimi ise Şekil 7'de sunulmuştur. Üst lamineden elde edilen maksimum ivme değeri taban ivmesine göre yaklaşık 1.17'lik bir büyütme faktörüne karşılık gelen 1.20 m/s²'ye ulaşmıştır. Sonuçlar, laminer zemin tankının dinamik tepkisinin yüksekliği boyunca değiştiğini ve üst laminalarda daha yüksek ivme genliklerinin gözlemlendiğini göstermektedir.



SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, yapı-zemin etkileşiminin deneysel olarak incelenmesine yönelik tasarlanan ve üretilen laminer zemin tankının dinamik davranışı deneysel yöntemlerle değerlendirilmiştir. Operasyonel Modal Analiz gerçekleştirilmiş ve laminer zemin tankının serbest hareketi doğrultusundaki birinci mod şekli için deneysel doğal frekansı 11,143Hz, sönüm oranı ise %5.53 olarak elde edilmiştir. Sarsma masası deneyinden elde edilen bulgular, laminer zemin tankının yüksekliği boyunca ivme değerlerinin değiştiğini ve üst laminalarda daha yüksek ivme genliklerinin meydana geldiğini göstermiştir. Bu durum, tasarlanan zemin tankının lamaneler arası görelî hareketin oluşmasına ve zeminin kayma deformasyonunun gerçekleşmesine olanak tanıdığı bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Tasarlanan ve üretilen laminer zemin tankının dinamik deneyler için etkin bir altyapı sunduğu düşünülmekte olup ilerleyen çalışmalarda farklı zemin türleri ve farklı ölçeklerde yapı modellerinin dikkate alındığı sistemlerin sarsma masası deneyleriyle entegre edilerek yapı-zemin etkileşiminin incelenmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Akhlaghi MM, Bose S, Mohammadi ME, Moaveni B, Stavridis A, Wood RL (2021) "Post-Earthquake Damage Identification of an RC School Building in Nepal using Ambient Vibration and Point Cloud Data", *Engineering Structures*, 227, 111413.
- Alaie R, Chenari RJ (2018) "Design and performance of a single axis shake table and a laminar soil container", *Civil Engineering Journal*, 4(6):1326-1337.
- Altunışık AC, Okur FY, Kahya V (2017) "Modal Parameter Identification and Vibration Based Damage Detection of a Multiple Cracked Cantilever Beam", *Engineering Failure Analysis*, 79:154-170.
- Bagheri O and Eseller-Bayat EE (2024) "Laminar Soil Container's Performance Study for Dynamic Laboratory Tests: Comprehensive Review and Numerical Verification", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1-17.
- Baghiee N, Esfahani MR, Moslem K (2009) "Studies on Damage and FRP Strengthening of Reinforced Concrete Beams by Vibration Monitoring", *Engineering Structures*, 31(4):875-893.
- Bandini V, Cascone E, Biondi G, Di Filippo G, Ingegneri S, Casablanca O, Genovese F (2019) "The shaking table with laminar box of the University of Messina", *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions*, 1289-1296.
- Durante MG, Sarno LD, Mylonakis G, Taylor CA (2016) "Soil-pile-structure interaction: experimental outcomes from shaking table tests", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(7):1041-1061.
- Ecemis N (2013) "Simulation of seismic liquefaction: 1-g model testing system and shaking table tests", *European journal of environmental and civil engineering*, 17(10):899-919.
- Ekrami Kakhki S, Kheyroddin A, Mortezaei A (2023) "Numerical Investigation of the Progressive Collapse of the Reinforced Concrete Wall-Frame Structures Considering the Soil-Structure Interaction" *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 17, 22.
- Fan Z, Yuan Y, Cudmani R, Deng J, Chrisopoulos S, Vogt S, Niebler M (2024) "Large biaxial laminar shear box for 1-g shaking table tests on saturated sand", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 183, 108756.
- Feng D, Zhu W, Chu M, El Naggar MH, Gong W, Ren Y, Li B (2025) "Application of innovative multi-directional laminar shear box to evaluate seismic soil-Pile foundation-Nuclear power plant interaction", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 190, 109152.
- Goit CS, Saitoh M, Mylonakis G (2013) "Applicability of principle of superposition in obtaining horizontal impedance functions of pile groups under soil nonlinearity", *Proceedings of the 4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPEDYN)*.
- Hokmabadi AS, Fatahi B, Samali B (2015). "Physical modeling of seismic soil-pile-structure interaction for buildings on soft soils", *International Journal of Geomechanics*, 15(2), 04014046.
- Jia K, Xu C, El Naggar MH, Zhang X, Du X, Dou P, Cui C (2022) "Large-scale shake table testing of pile group-bridge model in inclined liquefiable soils with overlying crusts", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 163.
- Kim H, Kim D, Lee Y, Kim H (2020) "Effect of soil box boundary conditions on dynamic behavior of model soil in 1 g shaking table test", *Applied Sciences*, 10(13), 4642.
- Kita A, Cavalagli N, Venanzi I, Ubertini F (2021) "A New Method for Earthquake Induced Damage Identification in Historic Masonry Towers Combining OMA and IDA", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(12):5307-5337.

- Lei H, Hu Y, Han Q, Zheng G, Zhao B, Du Y (2020) “Design and test verification of a cylindrical 3D laminar shear soil container for use on shaking tables”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 139, 106384.
- Li Z, El Naggar MH, Dai G, Liu H, Luan Y, Gong W (2024) “Seismic isolation effect of unconnected piles-caisson foundation: large-scale shake table tests”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 176.
- Lu X, Chen Y, Chen B, Li P (2002) “Shaking table model test on the dynamic soil-structure interaction system”, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 1(1): 55-64.
- Mittal V and Samanta M (2025) “Performance of a Laminar Shear Box for Cohesionless Soil Under Seismic Excitations”, *Geotechnical and Geological Engineering*, 43(2), 60.
- Mizuno H and Iiba M (1982) “Shaking table testing of seismic building-pile-soil interaction”, *Proceedings of the 8th World Conf. Earthquake Engineering*, 649-656.
- Mohsan M, Kiyota T, Munoz H, Nihaaj M, Katagiri T (2018). “Fabrication and performance of laminar soil box with rigid soil box for liquefaction study”, *Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center*, IIS, vol 51, University of Tokyo.
- OMA Software: Operational modal analysis. V. 4.0. 2006. Structural Vibration Solution A/S, Denmark.
- PULSE Analyzers and Solutions. V. 11.2. 2006. Bruel and Kjaer, Sound and Vibration Measurement A/S, Denmark.
- Requena-Garcia-Cruz MV, Bento R, Durand-Neyra P, Morales-Esteban A (2022b) “Analysis of the soil structure-interaction effects on the seismic vulnerability of mid-rise RC buildings in Lisbon”, *Structures*, 38:599-617.
- Requena-Garcia-Cruz MV, Romero-Sánchez E, Morales-Esteban A (2022a) “Numerical investigation of the contribution of the soil-structure interaction effects to the seismic performance and the losses of RC buildings”, *Developments in the Built Environment*, 12, 100096.
- Shabani A and Kioumars M (2023) “Seismic assessment and strengthening of a historical masonry bridge considering soil-structure interaction”, *Engineering Structures*, 293, 116589.
- Shi W, Chen W, Lin Y, Wu Y (2021) “Fabrication and testing of a laminar shear soil box for a shaking-table test”, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 26.
- Sunca F, Ergün M, Altunışık AC, Günaydın M, Okur FY (2021). “Modal Identification and Fatigue Behavior of Eynel Steel Arch Highway Bridge with Calibrated Models”, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11(5):1337- 1354.
- Suzuki H, Tokimatsu K, Sato M, Tabata K (2008) “Soil-pile-structure interaction in liquefiable ground through multi-dimensional shaking table tests using e-defense facility”, *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China*.
- Tabatabaiefar SHR, Fatahi B, Samali B (2014) “Numerical and experimental investigations on seismic response of building frames under influence of soil-structure interaction”, *Advances in structural Engineering*, 17(1):109-130.
- Vivek B and Raychowdhury P (2019) “Design and calibration of a laminar soil box suitable for a low-capacity shake table using free-field tests on Ganga sand”, *Soils and Foundations*, 59(5):1602-1612.
- Xu C, Dou P, Du X, El Naggar M.H, Miyajima M, Chen S (2020) “Seismic performance of pile group-structure system in liquefiable and non-liquefiable soil from large-scale shake table tests”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 138.
- Yang HJ, Elfass S, Norris G (2010) “Settlement behavior of a shallow foundation in dry sand under simulated earthquake motion on a biaxial shake table”, *GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design*, 1700-1707.

HAFİF ÇELİK PANELLERDE ANKRAJIN YÜK TAŞIMA KAPASİTESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ANCHORING ON THE LOAD- BEARING CAPACITY OF COLD-FORMED STEEL PANELS

Nefya SOYSAL¹, Zeynep FIRAT ALEMDAR², Sena KAPICIOĞLU³, Houssein ALEİT⁴,
Fatih ALEMDAR⁵

ÖZET

Hafif çelik yapı sistemleri; yüksek dayanım/ağırlık oranı ve hızlı montaj gibi avantajları nedeniyle modern inşaat teknolojilerinde geniş yer bulmaktadır. Bu sistemlerde yatay yüklerin temele güvenli bir şekilde aktarılması, taşıyıcı panel sistemlerinin ankraj detaylarına doğrudan bağlıdır. Bu çalışma kapsamında, farklı ankraj konfigürasyonlarının hafif çelik panellerin yatay yük taşıma kapasitesi, rijitliği ve enerji tüketme kapasitesi üzerindeki etkilerinin deneysel olarak belirlenmesi amaçlanmaktadır. Deneyler kapsamında; S350GD çelik kalitesine sahip, C140x35x10x1.5 dikme ve U144x24x1.5 başlık profillerinden oluşan toplam 4 adet panel numunesi test edilmiştir. Numunelerin ikisinde iki ucunda M10 ankraj, diğer 2 numunede ise tek tarafta ankraj kullanılarak ankrajın sistem davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmalar, Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı Laboratuvarı'nda, FEMA-461 (2007) çevrimsel yükleme protokolü uyarınca dişey yük etkisindeki panellere yatay deplasman uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilecek sonuçların, hafif çelik yapıların ekonomik ve güvenli tasarımı için literatürdeki deneysel veri eksikliğini gidermesi ve tasarım kriterlerine katkı sunması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Hafif çelik yapılar, Yatay yük taşıma kapasitesi, Çevrimsel yükleme

ABSTRACT

Cold-formed steel structures are widely used in modern construction technologies because of their advantages, such as high strength-to-weight ratio and rapid assembly. In these systems, the safe transfer of horizontal loads to the foundation is directly dependent on the anchor details of the load bearing panel systems. This study aimed to experimentally determine the effects of different anchor configurations on the horizontal load-carrying capacity, rigidity, and energy dissipation capacity of cold-formed steel panel. A total of four panel specimens made of S350GD steel, consisting of C140x35x10x1.5 uprights and U144x24x1.5 end profiles were tested. The effect of anchoring on the system behavior was investigated using M10 anchors at both ends of the specimens and single-ended anchor arrangements in the other two specimens. Experimental studies have been conducted at the Yıldız Technical University Structural Laboratory by applying horizontal displacement to the panels under vertical load according to the FEMA-461 (2007) cyclic loading protocol. The aim is for the results obtained to address the lack of experimental data in the literature for the economical and safe design of cold-formed steel structures and contribute to design criteria.

Keywords: Cold-formed steel structures, Lateral load-carrying capacity, Cyclic loading

GİRİŞ

¹ İnşaat Mühendisi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul 34220, Türkiye, nefya.soysal@std.yildiz.edu.tr

² Doç.Dr , Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul 34220, Türkiye, zalemdar@yildiz.edu.tr

³ İnşaat Mühendisi , Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul 34220, Türkiye, sena.kapicioglu@yildiz.edu.tr

⁴ İnşaat Mühendisi , Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul 34220, Türkiye, houssein.aleit@std.yildiz.edu.tr

⁵ Doç.Dr , Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul 34220, Türkiye, falemdar@yildiz.edu.tr

Hafif çelik yapı sistemleri, yüksek dayanım/ağırlık oranı, hızlı montaj imkânı ve endüstriyel üretime uygunluğu nedeniyle son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerde duvar panelleri, özellikle yatay yükler altında yapının davranışını belirleyen temel taşıyıcı elemanlar arasında yer almaktadır. Panel sistemlerinin taşıma kapasitesi ve rijitliği; kullanılan profil kesitleri, malzeme kalınlığı, çapraz eleman düzeni ve bağlantı detaylarının yanı sıra ankrāj koşullarından da önemli ölçüde etkilenmektedir.

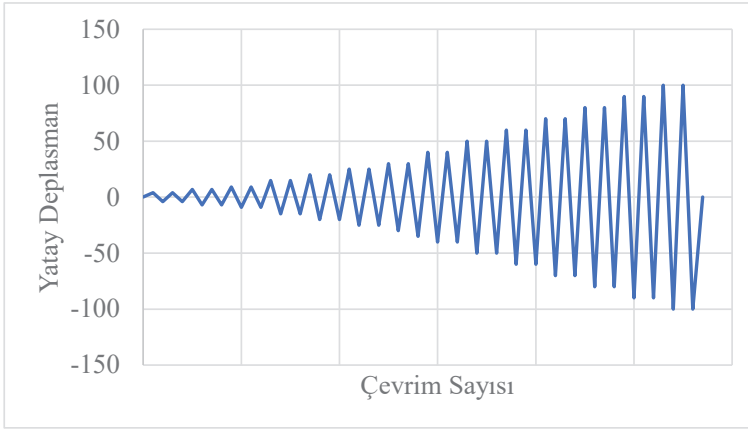
Literatürde soğuk şekillendirilmiş çelik (CFS) elemanların davranışını uzun yıllardır araştırılmaktadır. Schafer ve Peköz (1998) ile Yu ve LaBoube (2010), ince cidarlı çelik elemanlarda yerel burkulma, geometrik kusurlar ve post-burkulma davranışının taşıma kapasitesi üzerindeki belirleyici etkilerini ortaya koymuştur. Ancak bu çalışmalar daha çok tekil eleman davranışına odaklanmış olup, panel düzeyindeki sistem davranışını tam olarak temsil etmemektedir.

Hafif çelik duvar panellerinin yatay yük altındaki davranışını üzerine yapılan deneysel çalışmalar, panel performansının büyük ölçüde kaplama, bağlantı detayları ve çapraz eleman düzenine bağlı olduğunu göstermektedir. Lopes vd. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, vida aralığının azaltılmasının ve kaplama kalınlığının artırılmasının panel taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, çelik kaplamalı panellerin daha düşük süneklik sergilediği ve gevrek davranışa daha yatkın olduğu ifade edilmiştir.

Pehlivan vd. (2025) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, çoklu panel sistemleri ve iki katlı duvar konfigürasyonlarının davranışını incelenmiş, özellikle panel tabanında oluşan kayma ve ankrāj yetersizliklerinin sistem kapasitesini sınırlayan kritik bir parametre olduğu gösterilmiştir. Uzun panellerde artan kesme kuvvetlerinin, ankrāj kapasitesinin yetersiz kalması durumunda erken göçmeye neden olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, mevcut literatürde yapılan çalışmaların büyük bir kısmı kaplama türü, çapraz düzeni ve bağlantı detaylarına odaklanmış olup, ankrāj düzeninin özellikle düşey yük etkisi altındaki panel davranışını üzerindeki etkisini doğrudan inceleyen çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, ankrāj detaylarının sistem davranışını üzerindeki etkisinin deneysel olarak incelenmesini gerekli kılmaktadır.

Hafif çelik panel sistemlerinde ankrāj elemanları, panelin temele yük aktarımını sağlayan ve özellikle yatay yükler altında panelin devrilmesini, kaymasını ve dönmesini engelleyen kritik birleşim elemanlarıdır. Yetersiz ankrāj kapasitesi veya uygun olmayan ankrāj düzeni, panelin yatay yük taşıma kapasitesinin önemli ölçüde azalmasına ve erken göçme mekanizmalarının oluşmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, ankrāj sayısı, ankrāj yerleşimi ve ankrāj detayları panelin rijitlik, dayanım ve enerji tüketme kapasitesi üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Literatürde hafif çelik panellerin davranışını üzerine birçok çalışma bulunmasına rağmen, farklı ankrāj düzenlerinin panel davranışını üzerindeki etkisini doğrudan karşılaştıran deneysel çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, ankrāj düzeninin panel davranışına etkisinin deneysel ve sayısal olarak araştırılmasını gerekli kılmaktadır.

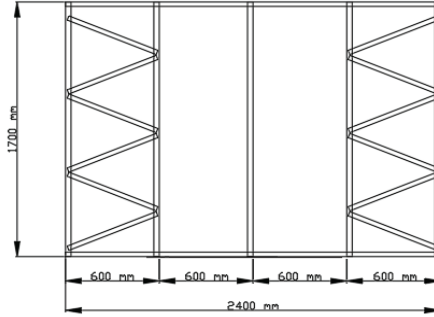
Bu çalışma kapsamında, 2 adet farklı konfigürasyona sahip panel elemanlarının düşey yük etkisi altındaki yatay yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, panel dikme elemanları olarak C140×35×10×1.5, alt ve üst başlık elemanları olarak U144×24×1.5 profili tercih edilmiştir. Malzeme olarak S350GD kalitesi kullanılmıştır. Çalışma kapsamında 4 adet numune deneysel olarak test edilmiştir. 2 numune de panelin her iki ucunda M10 ankrāj kullanılacaktır. 2 numune ise sadece 1 ucunda ankrāj çubuk kullanılacaktır. Sonuç olarak ankrājın kapasiteye etkisi incelenmesi hedeflenmektedir. Deneysel çalışmalar, Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Panel sistemleri HEB240 profili yardımıyla düşey yük uniform olarak yüklenmiştir. Bu profil üzerine 300 kN kapasiteli piston yardımı ile ucunda 2 adet ray sistemi ile 4 arabadan oluşan kayıcı mesnet kullanılarak düşey yük uygulanmıştır. Düşey yükün yanal deplasman oluşması durumunda sabit kalması için seri bağlı başka bir piston ve üzerindeki yük ile sağlanmışır. Yanal deplasman başka bir piston yardımı ile panelin üst kısmına denk gelecek şekilde uygulanmıştır. Çevrimsel yatay yükleme (quasi-statik) FEMA-461 (2007) protokolüne uygun olarak 14 adımda uygulanmıştır. Yüklenecek FEMA-461 yükleme protokolü Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1: FEMA-461 çevrimsel yükleme protokolü

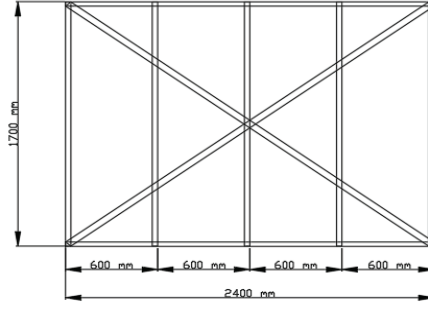
Deneysel Çalışmalar

Bu çalışmada 4 adet panel numunesi deneysel olarak test edilmiştir. Şekil 2’de gösterilen Model 1’in çerçeve sistemi 5 adet C profil ve 2 adet U profil kullanılarak 1.70 x 2.40 m ölçülerinde oluşturulmuştur. İlk iki kolon dikmesi ve son iki kolon dikmesinin arasına 650 mm uzunluğunda 5 adet U profilden oluşan çapraz elemanlar vidalar yardımıyla bağlanarak çaprazlı bir panel sistemi oluşturuldu.

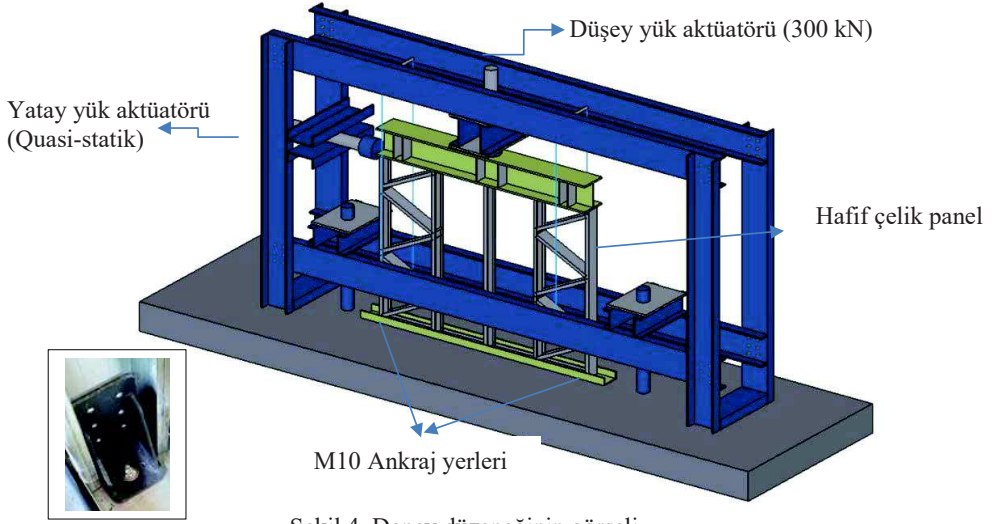


Şekil 2: Model 1 panelinin enkesit ölçüleri

Şekil 3’de gösterilen Model 2’ nin çerçeve sistemi 5 adet C profil ve 2 adet U profil kullanılarak 1.70 x 2.40 m ölçülerinde oluşturuldu. Panelde 2mm hafif çelik saclar ile çapraz plakalar yerleştirildi. Yerleştirilen 2 mm kalınlığındaki plakalar 3.9 mm çapında matkap uçlu vidalar ile dikmelere bağlantıları yapıldı.



Şekil 3: Model 2 panelinin enkesit ölçüleri



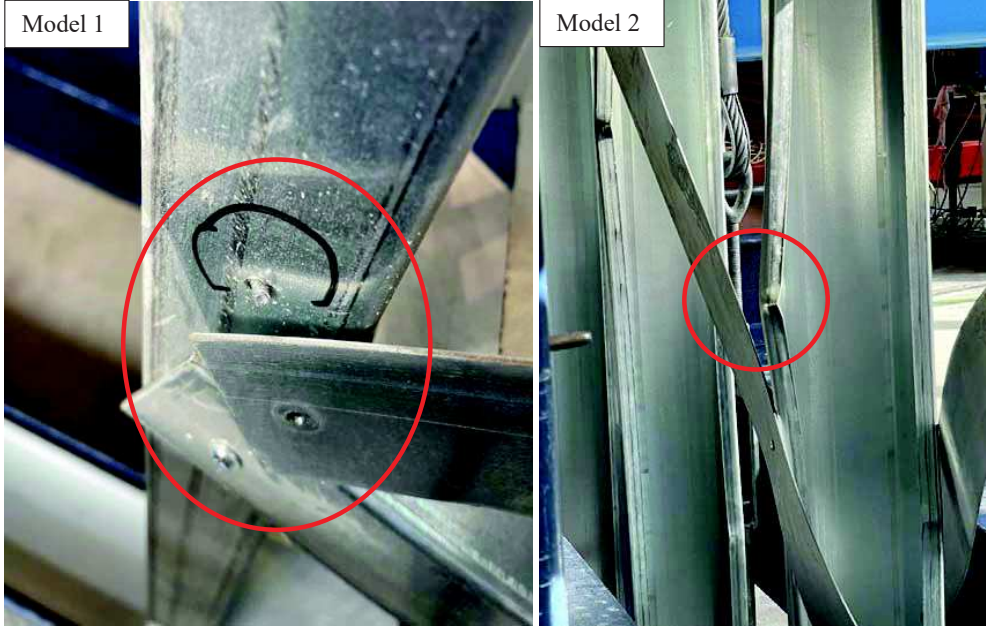
Şekil 4. Deney düzeneğinin görseli



Şekil 5. Model 1 ve Model 2'nin laboratuvarında oluşturulmuş görselleri

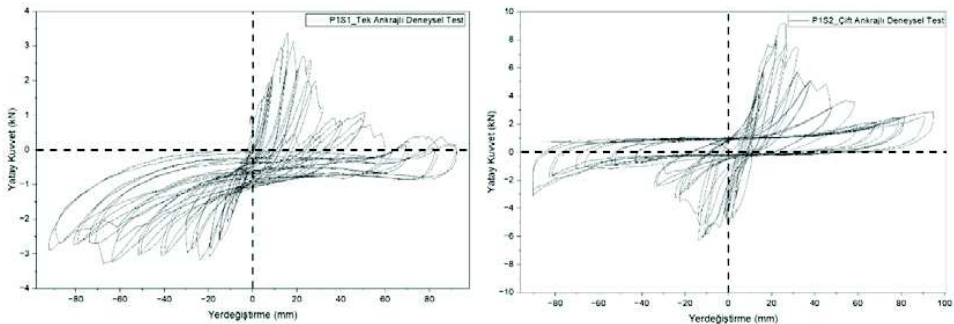
SONUÇ

Deneyel çalışmada 2 adet Model 1 için ve 2 adet Model 2 için toplamda 4 adet deneyel numune hazırlanıp test edilmiştir. Deney sonucunda numunelerde oluşan deformasyonlar Şekil 6'da verilmiştir. Model 1 de deney sonucunda çapraz elemanlarının vida bağlantılarında kopmalar gözlemlenmiştir. Model 2'de ise şerit olarak yerleştirilen 2mm kalınlığındaki çapraz elemanda düzlem dışı deformasyon olduğu ve Şekil 6 da gösterildiği gibi dikmelerde çapraz elemanın bağlandığı noktalarda yerel burulmalı-burkulma gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

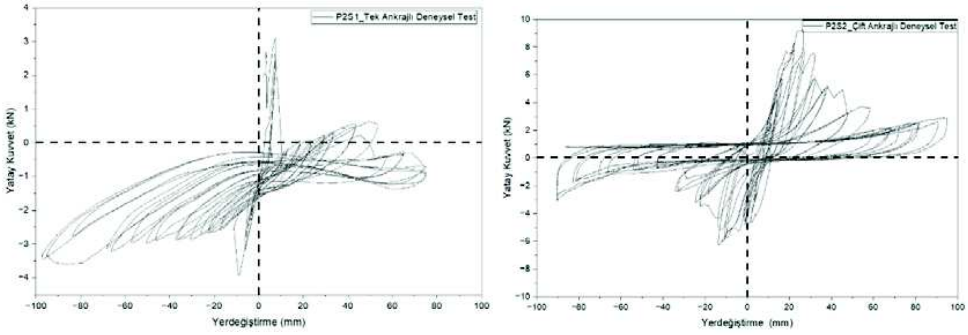


Şekil 6. Deney sonrasında Model 1 ve Model 2'de oluşan deformasyonlar

Deneyel çalışmalar sonucunda Model 1 ve Model 2 için yapılan tek ankranlı (P1S1 ve P2S1) ve çift ankranlı (P1S2 ve P2S2) hafif çelik panel numunelerinin çevrimsel yük altındaki davranışlarına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7'de ve Şekil 8'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar histeretik eğriler yardımıyla karşılaştırılmıştır ve ankranj sayısının panel davranışı üzerinde önemli bir etkisi olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 7. Model 1 için yapılan P1S1 ve P1S2 kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri



Şekil 8. Model 2 için yapılan P2S1 ve P2S2 kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri

Tek ankranlı panel numunesine ait histeretik eğriler incelendiğinde, yük–yer değiştirme eğrilerinde belirgin pinching (sıkışma) davranışı olduğu, çevrimler sırasında rijitlik kaybının hızlı gerçekleştiği ve enerji tüketme kapasitesinin sınırlı olduğu görülmüştür. Bunun temel nedeni, panelin ankrajsız tarafında çevrimsel yükler altında uplift (kalkma) ve taban dönmesi (rocking) davranışının oluşmasıdır. Bu durum panelin kesme duvarı gibi çalışmasını engellemiş ve sistem daha çok moment taşıyan bir mekanizma gibi davranmıştır. Bu nedenle tek ankranlı sistemde maksimum yatay yük taşıma kapasitesi daha düşük ve histeretis döngüleri daha dar olmuştur.

Çift ankranlı panel numunesine ait histeretik eğriler incelendiğinde ise, tek ankranlı numuneye göre daha geniş histeretik döngüler elde edildiği, maksimum yatay yük taşıma kapasitesinin önemli ölçüde arttığı ve sistemin daha yüksek enerji sönmleme kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Her iki uçta bulunan ankrāj çubukları sayesinde uplift(kalkma) davranışı büyük ölçüde engellenmiş, panel tabanında dönme azalmış ve sistem daha rijit bir kesme duvarı davranışı göstermiştir. Bu durum hem başlangıç rijitliğinin hem de maksimum dayanımın artmasına neden olmuştur.

Deney sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, ankrāj sayısının hafif çelik panel sistemlerin çevrimsel davranışında belirleyici bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır. Çift ankrāj kullanılan panellerin daha yüksek yatay yük taşıma kapasitesi, daha yüksek rijitlik ve daha yüksek enerji tüketme kapasitesi sağladığı belirlenmiştir. Bu nedenle sismik bölgelerde kullanılacak hafif çelik panel sistemlerinde çift ankranlı bağlantı detaylarının tercih edilmesi, yapı performansını önemli ölçüde artıracaktır.

KAYNAKLAR

- Schafer BW and Peköz T (1998) “Computational modeling of cold-formed steel: Characterizing geometric imperfections and residual stresses”, *Thin-Walled Structures*, 31(1–3):193–210
- Yu WW and LaBoube RA (2010) *Cold-Formed Steel Design*, 4th Ed., John Wiley & Sons, New Jersey
- Lopes, D. M., Duarte, A. P. C., & Silvestre, N. (2023). *Experimental investigation of light steel framing walls under horizontal loading*. *Buildings*, 13(3), Article 675. <https://doi.org/10.3390/buildings13030675>
- Pehlivan M, Aktaş Y and Yaman ZD (2025) “Experimental investigation of multi-panel light steel wall systems under lateral loading”, *Thin-Walled Structures*

İZMİR'DE ÇOKLU AFET RİSKLERİNİN AZALTI LMASI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA VİZYONU

A RESEARCH VISION ON THE REDUCTION OF MULTI-HAZARD RISKS IN İZMİR

Uğur DEMİR¹, Nefise AKDAĞ² ve Yavuz Selim KARAVİN³

ÖZET

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde (İYTE) kurulmakta olan İYTE Afet Yönetimi ve Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi, Türkiye'nin afet risk azaltma ve toplumsal dirençlilik hedefleri doğrultusunda ulusal ve uluslararası düzeyde öncü bir araştırma altyapısı sunmayı hedeflemektedir. Merkez, deprem, yangın, taşkın ve tsunami gibi çoklu afetlere yönelik sarsma masası, quasi-statik piston, eksenel yük uygulayabilen yangın fırını, taşkın ve tsunami simülasyon kanalları gibi deneysel sistemleri bünyesinde barındırarak, afetlerin fiziksel, sosyal, ekonomik ve çevresel etkilerini azaltmaya yönelik yenilikçi yöntemler geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu altyapı, Türkiye Afet Risk Azaltma Planı (TARAP), İzmir İl Risk Azaltma Planı (İRAP) ve 12. Kalkınma Planı ile uyumlu olarak, afet risklerinin belirlenmesi, yapı stoklarının performans değerlendirilmesi, güçlendirme tekniklerinin geliştirilmesi ve kültürel mirasın korunmasına yönelik kapsamlı disiplinler arası araştırmalara hizmet edecektir. Merkez, aynı zamanda uluslararası işbirlikleri ve sertifikalı eğitim programlarıyla toplumsal kapasiteyi artırmayı hedeflemektedir. Çalışma kapsamında Merkez'in kuruluş hikayesi, deneysel alt yapısı, İzmir'de çoklu afet risklerinin azaltılmasına yönelik çalışmalar yürüten İYTE'den bir araştırma vizyonu özetlenecektir.

Anahtar Kelimeler: Afet merkezi, Çoklu afetler, Deprem, Risk azaltma

ABSTRACT

The IZTECH Disaster Management and Technologies Research and Application Center, currently being established at the İzmir Institute of Technology (IZTECH), aims to provide a leading national and international research infrastructure aligned with Türkiye's disaster risk reduction and societal resilience objectives. The Center is designed to host advanced experimental systems addressing multi-hazard scenarios, including earthquakes, fires, floods, and tsunamis. Its infrastructure comprises a shaking table, a quasi-static loading actuator, a fire furnace capable of applying sustained axial loads, and flood and tsunami simulation flumes. Through this integrated experimental capacity, the Center seeks to develop innovative methodologies to mitigate the physical, social, economic, and environmental impacts of disasters. In alignment with the Türkiye Disaster Risk Mitigation Plan (TARAP), the İzmir City Risk Mitigation Plan (İRAP), and the 12th Development Plan of Türkiye, the Center will support comprehensive interdisciplinary research on disaster risk identification, performance assessment of existing building stock, development of strengthening techniques, and the protection of cultural heritage. In addition, the Center aims to enhance societal capacity through international collaborations and certified training programs. This study summarizes the establishment process of the Center, its experimental infrastructure, and the vision on multi-hazard risk reduction studies in İzmir.

Keywords: Disaster center, Earthquake, Multi-hazard, Risk reduction

¹ Dr. Öğr. Üyesi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, ugurdemir@iyte.edu.tr

² Lisansüstü Öğrenci, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, nefiseakdag@iyte.edu.tr

³ Lisansüstü Öğrenci, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, yavuzkaravin@iyte.edu.tr

GİRİŞ

Türkiye, aktif tektonik yapısı ve iklim değişikliği nedeniyle çoklu afet tehlikelerine maruz kalan ülkeler arasında yer almaktadır. Depremler, kentsel yangınlar, taşkınlar, kıyı taşkınları ve tsunami etkileri; yalnızca fiziksel hasar oluşturan olaylar olarak değil, aynı zamanda sosyal, ekonomik ve çevresel kayıpları derinleştiren karmaşık risk süreçleri olarak değerlendirilmelidir. Özellikle afet etkilerinin yoğun yapılaşmış kentlerde, yaşanan yapı stokları ve yetersiz dirençlilik koşulları ile birleşmesi, risk azaltma çalışmalarında disiplinler arası ve deneysel veriyle desteklenen yaklaşımları zorunlu hâle getirmektedir.

İzmir ili, aktif fay hatlarına yakınlığı, yoğun kıyı yerleşimleri ve heterojen yapı stoku nedeniyle deprem, kentsel yangın ve taşkın risklerinin kesiştiği bir metropol olarak öne çıkmaktadır. İl sınırları içerisinde, İzmir, Seferihisar, Tuzla ve Gülbahçe gibi geçmişte yıkıcı depremler üretmiş faylar başta olmak üzere 10'un üzerinde aktif fay bulunmakta; son yıllarda İzmir ve çevresinde meydana gelen şiddetli depremler de bölgedeki sismik riskin önemini ortaya koymaktadır (Emre vd., 2005; Binici vd., 2022). Buna ek olarak, yangınlar da ciddi can kaybı, yaralanma ve ekonomik zararlar bakımından önemli bir risk alanı oluşturmaktadır. İzmir Büyükşehir Belediyesi (İzBB) İtfaiye Dairesi Başkanlığı'nın 2025 yılı verilerine göre, il genelinde 15.767 yangına müdahale edilmiş; bu olaylarda 18 kişi hayatını kaybetmiş, 285 kişi yaralanmış ve yaklaşık 11,19 milyar TL düzeyinde maddi zarar meydana gelmiştir (İzBB, 2025). Toplam yangınların yaklaşık dörtte birinin yapısal yangınlardan oluşması, özellikle yoğun yapılaşmış kentsel alanlarda yangın güvenliği ile yangın sonrası performans değerlendirmesinin afet risk azaltma politikalarıyla birlikte ele alınmasının gerekliliğini göstermektedir. Öte yandan, iklim değişikliğine bağlı aşırı hava olayları ve hızlı kentleşme, taşkınla ilişkili tehlikeleri de kıyı metropollerinde giderek artırmaktadır (Xu vd., 2023). İzmir, yoğun nüfusu, kıyı yerleşimleri ve kritik altyapıları nedeniyle bu riskler açısından öne çıkmakta olup, bu durum risk azaltma stratejilerinin afet yönetimi çalışmalarına entegre edilmesini büyük ölçüde gerekli kılmaktadır (Saravi vd., 2019). Özellikle İzmir gibi bir metropolde mevcut yapı stokunun önemli bir kısmının hem deprem hem de yangın etkileri altında yeterli performansı sağlayamaması, yapı mekaniği alanında deneysel ve analitik araştırmaların kent ölçeğindeki risk azaltma stratejileri ile ilişkilendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bununla birlikte, Türkiye'de yapı sistemlerinin çoklu afet etkileri altındaki davranışını deneysel olarak inceleyebilecek kapsamlı araştırma altyapılarının sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, yapı mekaniği alanında deneysel veri üretiminin artırılması ve bu verilerin sayısal modellerle desteklenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Son yıllarda afet yönetimi anlayışında müdahale odaklı yaklaşımdan risk azaltma ve dirençlilik odaklı yönetim modeline doğru belirgin bir dönüşüm yaşanmaktadır. Türkiye Afet Risk Azaltma Planı (TARAP), İl Risk Azaltma Planları (İRAP) ve üst ölçekli kalkınma politikaları, afet risklerinin bilimsel yöntemlerle belirlenmesini, üniversite-kamu iş birliklerinin güçlendirilmesini ve araştırma altyapılarının geliştirilmesini öncelikli alanlar arasında tanımlamaktadır (AFAD, 2022). Bu bağlamda, yapı mekaniği, afet mühendisliği, malzeme bilimi, hidrodinamik modelleme ve risk analizi çalışmalarını aynı çatı altında bir araya getirecek bir araştırma merkezinin kurulması, yalnızca akademik açıdan değil, bölgesel afet dirençliliği bakımından da stratejik bir gereklilik hâline gelmektedir. Bu ihtiyaçtan hareketle İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (İYTE) bünyesinde Afet Yönetimi ve Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi kurulmuştur.

Bu çalışma kapsamında, İYTE Afet Merkezi'nin kuruluş amacı, kuruluş süreci, planlanan laboratuvar altyapısı, merkezin oluşumuna katkı sağlayan araştırma projeleri ve merkez bünyesinde yürütülmesi planlanan çalışmalar özetlenmektedir. Ayrıca merkezin, İzmir'de çoklu afet risklerinin azaltılmasına ve yapı mekaniği laboratuvarları alanındaki deneysel kapasitenin geliştirilmesine sağlayacağı katkılar tartışılmaktadır.

İYTE AFET MERKEZİ'NİN ARAŞTIRMA VİZYONU

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü bünyesinde kurulmakta olan Afet Yönetimi ve Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi, çoklu afet etkileri altındaki yapısal davranışın deneysel ve analitik yöntemlerle incelenmesini hedefleyen disiplinler arası bir araştırma altyapısı olarak

tasarlanmaktadır. Merkez kapsamında inşa edilmekte olan laboratuvar binası, deprem, yangın ve hidrodinamik etkilerin yapı sistemleri üzerindeki davranışını inceleyebilecek deneysel sistemleri içerecek şekilde planlanmıştır. Merkezin kuruluş gerekçesi yalnızca yeni bir laboratuvar alanı oluşturmak değildir. Esas hedef; sahadan veri toplayan, deneysel sonuç üreten, sayısal modeller geliştiren, kent ölçeğinde risk değerlendirmeleri yapan ve elde edilen bilgiyi eğitim, uygulama ve politika geliştirme süreçlerine aktarabilen bütünlük bir afet araştırma ekosistemi oluşturmaktır. Bu yönüyle merkez, yapı mekaniği laboratuvarı niteliğini aşan; afet mühendisliği, mimarlık, şehircilik, malzeme bilimi ve çevresel risk araştırmalarını aynı çatı altında buluşturan bir platform olarak tasarlanmaktadır

Merkezin Fiziksel Altyapısı

İYTE Afet Yönetimi ve Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi'nin fiziksel altyapısının oluşturulma süreci, İYTE Rektörlüğü ile çeşitli derneklerin sağladığı iş birliği ve destekler doğrultusunda şekillenmektedir. Merkezin laboratuvar binası, İYTE Gülbahçe Kampüsü'nde konumlanacak şekilde planlanmış olup, afet araştırmalarına hizmet edecek bir laboratuvar yapısı niteliğinde inşa edilmektedir. Mevcut durumda yapım süreci devam eden bu fiziksel altyapının, merkez bünyesinde yürütülmesi planlanan deprem, yangın, taşkın ve diğer afet odaklı deneysel ve uygulamalı araştırmalar için kurumsal ve mekânsal bir zemin oluşturması hedeflenmektedir. Merkezin kurulacağı kampüs içindeki alan Şekil 1a'da, merkezin 3 boyutlu görseli ise Şekil 1b'de sunulmuştur.



a) b)
Şekil 1. İYTE Afet Yönetimi ve Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi: a) kurulacağı kampüs içindeki alan ve b) merkezin 3D görseli.

Planlanan Deneysel Altyapı

İYTE Afet Merkezi bünyesinde oluşturulacak laboratuvar altyapısı, çoklu afet etkileri altındaki yapısal davranışın incelenmesine hizmet edecek şekilde planlanmaktadır. Bu kapsamda merkezde yer alacak başlıca deneysel sistemler aşağıda özetlenmiştir.

(i) Sarsma tablası, yapı elemanları ve ölçekli/gerçek boyutlu yapısal sistemlerin deprem etkileri altındaki dinamik davranışının incelenmesine olanak sağlayacaktır. Bu sistem ile taşıyıcı sistemlerin, yığma duvar örneklerinin, güçlendirilmiş elemanların ve yenilikçi yapı bileşenlerinin sismik performansı değerlendirilebilecektir.

(ii) Merkezde planlanan quasi-statik yükleme altyapısı; hidrolik yatay yük uygulayan piston, reaksiyon duvarı ve adaptör temel bileşenlerinden oluşacaktır. Bu düzenek sayesinde duvar, çerçeve, birleşim bölgesi ve alt-sistem ölçeğindeki numuneler üzerinde çevrimsel yükleme deneyleri gerçekleştirilebilecektir. Böylece özellikle mevcut yapı stoğuna ait elemanların göçme mekanizmaları, rijitlik kaybı, enerji tüketimi ve güçlendirme etkinliği ayrıntılı biçimde incelenebilecektir. Bu altyapı ile planlanan bir yığma duvar numunesi deprem deneyi düzeneğinin temsili görseli Şekil 2'de verilmiştir.

Araştırma Üniversiteleri Destek Programı (ADEP) Projeleri

Araştırma Üniversiteleri Destek Programı kapsamındaki 2025 ve 2026 yılında hazırlanan projeler, İzmir’de çoklu afet risklerinin belirlenmesine yönelik bütünsel bir metodolojik çerçeve oluşturmayı hedeflemektedir. Bu kapsamda deprem, yangın ve taşkın riskleri tekil tehlikeler olarak değil, aynı kentsel sistem üzerinde ardışık veya eş zamanlı etkiler oluşturabilen risk bileşenleri olarak ele alınmaktadır. Projeler çerçevesinde bina envanteri üretimi, hızlı deprem performans değerlendirme yaklaşımları, yapı-zemin etkileşimi ve sivilaşma araştırmaları, kıyı taşkını ve tsunami etkilerinin fiziksel model deneyleri gibi çalışmalar yürütülmektedir.

TÜBİTAK 1001-AFAD Ulusal Deprem Araştırma Programı Projesi (UDAP)

Merkezin oluşumuna içerik bakımından en güçlü katkılardan biri, Urla Yarımadası taş yığma yapı stokunun deprem performansına odaklanan TÜBİTAK-AFAD UDAP projesidir. Bu proje kapsamında bölgedeki mevcut yapı stoku envanteri oluşturulmuş, yapı tipolojileri belirlenmiş ve saha verisine dayalı bir sınıflandırma altyapısı geliştirilmiştir. Toplanan veriler açık erişim biçimde Harvard Dataverse platformunda paylaşılmıştır (Karavin vd., 2025). Proje kapsamında ayrıca taş ve tuğla birimlerin malzeme özellikleri mikro yapısal analizler ile incelenmekte; yığma duvar numuneleri üzerinde çevrimsel yükleme deneyleri ve sayısal modelleme çalışmaları planlanmaktadır. Proje, mevcut yığma yapı stokunun sismik davranışının anlaşılması ve bu yapılara uygun güçlendirme önerilerinin geliştirilmesi bakımından merkezin deprem araştırmaları eksenine doğrudan katkı sunmaktadır.

TÜBİTAK-1001 Projesi

Merkezin yangın araştırmaları eksenini besleyen önemli çalışmalardan biri, betonarme elemanların yangın sonrası davranışına odaklanan TÜBİTAK 1001 projesidir. Bu proje kapsamında çok sayıda beton ve betonarme numune kontrollü sıcaklık programları altında yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmakta, ardından farklı onarım ve güçlendirme yaklaşımları ile yeniden değerlendirilmektedir. FRP kompozit sistemler, lif takviyeli harçlar ve yangından korunma amaçlı yenilikçi malzemeler bu deneysel programın önemli bileşenlerini oluşturmaktadır. Proje çıktıları, merkezin elektrikli yangın fırını ve mekanik yükleme kapasitesi ile birleştiğinde, yangın sonrası yapısal performans konusunda ileri düzey deneysel araştırmaların yürütülmesine olanak sağlayacaktır.

Horizon Europe-Twinning Projesi

Başvuru aşamasında bulunan Horizon Europe WIDERA Twinning projesi, İYTE’nin çoklu afet risklerinin değerlendirilmesi ve azaltılması alanındaki uluslararası araştırma kapasitesini güçlendirmeyi hedeflemektedir. Bu proje kapsamında deprem, kentsel yangın, orman-kent arayüzü yangınları, taşkın ve kıyı etkileri gibi farklı tehlikeler için uluslararası ortaklarla bilgi transferi, araştırmacı hareketliliği, eğitim faaliyetleri ve pilot risk modellemeleri planlanmaktadır. Twinning projesi, merkezin yalnızca fiziksel bir laboratuvar değil; aynı zamanda uluslararası iş birlikleriyle büyüyen bir araştırma platformu olmasına hizmet edecektir.

Diğer Proje Hazırlıkları

Merkezle ilişkili araştırma ekibi ayrıca afet risklerinin azaltılması, yapı stokunun belgelenmesi, yangın etkileri sonrası performans değerlendirmesi, yığma ve betonarme sistemlerin güçlendirilmesi, kıyı ve taşkın afetleri ile kültürel mirasın korunması gibi temalarda yeni TUBİTAK 1001 ve 1505 projeleri hazırlıkları yürütmektedir. Bu anlamda merkez, mevcut projelerin çıktılarıyla beslenen ve yeni proje fikirlerinin hayata geçirilmesine zemin hazırlayan canlı bir araştırma ekosistemi sunmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü bünyesinde kurulmakta olan Afet Yönetimi ve Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi'nin deneysel araştırma altyapısı ve bu altyapı ile ilişkili olarak yürütülen araştırma projeleri tanıtılmıştır. Merkez, deprem, yangın ve hidrodinamik afet etkilerinin yapı sistemleri üzerindeki davranışını inceleyebilecek deneysel sistemleri içeren disiplinler arası bir araştırma altyapısı olarak tasarlanmaktadır. Merkezin araştırma programı, kent ölçeğinde afet risklerinin belirlenmesine yönelik yürütülen AUDP projeleri ile yapı elemanlarının davranışını inceleyen deneysel araştırmaları içeren TÜBİTAK projelerinin bütünlük bir çerçevede ele alınmasına dayanmaktadır. AUDP projeleri kapsamında İzmir kentinde çoklu afet risklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar yürütülürken, TÜBİTAK projeleri kapsamında kagir yapıların deprem davranışı ile düşük dayanımlı betonarme elemanların yangın sonrası performansı deneysel ve analitik yöntemlerle incelenmektedir. Planlanan laboratuvar altyapısı sayesinde yapı elemanlarının deprem, yüksek sıcaklık ve hidrodinamik yükler altındaki davranışı deneysel olarak incelenebilecek ve elde edilen veriler sayısal modelleme çalışmaları ile desteklenebilecektir. Aynı zamanda merkez, yalnızca deneysel çalışmaların yürütüldüğü bir laboratuvar olmanın ötesinde, yapı mekaniği alanında disiplinler arası araştırmaların geliştirildiği ve afet risklerinin azaltılmasına yönelik bilimsel bilgi üretiminin desteklendiği bir araştırma platformu olarak kurgulanmaktadır. Kurulmakta olan altyapının tamamlanmasıyla birlikte merkezin, Türkiye'de afet etkileri altındaki yapısal davranışın deneysel olarak incelenmesine yönelik yürütülen araştırmalara önemli katkılar sağlaması ve ulusal ölçekte bir araştırma odağı oluşturması hedeflenmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen 124M705 ve 225M612 numaralı projeler ile İYTE Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından ADEP projesi kapsamında desteklenen 2024İYTE-2-0019 numaralı proje çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, İYTE Afet Yönetimi ve Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi'nin kuruluş sürecine sağladıkları katkılar nedeniyle Çeşme ve Yarımada Müteahhit ve İş İnsanları Derneği'ne (ÇEŞMÜD) ve ULEMA ve ULEMA Mimarlık'a teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Binici B, Yakut A and Tuncay K (2022) "Identifying buildings with high collapse risk based on Samos earthquake damage inventory in İzmir" *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(14), 7853–7872.
- Emre Ö, Özalp S and Göktaş F (2005) "İzmir Yakın Çevresinin Diri Fayları ve Deprem Potansiyelleri" *MTA Rapor No: 10754*.
- İzmir Büyükşehir Belediyesi İtfaiye Daire Başkanlığı (2025). "2025 Yılı Yangın İstatistikleri". <https://itfaiye.izmir.bel.tr/tr/IstatistikDetay/8820/9/2025>, Son erişim tarihi: 29 Mart 2026.
- Karavin YS, Kahraman Y, Akıs T and Demir, U (2025). "Architectural and Structural Features of 120 Stone Masonry Buildings in Urla Peninsula" *Harvard Dataverse*, V2.
- Saravi M, Şen Z and Yazıcı A (2019) "Evaluation of Turkey's flood management policies under climate change." *Water Resources Management*, 33(12), 4135–4152.
- T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) (2022) "Türkiye Afet Risk Azaltma Planı (TARAP)". Ankara.
- Xu H, Chen W and Yang S (2023) "Coastal flood risk under sea-level rise and extreme precipitation: a global assessment" *Environmental Research Letters*, 18(4), 045006.

DOĞAL LİF TAKVİYELİ KOMPOZİT ŞERİTLERLE BETONARME KİRİŞLERİN KESME DAYANIMININ ARTIRILMASI

IMPROVING THE SHEAR STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS USING NATURAL FIBER-REINFORCED COMPOSITE STRIPS

Hasan Murat TANARSLAN¹, Cihan KARADEMİR², Hasan ATEŞ³, Mustafa Furkan
GÜLER⁴, Çağlar YALÇINKAYA⁵, Mehmet KORKMAZ⁶ ve Faruk OGÜN⁷

ÖZET

Çalışma kapsamında doğal lif esaslı kompozitlerin betonarme kirişlerin kesme davranışının iyileştirilmesinde katkısı deneysel olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda kenevir lifleri ve kenevir kumaş kullanılarak hem güçlendirme uygulamalarında verimliliğin artırılması hem de sürdürülebilir ve düşük karbon ayak izine sahip endüstriyel malzemelerin kullanılması hedeflenmiştir. Vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiş kenevir takviyeli kompozitler, kesme dayanımını artırmak için betonarme kirişlere 10 cm genişliğinde şeritler halinde uygulanmıştır. Güçlendirilmiş iki adet kiriş numunesinin dayanım ve davranışı referans elaman ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, kenevir kumaş ile güçlendirilen kirişlerde yaklaşık %59–63 oranında dayanım artışı ve 6,41–7,48 kat enerji tüketim kapasitesinde artış elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, doğal lif esaslı güçlendirme malzemelerinin üretim içeriğine ve uygulama geometrisinin güçlendirme üzerinde belirleyici olduğu ve uygun tasarım ile kenevir esaslı kompozitlerin etkin bir güçlendirme alternatifi sunabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme, Güçlendirme, Kompozit, Sürdürülebilirlik.

ABSTRACT

Within the scope of this study, the contribution of natural fiber-based composites to improving the shear behavior of reinforced concrete beams was experimentally evaluated. In this context, the use of hemp fibers and hemp fabric aimed to both increase the efficiency of strengthening applications and utilize sustainable industrial materials with a low carbon footprint. Hemp-reinforced composites produced by vacuum infusion were applied to reinforced concrete beams in 10 cm-wide strips to increase shear strength. The strength and behavior of three strengthened beam specimens were compared with a reference beam. According to the test results, the beams strengthened with hemp fabric showed approximately 59–63% increases in strength and 6.41–7.48 times increases in energy absorption capacity. The findings indicate that both the composite material composition and the application geometry play a critical role in strengthening performance, and that properly designed hemp-based composites can provide an effective alternative for structural strengthening applications.

Keywords: Reinforced concrete, Reinforcement, Composite, Sustainability

¹ Prof. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, murat.tanarслан@deu.edu.tr

² Öğr. Gör. Dr., İzmir Konak Meslek Yüksekokulu, İzmir, cihan.karademir@konak.edu.tr

³ Öğr. Gör. Dr., Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin, h.ates@artvin.edu.tr

⁴ Aras. Gör., Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Aydın, m.furkan.guler@adu.edu.tr

⁵ Doc. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, caglar.yalcinkaya@deu.edu.tr

⁶ Doc. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, mehmet.korkmaz@deu.edu.tr

⁷ Öğr. Gör., Gazi Üniversitesi, Ankara, fagun@gazi.edu.tr

GİRİŞ

Betonarme yapı elemanlarının taşıma kapasitesi; işçilik hataları, uygun olmayan beton ve/veya donatı kullanımı, tasarım hataları ve deprem hasarları gibi birçok nedenden etkilenebilmektedir (Ersoy vd., 2019). Zaman içerisinde korozyon gibi çevresel etkiler sonucu çelik donatının kesit alanının ve mekanik özelliklerinin azalması, taşıma gücü kapasitesinde önemli kayıplara yol açabilmektedir (Azad vd., 2007). Bu tip istenmeyen durumlar özellikle kesme dayanımı yetersiz betonarme elemanlar, ani ve gevrek göçme davranışı sergileyerek yapısal güvenliği ciddi şekilde tehdit etmektedir.

Literatürde, taşıma gücü yetersiz elemanların güçlendirilmesine yönelik olarak mantolama, çelik plaka veya levha kullanımı sıkça tercih edilen güçlendirme yöntemlerindedir. Ayrıca, karbon, bazalt, aramid ve cam gibi liflerle üretilmiş kompozit malzemelerde güçlendirmede kullanılmaktadır (İbrahim vd., 2020; Sen ve Reddy, 2014). Bu yöntemlerin betonarme elemanlara sağladığı katkılar ve dezavantajları literatürde yer alan çeşitli çalışmalar kapsamında değerlendirilmiştir (Yinh vd., 2021). Ancak geleneksel güçlendirme yöntemlerinin yüksek maliyet, yüksek karbon ayak izi ve sınırlı sürdürülebilirlik gibi dezavantajları, alternatif malzeme ve yöntemlerin araştırılması gerekliliğini ortaya koymuştur.

Son yıllarda doğal lif takviyeli polimer kompozitler, yapı güçlendirme uygulamalarında sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Jirawattanasomkul vd., 2020). Ketan, jüt, sisal ve kenevir gibi doğal lifler; düşük maliyet, hafiflik, yenilenebilirlik ve düşük karbon ayak izi gibi önemli avantajlar sunmaktadır (Faruk vd., 2012). Kenevir lifleri ise yüksek özgül mukavemet ve gelişmiş hücresel yapısı sayesinde diğer doğal liflere kıyasla avantajlı mekanik özellikler sergileyebilmektedir (Pickering vd., 2016; Yan vd., 2014).

Betonarme yapıların güçlendirilmesinde doğal lif esaslı kompozitlerin kullanımı, sürdürülebilirlik hedefleri açısından son derece önemlidir. Bu çalışmada, kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin kesme dayanımını artırmak amacıyla, farklı formlarda kenevir takviyeli kompozitlerin (kumaş ve lif formunda) güçlendirme malzemesi olarak kullanımı ile elde edilebilecek katkı incelenmiştir. Geliştirilen kompozitlerin düşük maliyetli, sürdürülebilir ve sahada uygulanabilir olması hedeflenmiştir.

DENEYSSEL ÇALIŞMA

Doğal Lif Takviyeli Kompozitlerin Üretilmesi

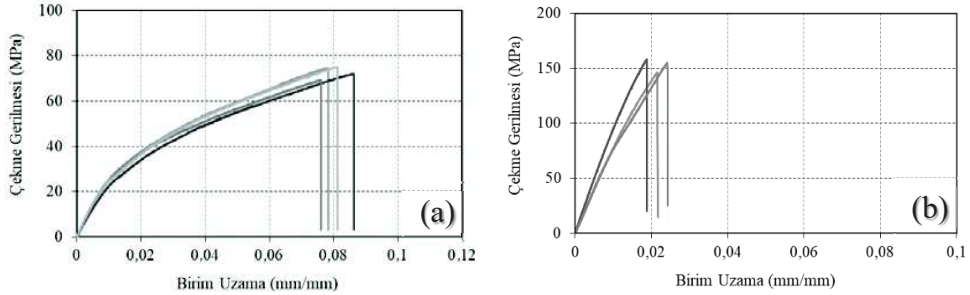
Çalışma kapsamında güçlendirmede kullanılmak üzere doğal lif takviyeli polimer matrisli kompozitlerin geliştirilmesi ve bu malzemelerin kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlere sağlayacağı katkının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda kompozitlerde bağ elemanı olarak epoksi tercih edilmiş, üretim sürecinde kompozit yapı içerisindeki boşlukların minimize edilmesi ve homojen bir yapı elde edilmesi amacıyla vakum infüzyon yöntemi kullanılmıştır. Kompozit üretiminde takviye elemanı olarak dokuma kenevir kumaş ve endüstriyel kenevir lifleri kullanılmıştır. Kullanılan doğal takviye malzemeleri Şekil 1.'de verilmiştir.



Şekil 1. Endüstriyel kenevir lif (a) ve kenevir kumaş (b)

Üretilen kompozit numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla ASTM D 3039 standardına uygun çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre dayanım, kopma uzaması, elastisite modülü ve tokluk gibi temel malzeme parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen deneysel veriler doğrultusunda, kenevir kumaş ve kenevir lif takviyeli kompozitlerin betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılmasına uygun kompozit sistem belirlenmiştir.

Kupon testleri sonucunda elde edilen gerilme–birim uzama davranışları incelendiğinde, farklı takviye formuna sahip kompozitlerin belirgin şekilde farklı mekanik karakteristikler sergilediği görülmüştür (Şekil 2). Dokuma kenevir kumaş ile üretilen kompozit, çok yönlü lif dağılımı sayesinde daha yüksek deformasyon kapasitesi ve sünek davranış sergilerken, kenevir liflerinin tek doğrultuda matris içerisinde yerleştirilmesiyle elde edilen kompozit daha yüksek dayanım değerlerine ulaşmış ancak daha sınırlı deformasyon kapasitesi göstermiştir. Bu farklı davranışlar, kompozitlerin yapısal uygulamalarda farklı performans gereksinimlerine göre kullanılabilceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 2. Kenevir kumaş takviyeli (a) ve kenevir lif takviyeli (b) kompozitlere ait çekme gerilmesi–birim uzama grafikleri

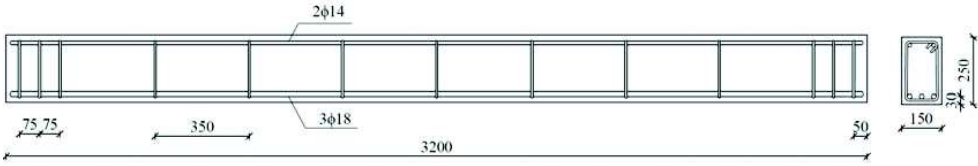
Kupon test sonuçları doğrultusunda, doğal lif takviyeli kompozit numuneler güçlendirme uygulamalarında kullanılmak üzere betonarme kirişe uygulanabilecek boyutlarda üretilmiştir. Bilimsel araştırma projesi kapsamında yürütülen çalışmada lif hacim oranı ve epoksi hacim oranına ilişkin detaylar proje henüz tamamlanmadığı için bu aşamada sunulmamış olup elde edilen sonuçlar Tablo 1.'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Kompozitlerin mekanik test sonuçları

Numune Gösterim	Taviye Malzemesi	Kalınlık (mm)	Ortalama Kopma Uzaması (%)	Ortalama Elastisite (GPa)	Ortalama Kuvvet (N)	Tokluk (N.mm)	Ortalama Çekme (MPa)
N1	Kenevir kumaş	1,9	8,0	8,2	3417,9	1818,8	72,8
N2	Kenevir lif	1,2	2,1	1,8	4198,8	4581,9	146,4

Betonarme Eleman Deneyleri

Deneysel çalışma kapsamında kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin dört noktalı eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney elemanları 20 MPa beton basınç dayanımına sahip olup geometrik özellikleri ile donatı düzenleri Şekil 3'de sunulmuştur. Test kirişlerinin geometrik boyutları ve donatı yerleşimleri benzerdir. Deney elemanlarında kesme davranışının baskın olmasını sağlamak amacıyla a/d oranı 5,11 olacak şekilde test edilmiştir. Betonarme kirişlerde kesme donatıları Ø8 çapında S420a donatılar 350 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Betonarme kirişlerde boyuna donatılar çekme bölgesinde 3Ø18 ve basınç bölgesinde 2Ø14'dir.



Şekil 3. Betonarme kirişlerin donatı detayları

Çalışma kapsamında, biri referans numunesi olmak üzere toplam üç adet betonarme deney elemanı, geliştirilen doğal lif takviyeli kompozitlerin kesme dayanımına katkısını belirlemek amacıyla hazırlanmış ve test edilmiştir. Kompozitlerin kirişlere yapıştırılmasından önce betonarme kiriş yüzeylerinde uygun aderansın sağlanabilmesi amacıyla taşlanmıştır. Yüzey hazırlığının ardından, kompozit şeritler Sikadur 31 epoksi yapıştırıcı kullanılarak kirişlere yapıştırılmış ve numuneler 14 gün süreyle kür koşullarında bekletildikten sonra test edilmiştir.

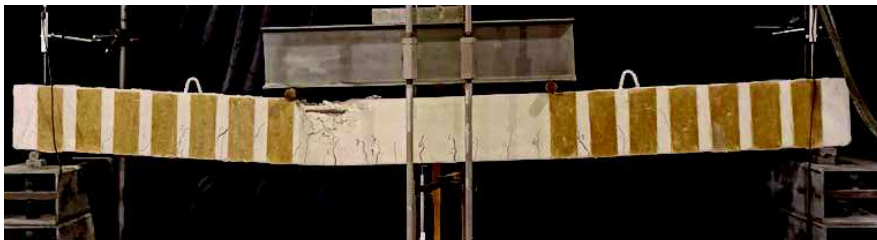
DENEY SONUÇLARI

Deneysel program kapsamında test edilen referans numunesi Kiriş-1'de ilk eğilme çatlağı yaklaşık 19,14 kN yük seviyesinde ve 3,73 mm yer değiştirme değerinde gözlemlenmiştir. Yük artışı ile birlikte çatlak gelişimi ilerlemiş ve yükün 69,83 kN seviyesine ulaşmasıyla numune kesme etkisi altında ani göçme davranışı sergilemiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Yükleme sonrası Kiriş-1

Kiriş-2 numunesi, kesme bölgesinde kiriş yan yüzeylerine 10 cm genişliğinde ve 5 cm aralıklarla düşey doğrultuda yerleştirilen kenevir lif takviyeli kompozit şeritlerle güçlendirilmiştir. Bu numunede ilk eğilme çatlağı 26,20 kN yük ve 4,42 mm yer değiştirme seviyesinde gözlemlenmiştir. Artan yükler altında çatlak sayısında ve yayılımında artış meydana gelmiştir. İlk kesme çatlağı 73,02 kN yük seviyesinde oluşmuş ve yük artışına bağlı olarak yeni kesme çatlakları gelişmiştir. Kompozit şeritlerin etkisiyle kesme çatlaklarının ilerlemesi sınırlandırılmış ve çatlak yayılımı kontrol altında tutulmuştur. Deney süresince kompozit şeritlerde herhangi bir sıyrılma gözlenmemiştir. Numune 113,7 kN yük seviyesinde maksimum taşıma kapasitesine ulaşmış, ardından beton basınç bölgesinde meydana gelen ezilme ile göçme gerçekleşmiştir (Şekil 5). Elde edilen bulgular, doğal lif takviyeli kompozit şeritlerin kesme davranışının iyileştirilmesi, çatlak kontrolü ve taşıma kapasitesinin artırılması açısından etkili olduğunu göstermektedir.



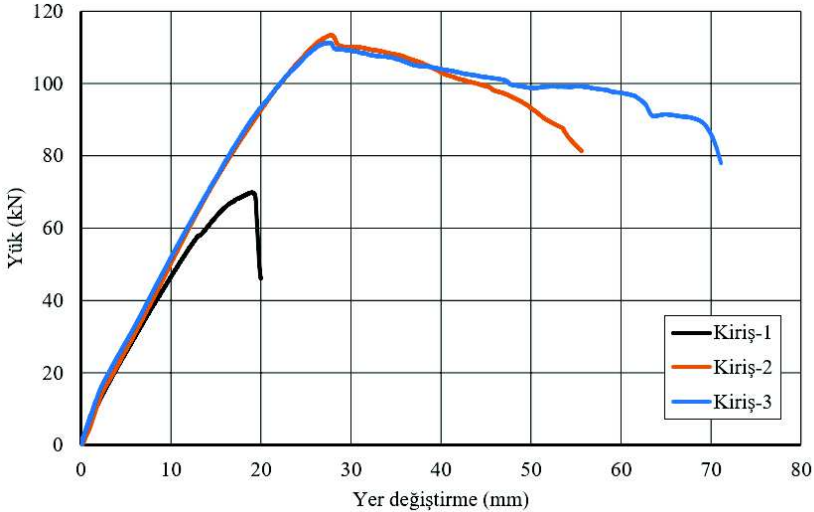
Şekil 5. Yükleme sonrası Kiriş-2

Kiriş-3 numunesi, kesme bölgesinde kiriş yan yüzeylerine 10 cm genişliğinde ve 5 cm aralıklarla düşey doğrultuda yerleştirilen kenevir kumaş takviyeli kompozit şeritlerle güçlendirilmiştir. Bu numunede ilk eğilme çatlağı yaklaşık 33,46 kN yük ve 5,57 mm yer değiştirme seviyesinde gözlemlenmiştir. Artan yükler altında eğilme çatlaklarının sayısında ve yayılımında artış meydana gelmiştir. 90 kN yük seviyesinde ulaştığında kesme bölgesinde kesme çatlakları gelişmeye başlamıştır. Kompozit şeritlerin etkisiyle kesme çatlaklarının ilerlemesi sınırlandırılmış ve kirişin ani olarak kesmeden göçmesi engellenmiştir. 110,80 kN yük seviyesinde boyuna donatı akma durumuna ulaşmış, 111,2 kN yük seviyesi ile kiriş maksimum taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Kiriş deneyi basınç bölgesinde beton ezilinceye kadar sürdürülmüş ve ardından sonlandırılmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Yükleme sonrası Kiriş-3

Deneysel program kapsamında elde edilen yük-deplasman eğrileri Şekil 7'de sunulmuştur. Kiriş-1'in deneysel çalışmanın referans numunesi olup kiriş kesme etkisi altında ani ve gevrek bir göçmüştür. Doğal lif takviyeli kompozit şeritlerle güçlendirilen Kiriş-2 ve Kiriş-3'te ise çatlak gelişiminin daha kontrollü gerçekleştiği, kesme çatlaklarının ilerlemesinin sınırlandırıldığı ve taşıma kapasitesinin belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Güçlendirilmiş numunelerde kesme çatlaklarının kritik seviyeye ulaşmasının geciktirilmesiyle birlikte göçme mekanizmasının değiştiği, kesme kırılması yerine beton basınç bölgesinde ezilme ile karakterize edilen daha sünek bir eğilme davranışı elde edilmiştir. Bu durum, uygulanan şerit tipi doğal lif takviyeli kompozit güçlendirme yönteminin yalnızca taşıma kapasitesini artırmakla kalmayıp aynı zamanda kırılma modunu daha güvenli ve öngörülebilir bir davranışa dönüştürdüğünü göstermektedir.



Şekil 7. Betonarme kirişlerin yük-yer değiştirme eğrileri

SONUÇLAR

Çalışma kapsamında, doğal lif takviyeli kompozit şeritlerle güçlendirilen betonarme kirişlerin kesme davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Referans numunesi Kiriş-1 ani ve gevrek bir şekilde kesmeden göçmüştür. Kompozit şeritlerle güçlendirilen Kiriş-2 ve Kiriş-3'te ise kesme ve eğilme çatlak oluşumunun ve yayılımının daha kontrollü gerçekleşmiştir. Güçlendirme uygulaması ile kesme çatlaklarının ilerlemesi sınırlandırılmış ve kompozit şeritler çatlakların kontrolünde etkin rol oynamıştır. Kompozit şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanları beton basınç bölgesinde betonun ezilmesi eğilme dayanımına ulaşmıştır. Güçlendirilen deney elemanlarının yük taşıma kapasitesinde referans elemana göre yaklaşık %59–63 oranında artış sağlanmıştır. Ayrıca, deney elemanlarının göçme şekilleri gevrek kesme kırılmasından sünek eğilme davranışına geliştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre kenevir esaslı doğal lif takviyeli kompozit şeritlerin kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinde etkili, sürdürülebilir ve uygulanabilir bir alternatif yöntem olduğu görülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmektedir (Proje No: FBA-2023-3234, Proje Başlığı: Kenevir Lifli Polimer Kompozit ile Güçlendirilmiş Kesme Dayanımı Yetersiz Betonarme Kiriş Davranışının İncelenmesi). Bu çalışmada kompozitlerin üretilmesi aşamasında kullanılan yöntem ve teknikler, TÜBİTAK 219M394 numaralı proje kapsamında geliştirilmiş olup, yazarlar TÜBİTAK'a teşekkür eder. Yazarlar ayrıca test numunelerinin üretimindeki desteklerinden dolayı Batı Prefabrik Beton İnşaat San. ve Tic. A.Ş.'ye teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

- ASTM D3039/D3039M-17 (2017) Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International
- Azad AK, Ahmad S, Azher SA (2007) "Residual strength of corrosion-damaged reinforced concrete beams," *ACI Materials Journal*, 104(1):40–47
- Ersoy U, Özcebe G, Canbay E (2019) *Betonarme: Davranış ve Hesap İlkeleri*, ODTU Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.
- Faruk O, Bledzki AK, Fink HP, Sain M (2012) "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010," *Progress in Polymer Science*, 37(11):1552–1596
- Ibrahim M, Wakjira T, Ebead U (2020) "Shear strengthening of reinforced concrete deep beams using near-surface mounted hybrid carbon/glass fibre reinforced polymer strips," *Engineering Structures*, 210:110412
- Jirawattanasomkul T, Likitlersuang S, Wuttiwannasak N, Ueda T, Zhang D, Shono M (2020) "Structural behaviour of pre-damaged reinforced concrete beams strengthened with natural fibre reinforced polymer composites," *Composite Structures*, 244:112309
- Pickering KL, Efendy MGA, Le TM (2016) "A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83:98–112
- Sen T, Reddy HN (2014) "Efficacy of bio derived jute FRP composite based technique for shear strength retrofitting of reinforced concrete beams and its comparative analysis with carbon and glass FRP shear retrofitting schemes," *Sustainable Cities and Society*, 13:105–124
- Yan L, Chow N, Jayaraman K (2014) "Flax fibre and its composites – A review," *Composites Part B: Engineering*, 56:296–317
- Yin S, Hussain Q, Joyklad P, Chaimahawan P, Rattanapitikon W, Limkatanyu S, Pimanmas A (2021) "Strengthening effect of natural fiber reinforced polymer composites (NFRP) on concrete," *Case Studies in Construction Materials*, 15:e00653

AHŞAP KİRİŞLERİN CFRP ŞERİTLERLE GÜÇLENDİRİLMESİ

FLEXURAL STRENGTHENING OF TIMBER BEAMS WITH CFRP STRIPS

Şule BAKIRCI ER¹, İlker ELMAS² ve Aytuğ Talha YILDIZ³

ÖZET

Ahşap, yapı malzemesi olarak çok uzun yıllardır kullanılmaktadır. Taşıyıcı sistem elemanları olarak da ahşaptan yararlanılmaktadır. Ancak ahşabın çevresel ve biyolojik (mantar, böcek gibi) unsurlara karşı koruma gereksinimi ve ahşaptaki doğal kusurlar nedeniyle günümüzde daha çok betonarme yapılar tercih edilmektedir. Teknolojinin gelişmesiyle ahşap koruyucu pek çok malzeme ortaya çıkmıştır. Ahşabın betonarmeye göre daha hafif malzeme olması deprem yükleri açısından avantajdır. Hammadde kaynağı olarak da ülkemiz şanslıdır. Bu noktadan yola çıkarak ahşap kirişlerin güçlendirilmesine yönelik bir çalışma planlanmıştır. 100x150 mm kesit ölçülerinde 3000 mm boyunda ahşap kirişler biri yalın eleman, 10 tanesi güçlendirilmiş eleman olarak CFRP şeritler ve/veya vidalar kullanılarak güçlendirilecektir. CFRP şerit genişliği, uygulama yüzeyi ve vida aralığı parametre olarak ele alınacaktır.

Anahtar Kelimeler: Ahşap, ahşap kiriş, CFRP, ankraj.

ABSTRACT

Timber has been utilized as a construction material for centuries and continues to serve as a critical component in structural systems. However, reinforced concrete structures are currently more prevalent due to the necessity of protecting wood against environmental and biological factors (such as fungi and insects), as well as its inherent natural defects. With recent technological advancements, various protective treatments have emerged, enhancing the durability of timber. Due to its superior strength-to-weight ratio compared to RC (Reinforced Concrete), timber offers significant advantages under seismic loading. Considering Türkiye's rich raw material resources and the need for resilient infrastructure, this study focuses on the flexural strengthening of timber beams. The experimental program involves 100x150 mm timber beams with a length of 3000 mm. One specimen serves as the reference (control) beam, while ten specimens are strengthened using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) strips and/or screws. The core parameters of the investigation include the influence of CFRP strip width, application surface and anchorage spacing on the structural performance.

Keywords: Timber, timber beam, CFRP, anchorage.

GİRİŞ

Ahşap doğal bir malzemedir. Yapı malzemesi olarak kullanılması da son derece eskidir. Anadolu'da pek çok eski yerleşimde ahşap yapılara rastlamak mümkündür. Ahşabın bakımı ve korunması betonarmeye göre zor olduğu için konut ve barınak olarak daha az tercih edilmektedir. TÜİK verilerine göre ahşap yapı ruhsatı oranı % 1 den azdır. Oysa orman kaynakları bakımından % 30 u ormanlık alan olan ülkemizde hammadde mevcuttur. (OGM, 2024) Ahşabın betonarme kadar ağır

¹ Dr. Öğ. Üy., Kırıkkale Ün., Kırıkkale, sulebakircier@kku.edu.tr

² İnşaat Y., Müh. Orman Genel Müdürlüğü, Ankara, ilkerelmas@gmail.com

³ İnşaat Müh., Kırıkkale Ün. Fen Bil. Ens., Kırıkkale, talhaaytugg@hotmail.com

olmaması da deprem yükleri açısından yapı ağırlığı azaldığı için avantajdır. 2023 yılında yaşanan Kahramanmaraş depremi de daha hafif alternatif yapı malzemelerini düşündürmektedir. Bu durumları dikkate alarak ahşap kiriş elemanlarını güçlendirmek amacıyla bir çalışma planlanmıştır. Çalışmanın ülkemizde ahşap alanlarında yapılan çalışmalara eklenerek ve sünekliği artırarak katkısı sağlayacağı düşünülmektedir. Literatürde, ahşap kirişlerin taşıma kapasitesini ve rijitliğini artırmak amacıyla çeşitli malzeme ve yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar yer almaktadır.

Ahşap kirişlerin güçlendirilmesinde en yaygın yöntemlerden biri, Karbon (CFRP), Cam (GFRP) ve Bazalt (BFRP) lifli polimerlerin kullanımudur. Bazı araştırmalar, CFRP şeritlerin ve kumaş sarımların tarihi ahşap kirişlerin eğilme kapasitesini %70'e kadar artırabildiğini ortaya koymuştur (Kara Alaşalvar vd, 2025). Halicka ve Ślórsarz (2021), masif ahşap kirişlerin ön germeli (aktif) CFRP şeritlerle güçlendirilmesini inceleyerek, bu yöntemin kiriş sehimlerini önemli ölçüde azalttığını ve taşıma kapasitesini yaklaşık %13 artırdığını kanıtlamıştır. Ayrıca, pultrüzyon yöntemiyle üretilen GFRP profillerin (U, L veya düz şekilli) kullanımının eğilme rijitliğini %59'a kadar artırabildiği belirlenmiştir (Shekarchi vd, 2020) Son yıllarda maliyeti düşürmek ve sünekliği artırmak amacıyla karbon, aramid ve cam liflerin bir arada kullanıldığı hibrit lifli polimer (HFRP) levhalar geliştirilmiş, bu levhaların özellikle yuvarlak kesitli tarihi kütüklerin korunmasında etkili olduğu saptanmıştır (Zhang vd, 2022) Çevresel sürdürülebilirlik odaklı çalışmalarda doğal lifler ve biyolojik bazlı malzemeler öne çıkmaktadır. Örneğin, keten liflerinin epoksi veya su bazlı vinil tutkalı ile birlikte kullanımı incelenmiş; vinil tutkalının ahşap endüstrisiyle uyumlu, zehirsiz ve ekonomik bir alternatif olduğu belirlenmiştir. Karbon ve keten lifleriyle güçlendirilmiş ahşap kirişlerin davranışını öngörmek için MATLAB tabanlı bir model ve plastik basınç bölgesine yönelik bir büyütme katsayısı geliştirilmiştir. (Hoseinpour vd, 2018). Ayrıca, bambu levhaların ahşap kirişlerin altına CFRP veya ahşap pimlerle ankrajlanarak uygulanmasının, taşıma kapasitesini %20 ile %70 arasında artırdığı gözlemlenmiştir. (Chen vd, 2021) Mühendislik Çimentolu Kompozit (ECC) tabakalarının kullanımı da diğer bir yeni yöntemdir. Bu yöntemle özellikle çekme bölgesinde uygulandığında ahşap kirişlerin eğilme performansını ve sünekliğini %98'e varan oranlarda iyileşme sağlanmıştır (Wan vd, 2025). Geleneksel çelik plakalar yanında, soğukta şekillendirilmiş çelik (CFS) kesitlerin çekme bölgesine epoksi, vida veya çelik şeritlerle bağlanması, kirişlerin ani gevrek kırılmasını önlemekte ve performanslarını iki katına kadar çıkarabilmektedir (Gul vd, 2024).Yakın yüzey montajlı (NSM) yönteminde ise çelik ve titanyum çubukların kullanımı test edilmiş; hafif ve korozyona dayanıklı titanyumun NSM güçlendirmede yüksek performans sergilediği görülmüştür. Pasif güçlendirmelerin yanı sıra, CFRP şeritlerin ön germeli olarak uygulanması, kirişlerdeki sehimin %44'e kadar azaltılmasını sağlayarak servis edilebilirlik sınır durumlarını iyileştirdiği belirlenmiştir (Goodwin ve Woods, 2025). Khelifa ve ark. (2015), CFRP ile güçlendirilmiş ahşap kirişlerin eğilme davranışını doğrusal olmayan sonlu elemanlar analiziyle modellemiş ve taşıma kapasitesinde %60,24'e varan artışlar elde edilmiştir. Geliştirilen elasto-plastik modelin deneysel sonuçlarla %1,2 gibi oldukça düşük bir hata payıyla örtüştüğü doğrulanmıştır.

AMAÇ ve KAPSAM

Çalışma ahşap yapıların ve ahşap yapı elemanlarının yaygınlaştırılması amacıyla planlanmaktadır. Deney elemanları yalın (güçlendirilmemiş) ve güçlendirilmiş elemanlardan oluşmaktadır. Bu elemanlar eğilme altında test edilecektir. Deney elemanları 100x150 mm genişlik ve yükseklik değerlerine ve 3000 mm uzunluğa sahiptir.

Deneysel Çalışma

Çalışma 11 adet ahşap kiriş elemanından oluşmaktadır. Deney elemanlarının adlandırmaları aşağıda verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanlarda kullanılan CFRP şerit kalınlığı 1.4 mm'dir.

RTB: Referans ahşap kiriş elemanı

STB5: 50 mm genişlikli şeritle alt yüzden epoksi yapıştırılarak güçlendirilecek ahşap kiriş elemanı

STB5-25b: 50 mm genişlikli şeritle alt yüzden epoksi yapıştırılarak ve 250 mm aralıklarla vida kullanılarak güçlendirilecek ahşap kiriş elemanı

STB6-25b: 60 mm genişlikli şeritle alt yüzden epoksi yapıştırılarak ve 250 mm aralıklarla vida kullanılarak güçlendirilecek ahşap kiriş elemanı
STB10-25b: 100 mm genişlikli şeritle alt yüzden epoksi yapıştırılarak ve 250 mm aralıklarla vida kullanılarak güçlendirilecek ahşap kiriş elemanı
STB5-50b: 50 mm genişlikli şeritle alt yüzden epoksi yapıştırılarak ve 500 mm aralıklarla vida kullanılarak güçlendirilecek ahşap kiriş elemanı
STB6-50b: 60 mm genişlikli şeritle alt yüzden epoksi yapıştırılarak ve 500 mm aralıklarla vida kullanılarak güçlendirilecek ahşap kiriş elemanı
STB10-50b: 100 mm genişlikli şeritle alt yüzden epoksi yapıştırılarak ve 500 mm aralıklarla vida kullanılarak güçlendirilecek ahşap kiriş elemanı
STB5-50b-50t: 50 mm genişlikli şeritle alt yüzden epoksi yapıştırılarak ve alt ve üst yüzden 500 mm aralıklarla vida kullanılarak güçlendirilecek ahşap kiriş elemanı
STB6-50b-50t: 60 mm genişlikli şeritle alt yüzden epoksi yapıştırılarak ve alt ve üst yüzden 500 mm aralıklarla vida kullanılarak güçlendirilecek ahşap kiriş elemanı
STB10-50b-50t: 100 mm genişlikli şeritle alt yüzden epoksi yapıştırılarak ve alt ve üst yüzden 500 mm aralıklarla vida kullanılarak güçlendirilecek ahşap kiriş elemanı

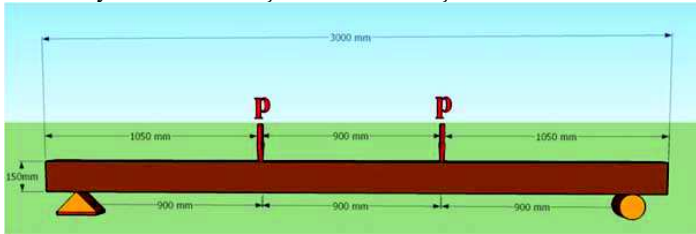
Adlandırmalar ve deney elemanlarının özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Deney Elemanlarının Özellikleri

Eleman Adı	Güç.	Güçlendirme Malzemesi	Ankraj Malzemesi	CFRP Şerit Genişliği (mm)	Uygulama Yüzeyi	Alt Vida Aralığı (mm)	Üst Vida Aralığı (mm)
RTB	Yok				----		
STB5	Var	CFRP Şerit	Epoksi	50	Alt		
STB5-25b	Var	CFRP Şerit	Epoksi+vida	50	Alt	250	---
STB6-25b	Var	CFRP Şerit	Epoksi+vida	60	Alt	250	---
STB10-25b	Var	CFRP Şerit	Epoksi+vida	100	Alt	250	---
STB5-50b	Var	CFRP Şerit	Epoksi+vida	50	Alt	500	---
STB6-50b	Var	CFRP Şerit	Epoksi+vida	60	Alt	500	---
STB10-50b	Var	CFRP Şerit	Epoksi+vida	100	Alt	500	---
STB5-50b-50t	Var	CFRP Şerit	Epoksi+vida	50	Alt+üst	500	500
STB6-50b-50t	Var	CFRP Şerit	Epoksi+vida	60	Alt+üst	500	500
STB10-50b-50t	Var	CFRP Şerit	Epoksi+vida	100	Alt+üst	500	500

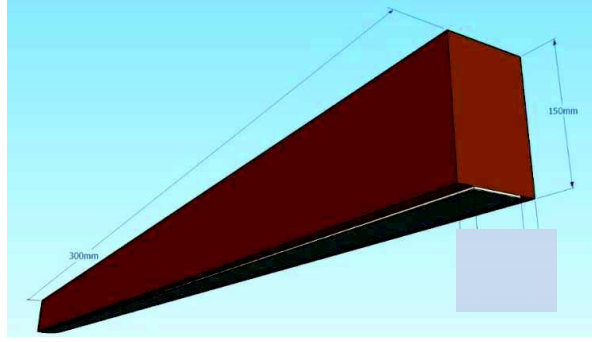
Yükleme Sistemi

Deney elemanlarına ait yüklenme sistemi şekil 1’de verilmiştir.

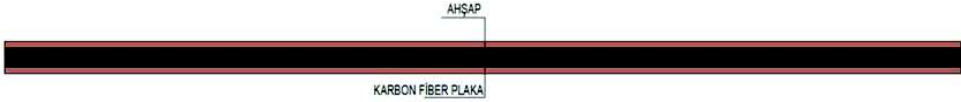


Şekil 1. Yüklenme Sistemi

Güçlendirme elemanlarına ait görseller şekil 2 ve şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 2 Güçlendirme elemanı



Şekil 3 Güçlendirilmiş kiriş alt ve/veya üst yüzü

Ahşap Yapı Yönetmeliğine göre Karaçam C24 sınıfına ait karakteristik mekanik özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Karaçam C24 sınıfı karakteristik mekanik özellikler (Ahşap Binaların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, 2024)

Mekanik Özellik	Sembol	Değer (MPa)
Eğilme Dayanımı	$f_{m,k}$	24
Liflere Paralel Çekme Dayanımı	$f_{t,0,k}$	14.5
Liflere Dik Çekme Dayanımı	$f_{t,90,k}$	0.4
Liflere Paralel Basınç Dayanımı	$f_{c,0,k}$	21
Liflere Dik Basınç Dayanımı	$f_{c,90,k}$	2.5
Kayma Dayanımı	$f_{v,k}$	4.0
Ortalama Elastisite Modülü	$E_{0,mean}$	11000
Karakteristik Yoğunluk	ρ_k	350 kg/m ³

Karbon lifli şeritlerin (plakaların) mekanik özellikleri tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Karbon Lifli Plaka Özellikleri

Özellik	
Yoğunluk	1600 kg/m ³
Elastisite Modülü (Basınç)	170000 MPa
Çekme Dayanımı	3100 MPa

Epoksinin özellikleri tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Yapıştırıcı epoksi özellikleri

Özellik	
Yoğunluk	1650 kg/m ³
Elastisite Modülü (Basınç)	9600 MPa
Elastisite Modülü (Çekme)	11200 MPa
Basınç Dayanımı	90 MPa
Çekme Dayanımı	29 MPa

SONUÇ

Ahşap kirişlerin CFRP şeritlerle eğilme altında güçlendirilmesini amaçlayan bu çalışmanın Kırıkkale Üniversitesi, Yapı Mekaniği laboratuvarında gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Çalışmada CFRP şerit genişliği, uygulama yüzeyi ve ankraj yöntemi ve aralığı parametre olarak ele alınacaktır. Kirişlerde gözlenen hasarlar, yük-deplasman gelişmeleri ve kırılma modları incelenecektir.

KAYNAKLAR

- Chen, S., Wei, Y., Peng, D., Zhao, K., & Hu, Y. (2021). Experimental investigation of timber beams strengthened by bamboo scrimber with anchorage structure. *Structures*, 33, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.038>
- Goodwin, J., & Woods, J. E. (2025). Strengthening of glued-laminated timber beams using externally bonded fiber reinforced polymer sheets and near surface mounted reinforcement. *Construction and Building Materials*, 490, 142477. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142477>
- Gul, M., Waseem, S. A., & Bhat, J. A. (2024). Experimental investigation on strengthening of glulam timber beams using cold-formed steel sections. *Structures*, 66, 106767. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106767>
- Halicka, A., & Ślósarz, S. (2021). Strengthening of timber beams with pretensioned CFRP strips. *Structures*, 34, 2912–2921. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.055>
- Hoseinpour, H., Valluzzi, M. R., Garbin, E., & Panizza, M. (2018). Analytical investigation of timber beams strengthened with composite materials. *Construction and Building Materials*, 191, 1242–1251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.014>
- Kara Alaşalvar, M. A., Sağıroğlu Demirci, Ö., Akkaya, S. T., Türer, A., Çelik, A., Mercimek, Ö., & Anıl, Ö. (2025). Flexural behaviour of old wooden beams strengthened with CFRP: Experimental and numerical investigations. *Structures*, 75, 108718. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108718>
- Khelifa, M., Auchet, S., Méausoone, P.-J., & Celzard, A. (2015). Finite element analysis of flexural strengthening of timber beams with Carbon Fibre-Reinforced Polymers. *Engineering Structures*, 101, 364–375. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.07.046>
- Orman Genel Müdürlüğü (2024). *Ormanlık İstatistikleri 2023*. <https://www.ogm.gov.tr/tr/ormanlarimiz-sitesi/Pages/Resmi-Istatistikler.aspx>
- Shekarchi, M., Vatani Oskouei, A., & Raftery, G. M. (2020). Flexural behavior of timber beams strengthened with pultruded glass fiber reinforced polymer profiles. *Composite Structures*, 241, 112062. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112062>
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2024). *Ahşap Binaların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik*, Resmî Gazete Sayısı: 32499, Yayın Tarihi: 24 Mart 2024.
- Wan, S., Xiao, H., Liu, Z., Yang, J., Yan, C., Liu, L., ... & Wang, X. (2025). Flexural property of eco-friendly timber beams strengthened with ECC layer. *Construction and Building Materials*, 469, 140468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140468>
- Zhang, C., Chun, Q., Wang, H., Lin, Y., & Shi, J. (2022). Experimental study on the flexural behaviour of timber beams strengthened with high ductility and low cost hybrid fibre sheets. *Construction and Building Materials*, 322, 126514. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126514>

GÜÇLENDİRİLMEDE KULLANILAN ON ADET CFRP DOKUMANIN DENEYSEL DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

EVALUATION OF THE EXPERIMENTAL BEHAVIOR OF TEN CFRP FABRICS USED IN STRENGTHENING

Servet DEMİRDAĞ¹ ve Murat BİKÇE²

ÖZET

Karbon lifli polimer (CFRP) dokumalar, yapı güçlendirme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak piyasada bulunan dokuma CFRP ürünleri arasında önemli mekanik performans farklılıkları bulunabilmektedir. Bu çalışmada, ticari olarak temin edilen 10 farklı dokuma CFRP kumaş, reçinesiz (yalın) malzeme düzeyinde tek eksenli çekme deneyleriyle deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, aynı cihaz ve aynı yükleme koşulları altında gerçekleştirilmiş; maksimum çekme kuvveti, nominal çekme gerilmesi ve uzama kapasitesi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ürünler arasında belirgin bir performans saçılımı bulunduğunu göstermekte ve katalog verilerine dayalı malzeme seçiminin sınırlılıklarını ortaya koymaktadır. Çalışma, güçlendirme uygulamaları öncesinde malzeme düzeyi ön kalite kontrol testlerinin mühendislik açısından önemini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: CFRP dokuma, Çekme deneyi, Karbon lifli kumaş, Kalite kontrol, Güçlendirme

ABSTRACT

Carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) fabrics are widely used in structural strengthening applications; however, significant variations may exist among commercially available woven CFRP products. This study experimentally investigates the tensile behavior of ten commercially available woven CFRP fabrics at the raw material level. Tensile tests were conducted on resin-free woven CFRP strips using a universal testing machine under identical loading conditions. Maximum tensile force, nominal tensile stress, and elongation capacity were evaluated. The results reveal considerable scatter in mechanical performance among products, highlighting the limitations of catalog-based material selection and emphasizing the need for preliminary material-level quality assessment prior to strengthening applications.

Keywords: CFRP fabric, Tensile test, Woven carbon fiber, quality control, Strengthening

GİRİŞ

Karbon lifli polimer (CFRP) sistemler, son yıllarda betonarme yapıların güçlendirilmesi ve onarımında önemli bir mühendislik çözümü haline gelmiştir (ACI PRC-440.2-17; ACI PRC-440.3-12; CNR-DT 200 R1/2013; fib Bulletin 90). FRP sistemleri arasında, dokuma karbon lifli polimer (CFRP) dokumalar, karmaşık geometrilere kolay uyum sağlamaları ve sahada pratik uygulanabilirlikleri nedeniyle öne çıkmaktadır.

CFRP dokumaların mekanik performansı yalnızca karbon liflerinin teorik dayanımı ile belirlenmemekte; dokuma türü, lif dalgalanması, lif-lif etkileşimi ve üretim sürecine bağlı kalite değişkenleri tarafından güçlü biçimde etkilenmektedir (Scida, vd., 1999). Literatürde, dokuma

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay; servetdemirdag.lee23@iste.edu.tr

² Profesör Doktor, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay; murat.bikce@iste.edu.tr.

takviyeli kompozitlerin tek doğrultulu sistemlere kıyasla daha düşük etkin rijitlik ve dayanım sergileyebildiği, buna karşın daha dengeli deformasyon davranışı gösterebildiği rapor edilmiştir. (Scida, vd., 1999; Lomov, vd., 2008).

CFRP dokumalar, birbirine dik veya eğik doğrultularda yerleştirilmiş lif demetlerinin örülmesiyle oluşturulmaktadır. Bu yapı, liflerde dalgalanmaya neden olmakta ve çekme yüklemesi altında liflerin tamamının aynı anda ve aynı doğrultuda yük taşımamasını engelleyebilmektedir. Yapılan çalışmalar, dokuma mimarisinin çekme rijitliği ve dayanımı üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermektedir. (Scida vd., 1999).

Lomov ve arkadaşları (2008), tekstil takviyeli kompozitlerde hasarın genellikle progresif olarak geliştiğini ve bu durumun kuvvet–uzama eğrilerinin şekline doğrudan yansıdığını belirtmiştir. Naik ve Shirao (2004) ise dokuma takviyeli kompozitlerde dayanım ile deformasyon kapasitesi arasında bir denge bulunduğunu, bu dengenin lif yönelimi ve dokuma tipine bağlı olarak değiştiğini vurgulamıştır.

Yapısal güçlendirme açısından bakıldığında, ACI 440 ve CNR-DT 200 gibi kılavuzlar, FRP malzemelerin tasarımı kullanılmadan önce standart deneylerle karakterize edilmesini ve elde edilen değerlerin uygun indirgeme katsayıları ile değerlendirilmesini önermektedir (ACI PRC-440.2-17; ACI PRC-440.3-12; CNR-DT 200 R1/2013; fib Bulletin 90). Buna rağmen mühendislik pratiğinde, CFRP dokuma seçimi çoğu zaman yalnızca üretici kataloglarında verilen nominal değerlere dayandırılmaktadır. Bu yaklaşım, ürünler arası kalite farklılıklarını göz ardı edebilmektedir. Bu çalışmanın temel katkısı, yapı güçlendirme uygulamalarında kullanılan dokuma CFRP ürünlerinin reçinesiz ve yalın dokuma seviyesinde, aynı deney koşulları altında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesidir. Çalışma, mutlak tasarım dayanımlarını belirlemekten ziyade, ürünler arası görece mekanik performans farklılıklarını ortaya koymayı hedeflemektedir.

Bu çalışmanın amacı; yapısal güçlendirme uygulamalarında kullanılan 10 farklı CFRP dokumaların malzeme kalitesini çekme deneyleri yoluyla karşılaştırmak ve elde edilen sonuçları uluslararası standartlar ve mühendislik uygulamaları bağlamında değerlendirmektir (ACI PRC-440.2-17; ACI PRC-440.3-12; CNR-DT 200 R1/2013; fib Bulletin 90; ASTM D5035).

MALZEME VE DENEYSEL YÖNTEM

Test Edilen CFRP Dokumalar

Bu çalışmada, Türkiye’de yapı güçlendirme uygulamalarında yaygın olarak kullanılan 10 farklı dokuma CFRP ürünü incelenmiştir (Şekil 1). Tüm numuneler karbon liflerinden oluşan reçinesiz (yalın) dokuma kumaş formundadır. Numunelere herhangi bir reçine emdirme, laminasyon veya kür işlemi uygulanmamıştır. Bu yaklaşımın amacı, nihai CFRP kompozit davranışını temsil etmekten ziyade, dokuma düzeyindeki malzeme kalitesi ve üretim kaynaklı farklılıkları ortaya koymaktır.



Şekil 1. a) BİTAM'daki deney cihazı, b) İkinci ürün numunesi için deneyden örnek görüntü

Testler Konya Necmettin Erbakan Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (BİTAM) yürütülmüştür. Tüm deneyler yalın dokuma şartlar üzerinde gerçekleştirilmiş, herhangi bir reçine emdirme veya kompozit lamina oluşturma işlemi yapılmamıştır. Bu yaklaşım ile lif mimarisi ve üretim kalitesine bağlı farkların doğrudan gözlemlenmesini amaçlamaktadır. Yapılan deneylerde herhangi bir markayı övmek/yermek yerine sadece bu konuya dikkat çekmek amaçlandığından, marka isimleri yerine bu çalışmada; 1. Ürün, 2. Ürün şeklinde tanımlamalar yapılmıştır. Her numune için gerekli ölçümler deney öncesinde gerçekleştirilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Çalışmada incelenen CFRP Malzemelerinin Verileri (300 gr/m²)

Ürün Adı	A Yüzey Alanı mm ²	L ₀ İlk Boy mm	Veri Sayısı adet	F _{max} Uzama N	ΔL _{max} mm	σ _{max} F _{max} /A MPa	ε _{max} ΔL/L ₀ *100 %	F _{max} Tüm Alan N	σ _{max} Tüm Alan MPa
1. Ürün	16,00	230,00	21251	473,34	3,5411	29,66	1,54	1455,07	91,17
2. Ürün	15,96	179,82	19734	553,20	3,2883	34,66	1,83	1500,18	94,00
3. Ürün	18,08	237,97	16732	773,13	2,7880	42,75	1,17	1788,86	98,90
4. Ürün	19,68	294,99	19704	260,96	3,2833	13,26	1,11	791,38	40,20
5. Ürün	19,68	260,12	16732	660,78	2,3253	76,58	0,89	2199,06	137,79
6. Ürün	19,68	290,00	20159	799,27	3,3591	40,61	1,16	1792,08	86,82
7. Ürün	19,68	235,00	14518	419,43	2,4189	21,31	1,03	1030,35	52,34
8. Ürün	15,96	310,00	22010	539,14	3,6676	33,77	1,18	1907,11	95,47
9. Ürün	15,96	210,00	12039	489,68	2,0057	30,68	0,96	810,10	50,76
10. Ürün	19,68	290,00	16702	460,02	2,7830	23,37	0,96	1080,69	51,62

Çalışmanın temel sınırlamaları aşağıda özetlenmiştir:

- Her ürün için yalnızca tek numune test edilmesi,
- Uzama ölçümlerinin çapraz başlık deplasmanına dayanması,
- Mekanik kama tipi çenelerde oluşabilecek mikro kaymaların uzama ölçümleri üzerinde belirsizlik yaratabilmesi,
- Reçinesiz dokuma testlerinin nihai CFRP kompozit davranışını birebir temsil etmemesi (ASTM D5035).

Buna rağmen, tüm ürünlerin aynı deney koşulları altında test edilmiş olması, sonuçların görece karşılaştırma açısından tutarlı olmasını sağlamaktadır.

Deney Düzeni ve Ölçümler

Çekme deneyleri, Shimadzu Autograph AGS-X (100 kN) kapasiteli üniversal test cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneyler tek eksenli çekme prensibine göre uygulanmış olup deney parametreleri olarak; Deney tipi: Çekme, Deney modu: Tek, Çapraz başlık hızı: 1 mm/dk (sabit). Numunelerin tutulmasında, test cihazına ait mekanik kama tipi çeneler kullanılmıştır. Çeneler, manuel olarak sıkılan, düz metal yüzeylere sahip olup pnömatik veya hidrolik bir sistem içermemektedir. Numune uçlarında epoksi tab veya özel bir ankraj detayı kullanılmamış, numuneler doğrudan kama çeneler arasına yerleştirilmiştir. Tutma işlemi, kama mekanizmasının oluşturduğu normal kuvvet prensibine dayanmaktadır.

Uygulanan deney yöntemi, metodolojik olarak ASTM D5035 yaklaşımına en yakın yöntemdir. Bu standart, dokuma ve tekstil kumaşların çekme altında kopma kuvveti ve uzama davranışının belirlenmesi için kullanılmaktadır (ASTM D5035). Bununla birlikte, bu çalışmada elde edilen sonuçlar nihai CFRP kompozit tasarım parametreleri olarak değil, karşılaştırmalı kalite değerlendirmesi kapsamında yorumlanmıştır (ACI PRC-440.2-17; ACI PRC-440.3-12; CNR-DT 200 R1/2013; fib Bulletin 90).

Hesaplanan Mekanik Büyüklükler

Her bir CFRP dokuma ürünü için bir adet numune test edilmiştir. Toplamda 10 farklı ürün, aynı cihaz ve aynı deney koşulları altında değerlendirilmiştir. Bu çalışma, tekrarlı istatistiksel karakterizasyon amacı taşımamakta; ürünler arası görelî performans karşılaştırmasına odaklanan öncü bir deneysel çalışma niteliğindedir.

Deneyler sırasında maksimum çekme kuvveti ve buna karşılık gelen şekil değiştirme değerleri test cihazı tarafından kaydedilmiştir. Uzama değerleri, harici bir ekstansometre veya optik ölçüm sistemi kullanılmaksızın, çapraz başlık deplasmanı üzerinden elde edilmiştir. Değerlendirilen büyüklükler; Maksimum çekme kuvveti, $F_{max}(N)$, Maksimum uzama, $\Delta L_{max}(mm)$, Maksimum birim uzama, $\varepsilon_{max}(\%)$ olarak sıralanabilir. Bu çalışmada raporlanan gerilme değerleri, nominal çekme gerilmesi olarak tanımlanmıştır. Nominal gerilme aşağıdaki ifade ile hesaplanmıştır (ASTM D5035):

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A_{eff}} \quad (1)$$

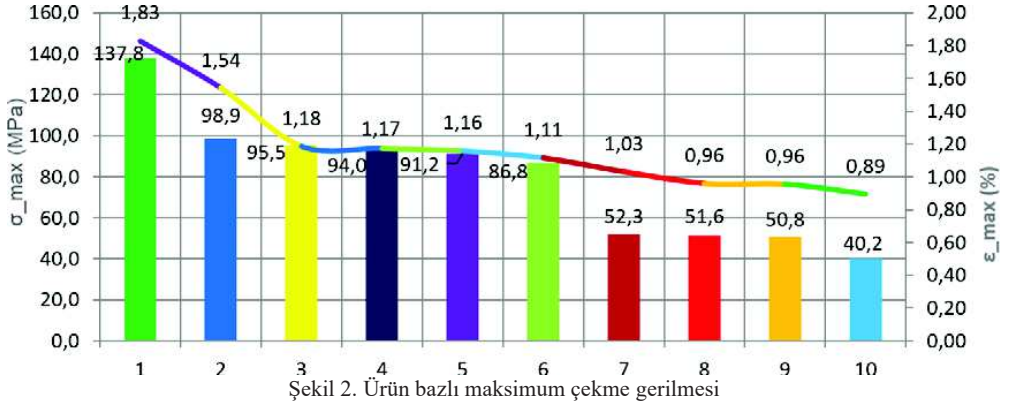
Burada A_{eff} , dokuma şeridin deney sırasında tanımlanan etkin alanını ifade etmektedir. Numunelerin reçinesiz dokuma formunda olması nedeniyle, elde edilen gerilme değerleri tasarım dayanımı olarak kullanılmamalı, yalnızca ürünler arası karşılaştırma amacıyla değerlendirilmelidir. Maksimum birim uzama aşağıdaki ifade ile hesaplanmıştır:

$$\varepsilon_{max} = \frac{\Delta L_{max}}{L_0} \quad (2)$$

Burada; L_0 ilk uzunluğu, ΔL_{max} maksimum kuvvete karşılık gelen uzamayı ifade etmektedir.

DENEYSEL BULGULAR

Deney sonuçları, test edilen CFRP dokumalar arasında belirgin performans farkları bulunduğunu göstermiştir. Maksimum çekme gerilmesi değerleri yaklaşık 40 MPa ile 140 MPa arasında değişmektedir (Şekil 2). Maksimum birim uzama değerleri ise %0,9–1,8 aralığındadır. Aynı sınıf dokuma olmasına rağmen CFRP'lerde 3-4 kata varan dayanım farkı görülebilmektedir (Şekil 3).



Şekil 2. Ürün bazlı maksimum çekme gerilmesi

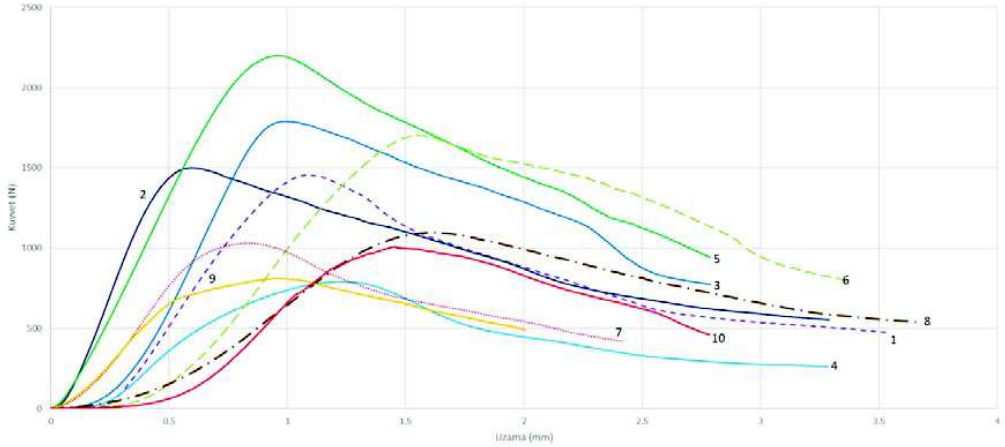
Bazı CFRP dokumalarının yüksek çekme dayanımı sergilerken sınırlı deformasyon kapasitesine sahip olduğu, bazı dokumaların ise daha düşük dayanım seviyelerinde daha yüksek uzama kapasitesi gösterdiği belirlenmektedir (Tablo 2, 3).

Tablo 2. CFRP dokumalarda deneyden elde edilen σ_{max} değer sıralaması

Ürün Adı	σ_{max} (MPa)	ϵ_{max} $\Delta L/L_0 * 100$ (%)
5. Ürün	137,8	0,89
3. Ürün	98,9	1,17
8. Ürün	95,5	1,18
2. Ürün	94,0	1,83
1. Ürün	91,2	1,54
6. Ürün	86,8	1,16
7. Ürün	52,3	1,03
10. Ürün	51,6	0,96
9. Ürün	50,8	0,96
4. Ürün	40,2	1,11

Tablo 3. CFRP dokumalarda deneyden elde edilen ϵ_{max} değer sıralaması

Ürün Adı	ϵ_{max} $\Delta L/L_0 * 100$ (%)	σ_{max} (MPa)
2. Ürün	1,83	94,0
1. Ürün	1,54	91,2
8. Ürün	1,18	95,5
3. Ürün	1,17	98,9
6. Ürün	1,16	86,8
4. Ürün	1,11	40,2
7. Ürün	1,03	52,3
10. Ürün	0,96	51,6
9. Ürün	0,96	50,8
5. Ürün	0,89	137,8



Şekil 3. Tüm ürünlerin Kuvvet-Uzama eğrileri

TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRME

Elde edilen bulgular, piyasada kullanılan dokuma CFRP ürünlerinin yalın dokuma seviyesinde dahi önemli mekanik performans farklılıkları gösterebildiğini ortaya koymaktadır. Bu farklılıklar; lif hizalanması, dokuma mimarisi, lif dalgalanması ve üretim kalitesi gibi parametrelerle ilişkilidir (Scida vd, 1999; Lomov vd, 2008).

Deneylerde kullanılan mekanik kama tipi çeneler, dokuma ve şerit formundaki lifli malzemelerin çekme deneylerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (ASTM D5035). Bununla birlikte, bu çene tipinde numune-çene temasında oluşabilecek mikro kaymalar, özellikle uzama ölçümleri üzerinde belirsizlik yaratabilmektedir (ASTM D5035). Uzama değerlerinin çaprazbaşlık deplasmanına dayalı olması, bu belirsizliği artırmaktadır. Bu nedenle uzama ve birim uzama değerleri mutlak deformasyon kapasitesi olarak değil, ürünler arası görelî karşılaştırma kapsamında değerlendirilmelidir.

Bu çalışmada, yapı güçlendirme uygulamalarında kullanılan 10 farklı dokuma CFRP ürününün, reçinesiz dokuma seviyesinde mekanik performansı deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, ürünler arasında belirgin bir mekanik performans saçılımı bulunduğunu göstermiştir. Bu durum, yalnızca katalog verilerine dayalı CFRP dokuma seçiminin yetersiz olabileceğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmadan elde edilen bulgular, yapısal güçlendirme uygulamaları açısından şu sonuçları ortaya koymaktadır:

- a) CFRP dokumaların malzeme kalitesi ürün bazında önemli farklılıklar göstermektedir.
- b) Yüksek çekme dayanımı, her zaman yüksek deformasyon kapasitesi anlamına gelmemektedir.
- c) Güçlendirme projelerinde CFRP seçimi, yalnızca katalog değerlerine dayandırılmamalıdır.
- d) Uygulama öncesinde malzeme düzeyinde kalite kontrol testleri yapılması önerilmektedir.

Hesaplarda kullanılan CFRP değerlerini sağlayan ürünlerin uygulamada kullanılması önerilmektedir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, on farklı CFRP dokumanın çekme davranışı yalın şeritler üzerinde deneysel olarak BİTAM’da incelenmiştir. CFRP dokumaların malzeme kalitesinin ürünler arasında büyük farklılıklar gösterebildiğini ortaya koymuştur. Dayanım, deformasyon kapasitesi ve eğri karakterinin birlikte değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- ACI PRC-440.2-17. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute, 2017.
- ACI PRC-440.3-12. Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structures. ACI, 2012.
- ASTM D5035. Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method). ASTM International.
- CNR-DT 200 R1/2013. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Roma-CNR, 2013 (release 2014).
- fib Bulletin 90. Externally applied FRP reinforcement for concrete structures. fib, 2019. DOI: 10.35789/fib.BULL.0090.
- Lomov, S.V., Ivanov, D.S., Truong, T.C., Verpoest, I., et al. Experimental methodology of study of damage initiation and development in textile composites in uniaxial tensile test. Composites Science and Technology, 2008, 68(12):2340–2349.
- Naik, N.K., Shrirao, P. Composite structures under ballistic impact. Composite Structures, 66(1–4), 2004, 579–590. DOI: 10.1016/j.compstruct.2004.05.006.
- Necmettin Erbakan Üniversitesi (NEÜ), “Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (BİTAM),” [https://erbakan.edu.tr/tr/birim/bitam] Erişim: 22.01.2026.
- Scida, D., Aboura, Z., Benzeggagh, M.L. A micromechanics model for 3D elasticity and failure of woven-fibre composite materials. Composites Science and Technology, 1999.

AHŞAP-ÇELİK HİBRİT KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞI

HYBRID BEAMS, TIMBER BEAM, COMPOSITE BEAM

Ömer ALDEMİR¹ ve Sabahattin AYKAÇ²

ÖZET

Bu çalışma, lamine ahşap kirişlerin eğilme rijitliğini ve yük taşıma kapasitesini artırmak amacıyla geliştirilen yenilikçi bir ahşap-çelik hibrit kirişinin yapısal davranışını incelemeyi amaçlamaktadır. Ahşabın düşük elastisite modülü ve doğal kusurlarından kaynaklanan dezavantajlarını gidermek için, kiriş kesitlerine sistematik olarak boyuna ve enine çelik elemanlar ilave edilmiştir. Literatürdeki güçlendirme yöntemlerinde sıklıkla karşılaşılan donatının akma kapasitesine ulaşamaması sorununun, çekme ve basınç donatıları arasında eklenen dikme ve diyagonal elemanlarla kesit içi kuvvet aktarım mekanizmasının iyileştirilerek aşılması hedeflenmektedir. Deneysel program kapsamında, 0.09x0.36x3.9 m boyutlarında toplam 27 adet lamine sarıçam numune tasarlanmıştır. Çalışmanın ana değişkenleri; dört farklı donatı türü (nervürlü donatı, kutu profil, çelik plaka, C profil), donatı yerleşimi (sadece çekme ile çekme ve basınç) ve gövde bağlantı konfigürasyonu (bağlantısız, sadece dikmeli, dikmeli ve diyagonal) olarak belirlenmiştir. Kirişlerin eğilme davranışı, 3.75 m net açıklığa sahip basit mesnetli bir sistemde, dört noktalı eğilme deneyi ile incelenecektir. Deneysel düzeneğinde, yerel ezilmeleri önlemek için kauçuk yastıklar ve yanal stabilite kaybını engellemek için çelik profillerle desteklenmiş bir yanal destek sistemi kullanılmıştır. Deneysel verileri; yük hücresi, kritik noktalara yerleştirilmiş 5 adet LVDT ve görüntü işleme tekniği aracılığıyla toplanacaktır. Önerilen hibrit sistemin, ahşabın sürdürülebilir ve estetik özelliklerini koruyarak yüksek ve stabil mekanik özellikler sunması öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit Kiriş, Ahşap Kiriş, Kompozit Kiriş

ABSTRACT

This study investigates the structural behavior of an innovative timber-steel hybrid beam developed to increase the flexural stiffness and load-carrying capacity of laminated timber. To overcome the disadvantages arising from timber's low modulus of elasticity and natural defects, longitudinal and transverse steel elements have been systematically incorporated into the beam cross-sections. A common issue in strengthening methods within the literature, where the reinforcement fails to reach its yield capacity, is addressed by improving the internal force transfer mechanism through the addition of struts and diagonal elements between the tension and compression reinforcements. The experimental program comprises 27 laminated Scots pine specimens (0.09 x 0.36 x 3.9 m). The primary variables to be investigated are reinforcement type (deformed steel bars, hollow structural sections, steel plates, and C-sections), reinforcement layout (tension-only versus tension and compression), and web connection configuration (unconnected, strut-only, and strut with diagonal). The flexural behavior of the beams will be evaluated using a four-point bending test on a simply supported system with a clear span of 3.75 m. In the experimental setup, rubber bearing pads will be used to prevent local crushing, and a steel-supported lateral bracing system will be employed to prevent lateral-torsional buckling. Experimental data will be collected via a load cell, five LVDTs positioned at critical points, and digital image correlation (DIC). The proposed hybrid system is anticipated to offer high and stable mechanical properties while preserving the sustainable and aesthetic features of timber.

Keywords: Hybrid Beams, Timber Beam, Composite Beam

¹ Arş. Gör., Gazi Üniversitesi, Ankara, omeraldemir@gazi.edu.tr

² Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, Ankara, saykac@gazi.edu.tr

GİRİŞ

Ahşap; geri dönüştürülebilir yapısı ve düşük karbon emisyonu sayesinde, alternatif yapı malzemelerine kıyasla oldukça sürdürülebilir ve çevre dostu bir seçenektir. Estetik açıdan sunduğu geniş tasarım olanakları da ahşap taşıyıcı sistemlerin tercih edilebilirliğini artıran sebeplerden birisidir. Ancak doğal bir malzeme olması sebebiyle, içerdiği yapısal kusur oranı (budak, lif sapması vb.) endüstriyel olarak üretilen diğer standart malzemelere göre daha yüksektir.

Söz konusu doğal kusurların taşıyıcı sistem performansına olan olumsuz etkilerini sınırlamak ve daha homojen kesitler elde etmek amacıyla günümüzde lamine ahşap teknolojisi kullanılmaktadır. Laminasyon işlemi, ahşabın doğal kusurlarını kesit boyunca dağıtarak malzemenin homojenliğini artırır. Buna karşın, ahşabın diğer yapı malzemelerine kıyasla daha düşük bir elastisite modülüne sahip olması, geniş açıklıkları geçilmesini gerektiren durumlarda lamine teknolojisine rağmen görece büyük şekil değişiklikleri beraberinde getirmektedir.

Bu bağlamda, lamine ahşap taşıyıcı elemanların sürdürülebilir, çevreci yapısı ve esnek tasarım olanaklarını koruyarak rijitlik ve dayanım konusundaki zafiyetlerinin giderilmesi amacı ile yenilikçi bir çelik-ahşap hibrit kiriş türü önerilmektedir. Bu çalışma kapsamında, ahşap kirişlere sistematik olarak enine ve boyuna yönde çelik elemanların ilave edilmesini içeren bir deneysel program sunulmaktadır. Geliştirilen bu hibrit kiriş sistemi; ahşabın estetik görünüşünü ve çevreci özellikleri korurken, çeliğin katkısıyla kirişin rijitlik ve dayanımının artırılmasını hedeflemektedir. Böylece yüksek taşıma kapasitesine ve rijitliğe sahip, aynı zamanda dayanım ve rijitlik bakımından standart bir taşıyıcı sistem elemanının elde edilmesi amaçlanmaktadır.

GEÇMİŞ ÇALIŞMALAR

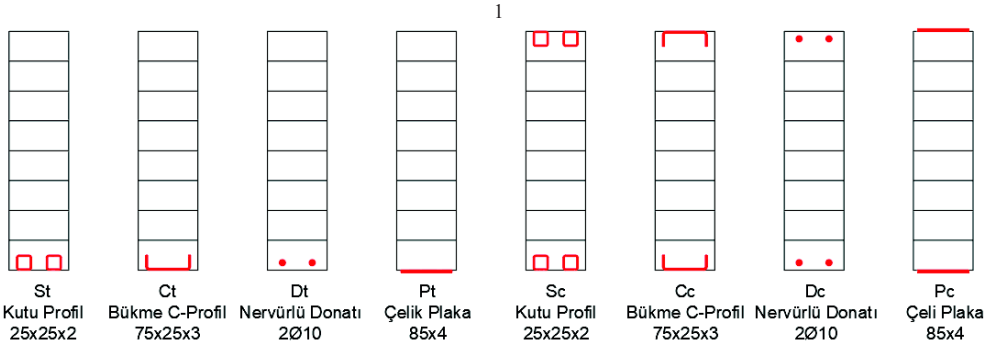
Ahşap taşıyıcı elemanların eğilme dayanımını ve rijitliğini artırmak amacıyla yürütülen güçlendirme çalışmaları, kullanılan yöntemlere göre çeşitlilik göstermektedir. Literatürde karbon, cam gibi polimerler kullanılarak oluşturulan kompozitlerin incelendiği pek çok çalışma bulunmaktadır [1, 2, 4, 5, 7]. Benzer şekilde ahşap kirişlerin çelik takviyeler ile kullanıldığı çalışmalar da literatürde yer almaktadır [3, 8, 9].

Çelik donatılarla yapılan çalışmalarda, öncelikle donatının ahşabın tek yüzünde (çekme bölgesinde) kullanıldığı kompozit kiriş yaklaşımlarına odaklanılmıştır [3, 8]. Bu uygulama dayanım ve rijitlikte artışlar getirse de ilave edilen çelik donatının akma seviyesine ulaşmadan ahşabın göçmesi nedeniyle güçlendirme malzemesinin tam kapasiteyle çalışmadığı durumlar ile karşılaşmıştır [8, 9]. Bu verimsizliği aşmak amacıyla, ahşabın hem çekme hem de basınç yüzlerine çelik donatı yerleştirilmesi [9] ve/veya donatıların ardgerme ile ahşaba entegre edilmesi [3, 6, 10] gibi yöntemler denenmiş ve bu yöntem ile ilave edilen malzemenin etkinliği artırılmıştır.

Literatürde gözlemlenen bu gelişimden hareketle, bu çalışmada donatı etkinliğini daha da ileriye taşıyacak yeni bir konfigürasyon tasarlanmıştır. Sistemde çekme ve basınç bölgelerine ana donatılar yerleştirilecek ve literatürdeki uygulamalardan farklı olarak, alt ve üst donatılar arasında gerilme aktarımını sürekli kılacak dikme ve diyagonal ekleneyecektir. Bu yaklaşım sayesinde, kesit içerisindeki kuvvet aktarım mekanizmasının iyileştirilmesi, eklenen donatıların akma sınırlarına ulaşarak tam verimle çalışması ve deney elemanlarının nihai dayanım ile rijitlik özelliklerinin bütüncül olarak artırılması hedeflenmektedir.

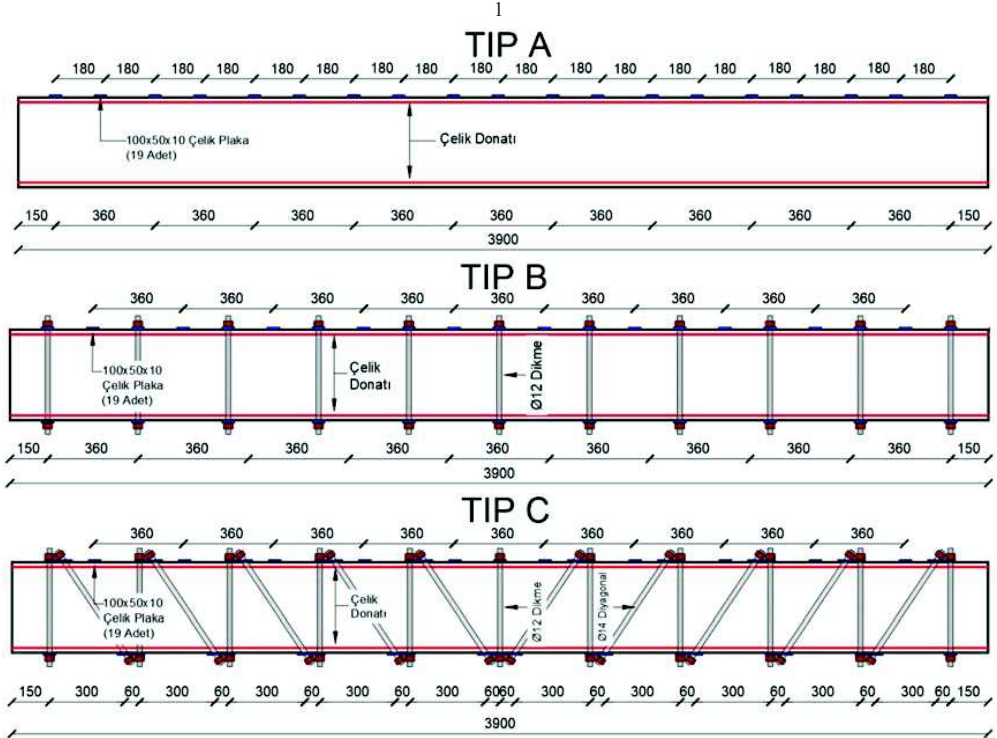
DENEY NUMUNELERİ

Sunulan deney programı, her biri 0.09x0.04x3.9 m boyutlarında 8 adet sarı çam lamelin birleştirilmesiyle elde edilen, nihai boyutları 0.09x0.36x3.9 m olan toplam 27 adet lamine ahşap numuneden oluşmaktadır (Tablo 1). Çalışma kapsamında, ahşabın doğal kusurlarından kaynaklanabilecek olası dayanım ve rijitlik sapmalarını değerlendirebilmek amacıyla 3 adet numune herhangi bir çelik ilavesi olmaksızın referans olarak ayrılmıştır. Geriye kalan numuneler; kesitte bulunan donatı türü, basınç donatısının varlığı ve dikme-diyagonal konfigürasyonu olmak üzere 3 temel değişken göz önünde bulundurulmuş ve türetilmiştir.



Şekil 1. Deney elemanlarında kullanılan donatı türü ve kesit düzenlemeleri

Bu doğrultuda, 2Ø10 nervürlü donatı, 2 adet 25x25x2 kutu profil, 85x4 çelik plaka ve 75x25x3 C profil olmak üzere toplam 4 farklı donatı türü kullanılmıştır. Ayrıca tüm donatı türleri sadece çekme donatısı ve çekme+basınç donatısı olmak üzere iki farklı enkesit düzenlemesi dikkate alınarak deney sistematiğine dahil edilmiştir (Şekil-1). Nervürlü donatı, kutu profil ve C profilin ahşap yüzeyinde açılan kanallara, çelik plakanın ise doğrudan ahşap yüzeyine epoksi ile yapıştırılması planlanmaktadır.



Şekil 2. Deney elemanlarında kullanılan dikme ve diyagonal düzenlemeleri

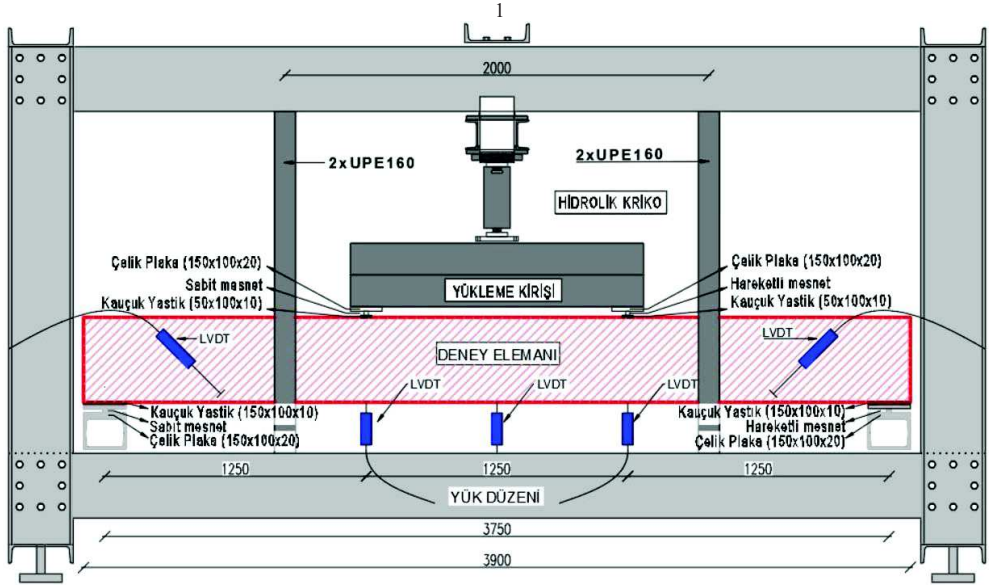
Basınç bölgesindeki donatılarda oluşabilecek burkulma riski göz önüne alınarak, donatının serbest burkulma boyunu kısaltmak amacıyla her 0.18 m'de bir 90x50x5 mm boyutlarındaki çelik plakaların 2 adet Ø4 mm vida ile ahşaba mekanik olarak bağlanması öngörülmüştür. Dikme içeren deney elemanlarında hali hazırda dikmenin bağlandığı çelik plakaların burkulmayı önleyici etkisi olduğundan bu elemanlarda plaka aralığı 0.36 m'ye çıkarılmıştır.

Deney elemanlarının tasarımındaki üçüncü parametre kapsamında, dikme ve diyagonallerin yerleşimi açısından 3 farklı konfigürasyon belirlenmiştir: dikme ve diyagonalin bulunmadığı durum (Tip A), sadece dikmelerin bulunduğu durum (Tip B) ve dikme ile diyagonallerin birlikte kullanıldığı durum (Tip C) (Şekil 2). Numunelerde kullanılacak dikme elemanlarının çapı 12 mm, diyagonal elemanların çapı ise 14 mm olarak belirlenmiştir. Bu boyutlar, çekme donatısının akma gerilmesine ulaştığı sınır durum göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Dikme ve diyagonal donatıların, kiriş kesitinin kısa kenar orta aksı hizasında açılacak deliklerin içerisine epoksi yardımı ile yapıştırılması planlanmaktadır. Buna ek olarak, söz konusu donatılar kirişin alt ve üst yüzeylerine yerleştirilecek 10 mm kalınlığındaki plakalar aracılığıyla ağşap elemana mekanik olarak bağlanacaktır.

DENEY SİSTEMİ

Önerilen deneysel çalışma, düşey yüklere maruz basit mesnetli kirişlerin rijitliğinin ve dayanımının iyileştirilmesini amaçlayan yeni bir hibrit kiriş türü önermektedir. Buna paralel olarak ¼ ölçek ile tasarlanan deney sisteminde 3.75 m açıklığa sahip numuneler, bir hareketli ve bir sabit mesnet üzerinde test edilmesi planlanmıştır. Yükleme sistemi, noktasal kusurların deney sonucu üzerindeki etkisini sınırlamak amacıyla 4 noktalı olarak tercih edilmiştir. Yükleme noktaları kiriş açıklığını üç eşit parçaya bölen noktalardan yapılması planlanmıştır.

AĞşap yüzeyinde gerçekleşebilecek olası yerel ezilmeleri önlemek amacı ile hem mesnet hem de yükleme noktalarında kauçuk yatak kullanılması öngörülmektedir. Ayrıca numunelerin genişlik/yükseklik oranının düşük olması, deney sırasında kirişin düzlem dışı yönde hareket etme riskini beraberinde getirmektedir. Bu problemi önlemek amacıyla deney elemanı, açıklık orta noktasından sağa ve sola 1'er metre mesafedeki iki noktadan yanal olarak desteklenecektir. Yanal destek mekanizması, deney numunesinin iki adet UPE160 çelik profil arasına alınması ile oluşturulacaktır; sistemin düşeyde serbestçe hareket etmesi amacıyla temas rulmanlar ile sağlanacaktır.

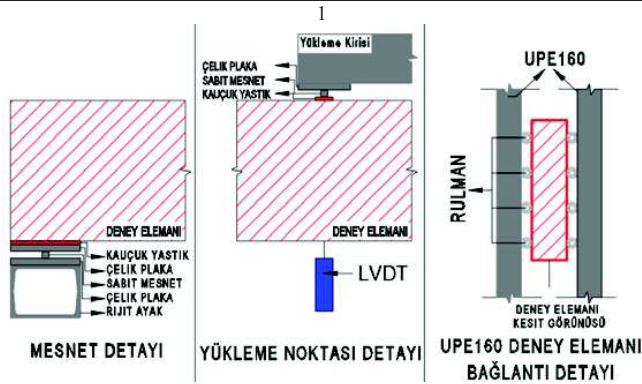


Şekil 3. Yükleme ve ölçüm sistemi çizimi

Deney ölçüm sisteminin hidrokrikoya bağlanacak bir yük hücresi ve 5 adet LVDT'den oluşmaktadır. Kiriş açıklık ortası ve yükleme noktalarındaki düşey yer değiştirmeler ve mesnet bölgesindeki diyagonal yer değiştirmeler takip edilecektir. Buna ek olarak görüntü işleme ile yer değiştirme verisinin toplanması planlanmıştır.

Tablo 1. Deney numunelerinin özellikleri

No	Numune Adı	Çekme Donatısı	Basınç Donatısı	Donatı Boyutları	Dikme	Diyagonal	Burkulma Vidaları
1	R1	---	---	---	Yok	Yok	Yok
2	R2	---	---	---	Yok	Yok	Yok
3	R3	---	---	---	Yok	Yok	Yok
4	A-St	Kutu Profil	Yok	2x25.25.2	Yok	Yok	(Ø4/180)
5	A-Ct	C Profil	Yok	75.25.3	Yok	Yok	(Ø4/180)
6	A-Dt	Nervürlü Donatı	Yok	2Ø10	Yok	Yok	(Ø4/180)
7	A-Pt	Çelik Plaka	Yok	85x4	Yok	Yok	(Ø4/180)
8	B-St	Kutu Profil	Yok	2x25.25.2	Ø12	Yok	(Ø4/360)
9	B-Ct	C Profil	Yok	75.25.3	Ø12	Yok	(Ø4/360)
10	B-Dt	Nervürlü Donatı	Yok	2Ø10	Ø12	Yok	(Ø4/360)
11	B-Pt	Çelik Plaka	Yok	85x4	Ø12	Yok	(Ø4/360)
12	C-St	Kutu Profil	Yok	2x25.25.2	Ø12	Ø14	(Ø4/360)
13	C-Ct	C Profil	Yok	75.25.3	Ø12	Ø14	(Ø4/360)
14	C-Dt	Nervürlü Donatı	Yok	2Ø10	Ø12	Ø14	(Ø4/360)
15	C-Pt	Çelik Plaka	Yok	85x4	Ø12	Ø14	(Ø4/360)
16	A-Sc	Kutu Profil	Kutu Profil	2x25.25.2	Yok	Yok	(Ø4/180)
17	A-Cc	C Profil	C Profil	75.25.3	Yok	Yok	(Ø4/180)
18	A-Dc	Nervürlü Donatı	Çelik Donatı	2Ø10	Yok	Yok	(Ø4/180)
19	A-Pc	Çelik Plaka	Çelik Plaka	85x4	Yok	Yok	(Ø4/180)
20	B-Sc	Kutu Profil	Kutu Profil	2x25.25.2	Ø12	Yok	(Ø4/360)
21	B-Cc	C Profil	C Profil	75.25.3	Ø12	Yok	(Ø4/360)
22	B-Dc	Nervürlü Donatı	Çelik Donatı	2Ø10	Ø12	Yok	(Ø4/360)
23	B-Pt	Çelik Plaka	Çelik Plaka	85x4	Ø12	Yok	(Ø4/360)
24	C-Sc	Kutu Profil	Kutu Profil	2x25.25.2	Ø12	Ø14	(Ø4/360)
25	C-Cc	C Profil	C Profil	75.25.3	Ø12	Ø14	(Ø4/360)
26	C-Dc	Nervürlü Donatı	Çelik Donatı	2Ø10	Ø12	Ø14	(Ø4/360)
27	C-Pc	Çelik Plaka	Çelik Plaka	85x4	Ø12	Ø14	(Ø4/360)



Şekil 4. Yükleme ve ölçüm sistemi detay çizimleri

SONUÇ

Bu deneysel çalışma sonucunda, lamine ağşap kirişlerin çelik elemanlarla güçlendirilmesiyle elde edilen yenilikçi hibrit taşıyıcı sistemin, standart lamine ağşap kirişlere kıyasla daha yüksek bir eğilme rijitliği ve yük taşıma kapasitesi sunması beklenmektedir. Ayrıca tasarlanan hibrit kiriş sistemi sayesinde göçme mekanizmasını daha standart ve sürekl davranış gösteren çelik birimlerin yönetmesi beklenmektedir.

Gerçekleştirilecek deney programı ve elde edilecek veriler ışığında, farklı donatı profillerinin (nervürlü donatı, kutu profil, çelik plaka ve C profil) ve yerleşim düzenlerinin hibrit kirişin mekanik performansı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilecektir. Buna ek olarak, gövde bağlantı konfigürasyonlarının (bağlantısız, sadece dikmeli, dikmeli ve diyagonal) kesit içi kuvvet aktarımına ve sistemin bütüncül dayanımına olan katkısının deneysel olarak kanıtlanması hedeflenmektedir.

Nihai olarak, ağşabın düşük karbon emisyonlu, geri dönüştürülebilir ve estetik doğası korunarak; inşaat endüstrisi için rijitlik ve dayanım açısından güvenilir, yüksek performanslı ve standart bir kompozit yapı elemanının literatüre kazandırılması amaçlanmaktadır. Elde edilecek bulguların, sürdürülebilir yapı tasarımı ve tarihi ağşap yapıların restorasyonu alanlarındaki pratik uygulamalara önemli bir temel oluşturması beklenmektedir.1

KAYNAKLAR

- [1] Borri A, Corradi M and Grazini A (2005) "A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials," *Composites Part B: Engineering*, 36(2):143-153
- [2] D'Ambrisi A, Focacci F and Luciano R (2014) "Experimental investigation on flexural behavior of timber beams repaired with CFRP plates," *Composite Structures*, 108:720-728
- [3] De Luca V and Marano C (2012) "Prestressed glulam timbers reinforced with steel bars," *Construction and Building Materials*, 30:206-217
- [4] Micelli F, Scialpi V and La Tegola A (2005) "Flexural reinforcement of glulam timber beams and joints with carbon fiber-reinforced polymer rods," *Journal of Composites for Construction*, 9(4):337-347
- [5] Nowak TP, Jasiğko J and Czepizak D (2013) "Experimental tests and numerical analysis of historic bent timber elements reinforced with CFRP strips," *Construction and Building Materials*, 40:197-206
- [6] Shi B, Zhu W, Yang H, Liu W, Tao H and Ling Z (2019) "Experimental and theoretical investigation of prefabricated timber-concrete composite beams with and without prestress," *Engineering Structures*, 192:45-59
- [7] Sokolowski PK and Kossakowski PG (2023) "Static analysis of wooden beams strengthened with FRCM-PBO composite in bending," *Materials*, 16(5):1870
- [8] Wei Y, Zhou MQ and Chen DJ (2015) "Flexural behaviour of glulam bamboo beams reinforced with near-surface mounted steel bars," *Materials Research Innovations*, 19(sup1):S1-98-S1-103
- [9] Wei Y, Yan S, Zhao K, Dong F and Li G (2020) "Experimental and theoretical investigation of steel-reinforced bamboo scrimber beams," *Engineering Structures*, 223:111179
- [10] Yang H, Ju D, Liu W and Lu W (2016) "Prestressed glulam beams reinforced with CFRP bars," *Construction and Building Materials*, 109:73-83

BETONARME ÇERÇEVELERDE ORTA KOLON KALDIRILMASI SENARYOSU ALTINDA AŞAMALI GÖÇME DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PROGRESSIVE COLLAPSE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE FRAMES UNDER A MIDDLE COLUMN REMOVAL SCENARIO

Bedirhan KEÇECİ¹, Fezayil SUNCA², Muhammed Cihat ŞAHİN³, Omair MOHİELDİN⁴,
Adem DOĞANGÜN⁵, Ahmet Can ALTUNIŞIK⁶

ÖZET

Aşamalı göçme, bir yapıda meydana gelen lokal bir hasarın diğer taşıyıcı elemanlara yayılması sonucu, yapının tamamının veya önemli bir kısmının göçmesi ile sonuçlanan bir göçme mekanizmasıdır. Bu çalışmada, betonarme çerçevelerde orta kolon kaldırılması senaryosu altında aşamalı göçme davranışının deneysel olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Numuneler, 1/3 ölçekli, iki açıklıklı ve iki katlı çerçeve sistemleri olarak tasarlanmış olup, tüm numunelerde geometrik özellikler aynı tutulmuştur. Bu kapsamda, ikisi güncel deprem yönetmeliğine uygun, diğer ikisi ise mevcut yapı stokunu temsil eden düşük beton dayanımı ve yetersiz detaylandırmaya sahip toplam dört adet betonarme çerçeve numunesi üretilmiştir. Deneysel incelemeler için, çerçeve sisteminin sınır koşullarını ve yük aktarım mekanizmalarını temsil edecek bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Bu düzende, kenar kolonlara sabit eksenel yük uygulanırken, orta kolon üzerine yerdeğiştirme kontrollü yükleme uygulanarak kolonun sistemden kaldırılması senaryosu temsil edilmektedir. Deneyler sırasında, sistemin yük-yerdeğiştirme davranışı, taşıma kapasitesi, hasar gelişimi ve göçme mekanizmaları izlenecektir. Elde edilecek sonuçlardan hareketle, yönetmeliğe uygun numuneler ile yetersiz detaylandırmaya sahip numunelerin aşamalı göçme davranışları karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek, beton dayanımı ve detaylandırmanın bu davranış üzerindeki etkilerinin ortaya konulması hedeflenmektedir. Anahtar Kelimeler: Aşamalı göçme, Betonarme çerçeveler, Orta kolon kaldırılması, Detaylandırma ve beton dayanımı

ABSTRACT

Progressive collapse is a structural failure mechanism characterized by the propagation of local damage from one structural element to others, resulting in the collapse of the entire structure or a significant portion of it. In this study, the progressive collapse behavior of reinforced concrete frames under a middle column removal scenario is investigated experimentally. The specimens were designed as two-bay, two-story frame systems at a 1/3 scale, and the geometric properties were kept identical for all specimens. Within this scope, a total of four reinforced concrete frame specimens were produced, two of which were designed in accordance with the current seismic code, while the other two represent the existing building stock with low concrete strength and inadequate detailing. For the experimental investigation, a test setup was designed to represent the boundary conditions and load transfer mechanisms of the frame system. In this setup, constant axial loads are applied to the edge columns, while displacement-controlled loading is

¹ Arş. Gör., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, bedirhankececi@ktu.edu.tr

² Doç. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, fezayilsunca@ktu.edu.tr

³ Yük. İnş. Müh., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, mcshivil@gmail.com

⁴ Yük. İnş. Müh., Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, omair.elshafei@gmail.com

⁵ Prof. Dr., Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, adogangun@uludag.edu.tr

⁶ Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, ahmetcan@ktu.edu.tr

applied to the middle column to simulate the column removal scenario. During the experiments, the load–displacement response, load-carrying capacity, damage progression, and collapse mechanisms of the system will be monitored. Based on the results obtained, the progressive collapse behaviors of code-compliant specimens and those with inadequate detailing will be comparatively evaluated, and the effects of concrete strength and detailing on this behavior will be identified.

Keywords: Progressive collapse, Reinforced concrete frames, Column removal, Detailing and concrete strength

GİRİŞ

Aşamalı göçme, bir yapıda meydana gelen lokal bir hasarın elemandan elemana yayılması sonucu, yapının tamamının veya orantısız büyüklükte bir kısmının göçmesi ile karakterize edilen bir göçme mekanizmasıdır (GSA, 2016; DoD, 2024). Bu tür göçmeler genellikle patlama, çarpma, yangın veya taşıyıcı elemanın ani kaybı gibi olağandışı etkiler sonucunda ortaya çıkmakta olup, yapı güvenliği açısından ciddi riskler oluşturmaktadır. Aşamalı göçmenin önlenmesine yönelik tasarım yaklaşımları ve değerlendirme yöntemleri bu nedenle son yıllarda hem yönetmeliklerde hem de bilimsel çalışmalarda önemli bir yer edinmiştir (Adam vd., 2018).

Betonarme çerçeve sistemlerde aşamalı göçme davranışı çoğunlukla bir kolonun ani kaybı ile başlamakta ve bu durumda yüklerin alternatif yük yolları üzerinden yeniden dağıtılması gerekmektedir. Yapının yeterli süneklik ve sürekliliğe sahip olmaması durumunda yük aktarımı etkin bir şekilde sağlanamamaktadır ve göçme ilerleyerek sistemin bütünlüğünü tehdit etmektedir. Bu nedenle, yapı elemanları arasında yeterli bağlanma ve sürekliliğin sağlanması, alternatif yük yollarının oluşturulması ve sünek davranışın temin edilmesi aşamalı göçmeye karşı dayanım açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY, 2018), yapıların sünek davranış kapasitesinin artırılmasına yönelik detaylandırma kuralları içermekte olup, bu tür detaylandırma yaklaşımlarının aşamalı göçme davranışı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

Literatürde, betonarme kiriş-kolon alt birleşimlerinin aşamalı göçme davranışını incelemeye yönelik çok sayıda deneysel çalışma yer almaktadır. Bu çalışmalar, özellikle kolon kaldırılması senaryosu altında yük–yer değiştirme ilişkileri, çatlak gelişimi ve göçme mekanizmalarının değerlendirilmesine odaklanmaktadır. Choi ve Kim (2011), sismik olarak detaylandırılmış sistemlerde kirişlerde gelişen katener etkisinin (catenary action), yapının yük taşıma kapasitesini göçme sonrasında kadar sürdürdürebildiğini ve daha yüksek yerdeğiştirme kapasitesi sağladığını ortaya koymuştur. Benzer şekilde, Qian ve Li (2012) tarafından yapılan çalışmada, sismik ve sismik olmayan detaylandırmaya sahip numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerde, sismik detaylandırmanın aşamalı göçmeye karşı direnci önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir. Ayrıca, Almusallam vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, sismik olarak detaylandırılmış özel moment çerçevelerinin, sismik detaylandırmaya sahip olmayan normal moment çerçevelerine kıyasla daha yüksek göçme yükü ve deformasyon kapasitesi sergilediği belirlenmiştir.

Bununla birlikte, mevcut çalışmalar çoğunlukla kiriş-kolon alt birleşimleri veya basitleştirilmiş alt sistemler üzerine odaklanmaktadır. Ayrıca, sismik ve sismik olmayan detaylandırmanın yanı sıra malzeme özelliklerindeki farklılıkların birlikte ele alındığı çalışmaların sayısı nispeten azdır. Bu bağlamda, farklı detaylandırma ve malzeme özelliklerine sahip betonarme çerçeve sistemlerin aşamalı göçme davranışının deneysel olarak incelenmesi faydalı olacaktır.

Bu çalışmada, betonarme çerçevelerde orta kolon kaldırılması senaryosu altında aşamalı göçme davranışı deneysel olarak incelenmektedir. Bu amaçla, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e uygun olarak detaylandırılmış numuneler ile mevcut yapı stokunu temsil eden, düşük dayanımlı beton ve yetersiz detaylandırmaya sahip numuneler karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Çalışmada, detaylandırma ve beton dayanımının aşamalı göçme davranışı üzerindeki etkilerinin sistem düzeyinde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi hedeflenmektedir.

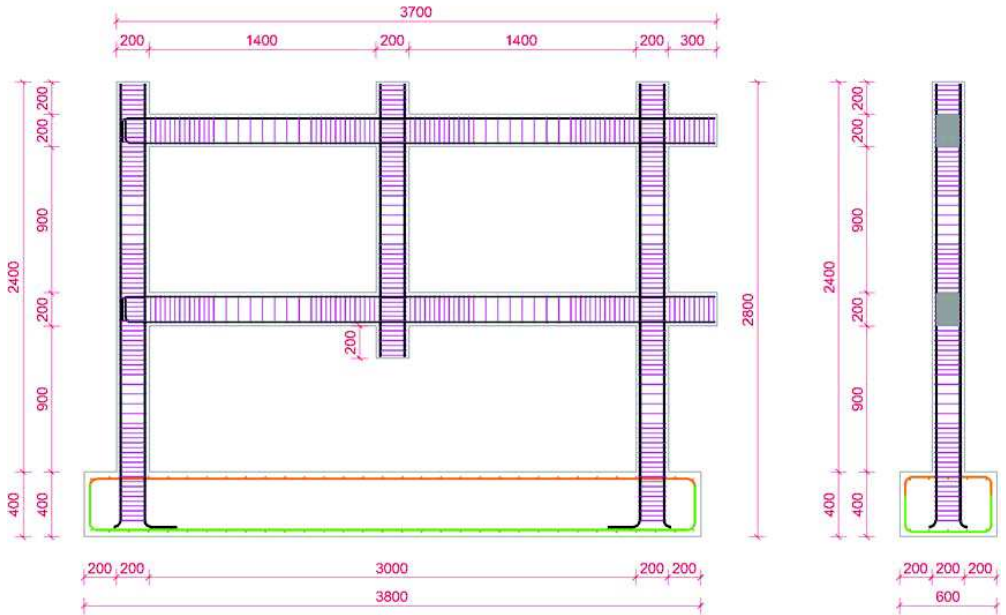
DENEYSSEL ÇALIŞMA

Bu çalışma kapsamında, betonarme çerçevelerde orta kolon kaldırılması senaryosu altında aşamalı göçme davranışını incelemek amacıyla dört adet deney numunesi üretilmiştir. Numuneler, TBDY 2018'e uygun ve uygun olmayan tasarım özelliklerini temsil edecek şekilde iki farklı grupta tasarlanmıştır. Bu doğrultuda iki adet numune TBDY 2018'e uygun olarak detaylandırılırken, diğer iki numune mevcut yapı stokunu temsil edecek şekilde yönetmelik şartlarını sağlamayan özelliklere sahip olacak biçimde tasarlanmıştır.

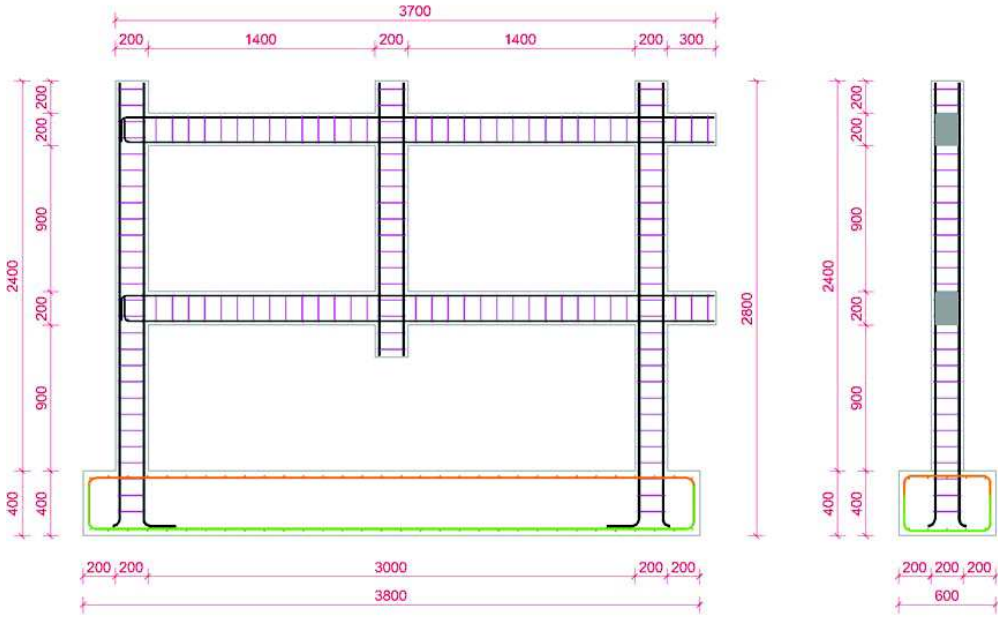
Deney numuneleri, orta kolon kaldırılması senaryosunun incelenebilmesi amacıyla, prototip bir yapıdan seçilen tipik bir iç çerçevenin temsil edilmesi esas alınarak oluşturulmuştur. Numuneler iki açıklıklı ve iki katlı betonarme çerçeve sistemleri olarak tasarlanmış ve 1/3 ölçekli olarak üretilmiştir. Ölçeklendirme kapsamında, tüm numunelerde kolon kesitleri 200×200 mm, kiriş kesitleri 150×200 mm, kat yüksekliği 1100 mm ve açıklık uzunluğu 1600 mm olarak belirlenmiştir.

TBDY 2018'e uygun olarak tasarlanan numunelerde C30/37 beton sınıfı ve B420C donatı kullanılmıştır. Kolonlarda boyuna donatı olarak 4φ12 nervürlü donatı tercih edilmiş, kirişlerde boyuna donatı düzeni açıklık ve mesnet bölgelerinde alt ve üstte 2φ8 olacak şekilde belirlenmiştir. Bu numunelerde kolon ve kirişlerde enine donatı olarak φ5 çapında etriyeler kullanılmış, etriye aralıkları yönetmelik koşullarına uygun şekilde sık tutulmuş ve etriyelerde 135° kanca detayları tercih edilmiştir. Buna karşılık, TBDY 2018'e uygun olmayan numuneler mevcut yapı stokunda yaygın olarak karşılaşılan yetersiz malzeme ve detaylandırma özelliklerini temsil edecek şekilde tasarlanmış olup, bu numunelerde düşük dayanımlı beton (C12/15) kullanılmıştır. Boyuna donatı düzeni aynı tutulurken, enine donatı aralıkları artırılmış ve etriyelerde 90° kanca detayları tercih edilmiştir.

Hazırlanan uygulama projeleri ve donatı detaylarına bağlı kalınarak tüm numunelerin üretimi gerçekleştirilmiş, üretim süreci laboratuvar ortamında kontrollü şekilde yürütülmüştür. Üretilen TBDY 2018'e uygun ve uygun olmayan numunelere ait boyutlar ve donatı detayları sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de sunulmaktadır.



Şekil 1. TBDY 2018'e uygun numuneye ait boyut ve donatı detayları

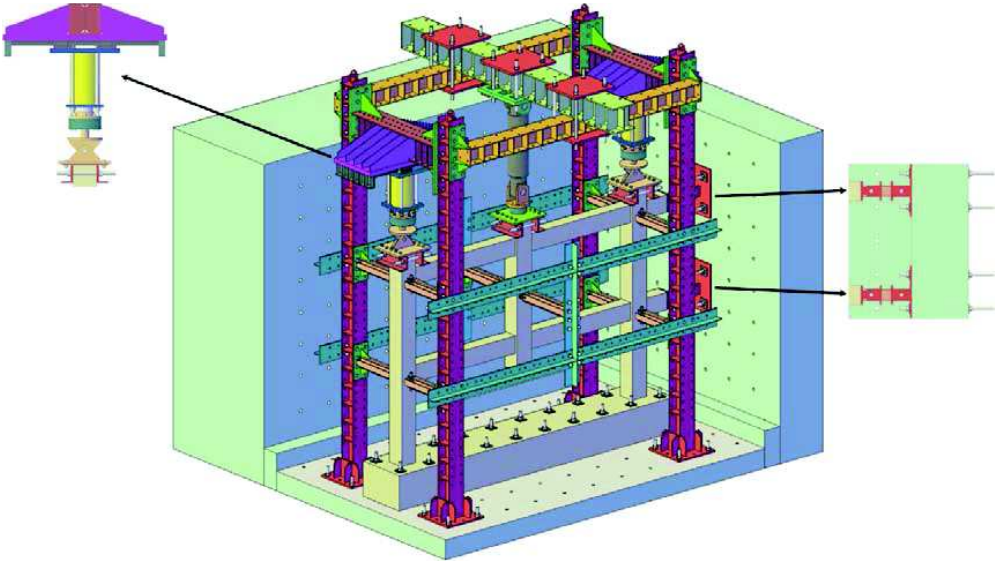


Şekil 2. TBDY 2018'e uygun olmayan numuneye ait boyut ve donatı detayları

Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi amacıyla, numunelerin sınır koşullarını ve yük aktarım mekanizmalarını temsil edecek şekilde çelik taşıyıcı çerçeveden oluşan bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Deney sistemi, yeterli rijitlik ve stabiliteyi sağlayacak biçimde oluşturulmuş, deney sırasında oluşabilecek istenmeyen yer değiştirmelerin sınırlandırılması amacıyla çeşitli bağlantı ve destek elemanları ile güçlendirilmiştir.

Deney düzeneğinde, çerçeve sistemine etkiyen eksenel yüklerin uygulanabilmesi amacıyla hidrolik krikolar kullanılmıştır. Kenar kolonların üstüne yerleştirilen hidrolik krikolar aracılığıyla kolon eksenel taşıma kapasitesinin yaklaşık %20'si seviyesinde sabit yük uygulanmaktadır. Bu yükleme sisteminde, kenar kolonlarda oluşabilecek yatay yer değiştirmelere rağmen eksenel yük doğrultusunun korunabilmesi amacıyla lineer ray sistemi kullanılmıştır. Bu sayede, uygulanan yükün kolon eksenini boyunca dik olarak etkimesi sağlanarak daha gerçekçi bir yükleme durumu elde edilmiştir. Orta kolon üzerine yerleştirilen hidrolik kriko ile yerdeğiştirme kontrollü yükleme uygulanarak kolonun sistemden kaldırılması senaryosu temsil edilmekte ve bu sayede sistemin aşamalı göçme davranışı incelenmektedir.

Deney süresince, betonarme çerçeve sisteminde meydana gelen kuvvetlerin, yerdeğiştirmelerin ve donatılarda oluşan birim şekil değiştirmelerin izlenebilmesi amacıyla çeşitli ölçüm sistemleri kullanılmıştır. Kolonlara uygulanan eksenel yükler, hidrolik krikolar ile entegre çalışan yük hücreleri aracılığıyla ölçülmekte ve bu sayede deney sırasında uygulanan yükler gerçek zamanlı olarak izlenerek kaydedilmektedir. Çerçeve sisteminde oluşan yerdeğiştirmelerin belirlenmesi amacıyla lineer potansiyometreler kullanılmış olup, bu sensörler kaldırılan kolonun altına ve bu kolona bağlanan kirişlerin kritik noktalarında konumlandırılmıştır. Ayrıca, deney süresince kiriş donatılarında meydana gelen birim şekil değiştirmelerin belirlenebilmesi için kaldırılan kolonun her iki tarafındaki kirişlerin boyuna donatıları üzerine şekildeğiştirme ölçerler yerleştirilmiştir. Elde edilen tüm ölçüm verileri veri toplama sistemi aracılığıyla eş zamanlı olarak kaydedilmektedir. Tasarlanan deney düzeneğinin genel görünümü Şekil 3'te verilmektedir.



Şekil 3. Deney düzeneğinin genel görünümü

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, betonarme çerçevelerde orta kolon kaldırılması senaryosu altında aşamalı göçme davranışının deneysel olarak incelenmesine yönelik bir deney programı geliştirilmiş, deney numuneleri üretilmiş ve deney düzeneği tasarlanmıştır. TBDY 2018'e uygun olarak detaylandırılmış numuneler ile mevcut yapı stokunu temsil eden düşük dayanımlı beton ve yetersiz detaylandırma özelliklerine sahip numuneler kullanılarak, malzeme ve detaylandırma farklılıklarının aşamalı göçme davranışı üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi hedeflenmektedir.

Deney programı kapsamında elde edilecek veriler ile orta birleşim yerdeğiştirmesine bağlı olarak düşey yük kapasitesindeki değişim, kenar kolonların yanıl yerdeğiştirmeleri, kirişlerde oluşan düşey deplasmanlar ve kiriş boyuna donatılarında meydana gelen birim şekil değiştirmeler gibi temel mekanik davranışların belirlenmesi planlanmaktadır. Ayrıca, numunelerin yük taşıma kapasiteleri (akma yükü, ilk pik yük ve maksimum yük) karşılaştırılarak malzeme ve detaylandırma farklılıklarının sistem davranışı üzerindeki etkileri ortaya konulacaktır.

Bununla birlikte, deneyler sırasında oluşacak çatlak gelişimleri, hasar modları ve farklı yerdeğiştirme seviyelerine karşılık gelen hasar dağılımları incelenerek aşamalı göçme sürecinin fiziksel mekanizmalarının daha iyi anlaşılması sağlanacaktır. Elde edilecek bulguların, betonarme çerçevelerde alternatif yük aktarım mekanizmalarının değerlendirilmesine ve mevcut yapı stokunun aşamalı göçme performansının yorumlanmasına katkı sağlaması beklenmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından Araştırma Üniversiteleri Destek Programı Projesi kapsamında desteklenmektedir. Proje numarası: FBA-2024-11059.

KAYNAKLAR

GSA (General Services Administration) (2016) Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance, General Services Administration, Washington, DC

- Department of Defense (DoD) (2024) UFC 4-023-03: unified facilities criteria - design of buildings to resist progressive collapse, Washington, DC
- Adam JM, Parisi F, Sagaseta J, Lu X (2018) “Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century,” *Engineering Structures*, 173:122–149
- TBDY (2018) Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara
- Choi H and Kim J (2011) “Progressive collapse-resisting capacity of reinforced concrete beam-column subassembly,” *Engineering Structures*, 33(3):1070–1080
- Qian K and Li B (2012) “Experimental study of dynamic progressive collapse of reinforced concrete frame structures,” *Engineering Structures*, 40: 209–221
- Almusallam TH, Elsanadedy HM, Abbas H, Al-Salloum YA, Alsayed SH (2017) “Progressive collapse potential of reinforced concrete moment-resisting frames considering different detailing levels,” *Engineering Structures*, 155: 1–12

BETONARME KİRİŞLERDE BURULMA DENEYLERİ İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ YÜKLEME DÜZENİĞİ

AN IMPROVED LOADING SETUP FOR TORSION TESTS OF RC BEAMS

O. Kağan KESKİN¹, Mehmet KAMANLI², Abdulkadir SOLAK³, Salih CENGİZ⁴, Alptuğ ÜNAL⁵

ÖZET

Bu çalışmada, betonarme kirişlerin burulma davranışını incelemek amacıyla özgün bir deneysel yükleme düzeneği geliştirilmiştir. Tasarlanan sistem, kirişlere kontrollü şekilde burulma momenti uygulanmasına olanak sağlamaktadır. Deneysel program kapsamında üretilen dikdörtgen ve T kesitli numuneler üzerinde yük, deplasman ve dönme ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, burulma etkisi altında kirişlerde iki yönde birbirine dik olacak şekilde yaklaşık 45° eğimli çatlaklar oluşmuş ve göçme bu çatlaklar üzerinden gerçekleşmiştir. Geliştirilen düzenek sayesinde düşük maliyetle güvenilir deneyler yapılabileceği ve burulma davranışına yönelik çalışmaların artırılacağı değerlendirilmiştir.
Anahtar Kelimeler: Betonarme kiriş, Burulma, Deneysel çalışma

ABSTRACT

In this study, a novel experimental loading setup was developed to investigate the torsional behavior of reinforced concrete beams. The proposed system enables the controlled application of torsional moments to the beams. Within the experimental program, load, displacement, and rotation measurements were carried out on rectangular and T-section specimens. The results showed that, under torsional effects, cracks formed at approximately 45° in two perpendicular directions, and failure occurred along these cracks. It was concluded that the developed setup allows reliable and cost-effective testing and can contribute to increasing studies on torsional behavior.

Keywords: Reinforced concrete beam, Torsion, Experimental study

GİRİŞ

Betonarme sistemler, yapı sektöründe yaygın olarak kullanılan taşıyıcı sistemlerdir. Bu sistemlerde yapı güvenliği açısından temel elemanların davranışlarının incelenmesi önemlidir. Kirişler, yükleri döşemelerden kolonlara aktaran başlıca elemanlar olup eğilme, kesme ve burulma etkilerine maruz kalmaktadır. Burulma çoğunlukla ikincil bir etki olarak değerlendirilse de düzensiz geometrilili yapılarda, kenar kirişlerde ve konsollarda belirleyici olabilir. Deprem sonrası hasar incelemeleri de burulmanın yapısal davranış üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır (Kamanlı vd., 2023).

¹ İnş. Yük. Müh., Konya Teknik Üniversitesi, Konya, oguzkagankeskin@outlook.com

² Prof. Dr., Konya Teknik Üniversitesi, Konya, mkamanli@ktun.edu.tr

³ Arş. Gör., Konya Teknik Üniversitesi, Konya, abdulcadirsolak@ktun.edu.tr

⁴ Öğr. Gör. Dr., Konya Teknik Üniversitesi, Konya, scengiz@ktun.edu.tr

⁵ Doç. Dr., Konya Teknik Üniversitesi, Konya, aunal@ktun.edu.tr

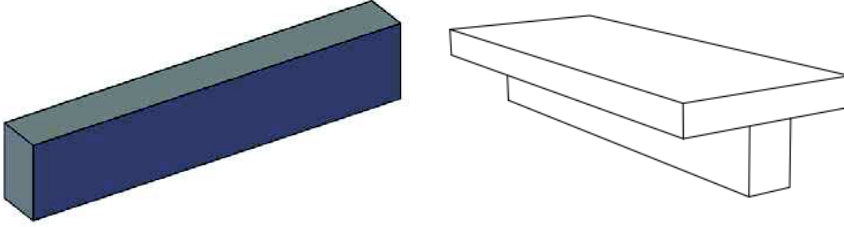
Literatürde çalışmaların büyük bölümü kirişlerin eğilme ve kesme davranışına odaklanırken, burulma davranışı sınırlı düzeyde incelenmiştir (Solak vd, 2024; Cengiz vd., 2024; Koutchoukali vd., 1997; Ünal vd., 2023; Yang vd., 2013). Ancak betonarme elemanların monolitik yapısı nedeniyle burulma etkisi yaygındır (Ersoy ve Özcebe, 2016). Burulma, tek başına ya da diğer iç kuvvetlerle birlikte etkili olarak eleman davranışını belirler. Bu nedenle burulmanın, özellikle süneklik ve enerji tüketimi gibi performans parametreleri üzerindeki etkisi göz ardı edilmemelidir. Bu bağlamda, aderansı düşük nervürlü (düz) donatı ile üretilmiş taşıyıcı elemanların mevcut yapı stokunda yapısal zafiyet oluşturduğu ve gelecekte risk teşkil edebileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca düşük beton dayanımı, yetersiz kesit boyutları ve deprem düzensizlikleri de yapısal bütünlük açısından sorunlar oluşturmaktadır (Ersoy, 1975).

Literatürde burulma davranışını inceleyen çalışmalar kirişler ve büyük kesitli köprü kolonları üzerine yoğunlaşmıştır (Cengiz, 2025; Turan, 2019). Buna karşın, betonarme kirişlerde burulmanın uygulanması durumunda davranış değişiminin incelenmesi gereklidir. Burulma davranışına yönelik çalışmaların sınırlı olmasının temel nedeni, bu tür deneylerin karmaşık ve maliyetli yükleme sistemleri gerektirmesidir.

Bu çalışma kapsamında, burulma deneylerinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla bir deney düzenegi geliştirilmiştir. Tasarlanan sistemde farklı kesitlere ve boyutlara sahip betonarme kirişlere burulma etkilerinin pratik şekilde uygulanması hedeflenmiştir. Ön deneysel çalışmalarda kirişlerin burulma altındaki davranışı incelenmiştir.

DENEYSSEL ÇALIŞMA

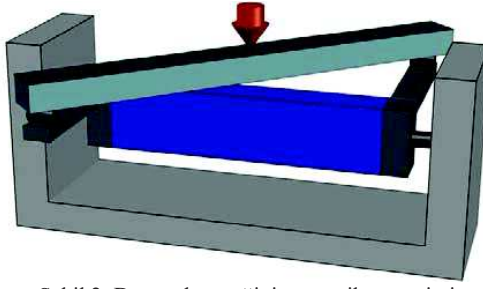
Deneysel çalışmalar kapsamında betonarme dikdörtgen kiriş ve T kesitli kiriş numuneleri yükleme prosedürlerine uygun şekilde test edilmiştir. Deney için hazırlanan numunelerin boyut ve donatı özellikleri yönetmeliklere uyularak üretilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Deney numuneleri

Deneylerde, yükleme işlemi hidrolik silindir aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve çapraz konumda yerleştirilen yük dağıtıcı çelik kirişe yük uygulanmıştır. Bu çelik kirişin her iki ucunda yer alan ve betonarme numunelere bağlantı sağlayan çelik kuvvet kolları aracılığıyla numunelere burulma momenti uygulanması sağlanmıştır. Deney esnasında uygulanan yük seviyelerinin izlenmesi amacıyla yük hücrelerinden faydalanılmış, kiriş elemanlarındaki yer değiştirmeleri belirlemek için ise potansiyometrik çevreler kullanılmıştır (Keskin, 2025).

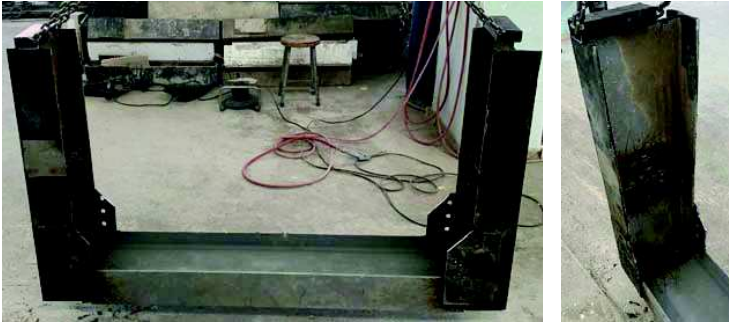
Elde edilen yük ve deplasman verileri, veri toplama sistemi aracılığıyla bilgisayar ortamına aktarılmış ve deney süresince tüm ölçümler kayıt altına alınmıştır. Bu süreçte, tüm ölçüm cihazlarının kalibrasyonlarının uygunluğu da test öncesinde kontrol edilmiştir. Deney düzeneginin kurulmasından önce literatür taraması yapılarak farklı deney düzenekleri incelenmiş, yapılan karşılaştırmalar neticesinde çalışmanın kapsamına en uygun olan sistem belirlenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

Deney Düzeneği

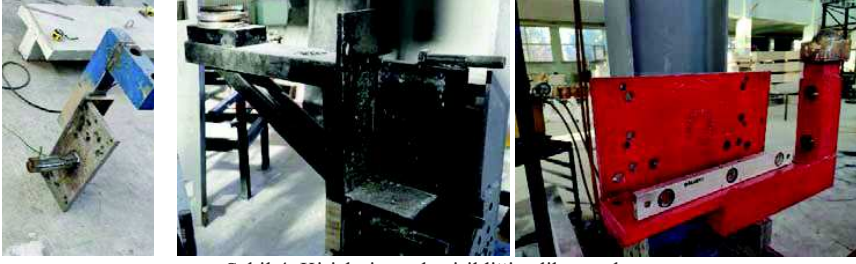
Deneyel çalışmada kullanılan deney düzeneği, Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı'nda yer alan kiriş yüklemesine entegre edilmiştir. Numunelerin her iki uçtan sabitlenerek burulma etkisine maruz bırakılabilmesi amacıyla "U" formunda bir çelik çerçeve oluşturulmuştur (Şekil 3).



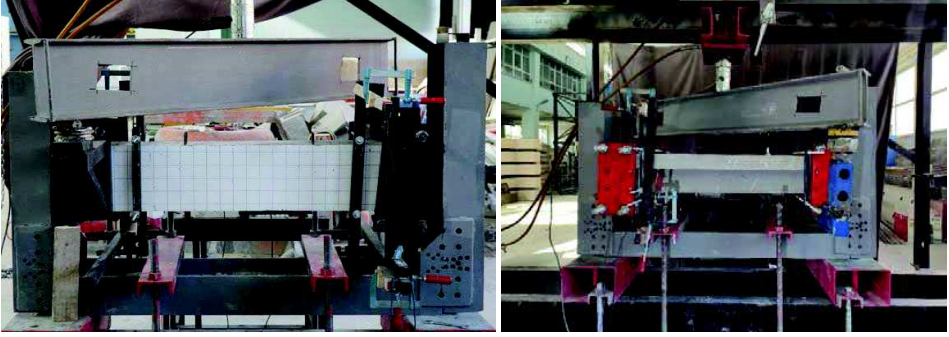
Şekil 3. Numunenin sabitleneceği çerçeve

Çerçevenin dikey elemanlarına, numunelerin dönme serbestliğini sağlamak amacıyla uygun çapta delikler açılmıştır. Bu düzenleme, numunelerin deney sırasında herhangi bir kısıtlama olmaksızın dönmesini mümkün kılmaktadır. Farklı kesitlere sahip deney numunelerinin her iki uçtan sabitlenebilmesi amacıyla özel çelik yuvalar tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu çelik yuvalar, numunelerin güvenli bir şekilde kavranmasını sağlarken, aynı zamanda deney esnasında numunelerde oluşabilecek hareketleri minimize etmektedir. Bu yuvalar ile farklı boyutlardaki ve şekillerdeki kesitlerde burulma etkisindeki deneylerin gerçekleştirilmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca, burulma momentinin etkin bir şekilde uygulanabilmesi için, yuva sistemlerine kuvvet kolları entegre edilmiştir. Bu kuvvet kolları, gelen yükün eşit şekilde numuneye iletilmesini sağlayarak burulma momentinin oluşumunu sağlamıştır. Çelik yuvanın çerçeveye oturduğu birleşim kısımları gres yağı ile yağlanmıştır. Bu sayede oluşturulan deney numunelerinin yük altında sorunsuz dönmesi sağlanmıştır (Şekil 4).

Kuvvet kolları üzerine çapraz şekilde yerleştirilmek üzere çelik bir yük dağıtıcı kiriş temin edilmiştir. Bu yük dağıtıcı kirişin tam orta noktasına, yük uygulamasının kontrollü bir şekilde gerçekleştirilebilmesi amacıyla çelik silindir ile bir yük hücresi yerleştirilmiştir. Bu sistem aracılığıyla uygulanan kuvvet, kuvvet kolları yardımıyla betonarme kiriş numunelerine aktarılmış ve burulma momenti oluşturulmuştur. Deney düzeneğine ait genel görünüm Şekil 5'te yer almaktadır.



Şekil 4. Kirişlerin yerleştirildiği çelik yuvalar

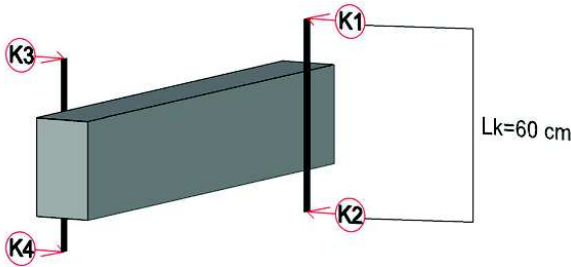


Şekil 5. Deney düzeneginin genel gösterimi

Ölçüm Tekniği

Deneylerde uygulanan yüklerin doğru şekilde ölçülmesi için 300 kN kapasiteli bir yük hücresi ve hidrolik silindir kullanılmıştır. Yük hücresinden ve potansiyometrik cetvellerden alınan veriler, kablolar aracılığıyla veri toplama sistemine iletilmiştir. Kirişlerin burulma davranışlarının detaylı şekilde analiz edilebilmesi için, yük etkisi altında meydana gelen dönme ve uzama miktarlarının hassas biçimde ölçülmesi gereklidir.

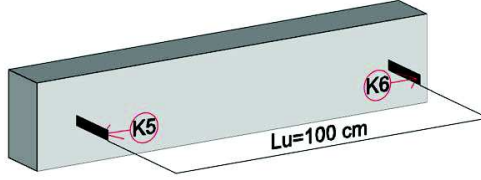
Tüm deneylerde yükleme 0,5 rad/s hızla gerçekleştirilmiştir. Deneylerde toplam altı adet potansiyometrik cetvel kullanılmıştır. 200 mm deplasman kapasitesine sahip olan potansiyometrik cetvellerden Şekil 6'da gösterilen dört tanesi numunelerin moment-dönme ilişkisi, rijitlik azalımı ve enerji sönümleme kapasitesi grafiklerinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Şekil 7'de gösterilen iki adet potansiyometrik cetvel ise deney süresi boyunca numunelerde meydana gelen birim uzamaların belirlenmesini sağlamıştır.



Şekil 6. Dönmeleri ölçmek için yerleştirilen LVDT'lerin şematik gösterimi

Şekil 6'da yer alan LDVT yerleşimlerine göre okunan değerler kullanılarak numunelerin dönme açısı Denklem 1 vasıtasıyla elde edilmektedir.

$$\theta_{rad} = \left| \frac{(K2-K1)+(K3-K4)}{60} \right| \quad (1)$$



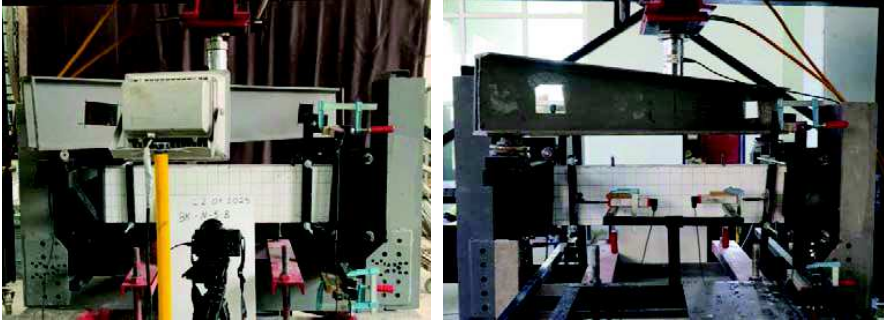
Şekil 7. Birim uzamaları tespit etmek için yerleştirilen LVDT'lerin şematik gösterimi

Şekil 7'de yer alan LDVT yerleşimlerine göre okunan değerler sayesinde numunelerin birim boy uzamaları elde edilmiştir (Denklem 2).

$$\Delta L = (K5 + K6) \quad (2)$$

Deneysel Çalışma

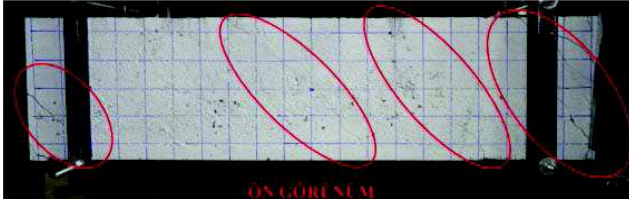
Çalışma kapsamında test edilen numunelerde deneye başlamadan önce numune deney düzeneğine yerleştirilmiş ve deney düzeneği deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Numunenin deney düzeneğinde görünüşü

Deney elemanlarında oluşan çatlaklar giriş boyunca iki yüzde birbirine dik olacak şekilde yaklaşık 45°'lik bir açı ile meydana gelmiştir. Deney elemanın ilk çatlak, akma noktası, maksimum yük taşıma ve geçme anındaki moment ve dönme değerleri elde edilmiştir (Şekil 9). Bunun yanı sıra elemanda meydana gelen birim uzamalar kontrol edilmiştir (Şekil 10).

Deneyler sırasında, yük hücresi ve potansiyometrik cetveller aracılığıyla elde edilen yük ve deplasman verileri kullanılarak, elemanın burulma davranışı incelenmiştir. Bu verilerden, burulma momenti ile dönme açısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler, burulma rijitliğini açıklayan grafikler ve toplam enerji değişimini ortaya koyan grafikler her deney için ayrı ayrı oluşturulmuştur.



Şekil 9. Deney numunesinde çatlaklar



Şekil 10. Deney numunesinde hasar görünüşü

SONUÇ

Farklı kesit boyutlarına ve şekillerine sahip elemanlarda burulma deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için deneysel yükleme düzenegi oluşturulmuştur. Kirişlere burulma etkilerinin verilmesi amacıyla hazırlanan deney düzeneginde;

- Deney numunelerinde oluşan çatlaklar, burulma etkisi altında yaklaşık iki yüzde birbirine dik olacak şekilde 45° açıyla gelişmiş ve numunelerin dört yüzeyine de yayılarak süreklilik göstermiştir.
- Burulma kapasitesine ulaşıldığında oluşan hâkim çatlak üzerinden ani göçme davranışı meydana gelmiştir
- Betonarme kirişlerde burulma testlerinin tasarlanan sistem ile yapılabilmesi mümkün olacaktır. Kirişlerin yerleştirildiği ayarlanabilir çelik yuvalar ile farklı boyutlardaki ve şekillerdeki kesitlerde burulma etkisindeki deneylerin gerçekleştirilmesi mümkün olmaktadır.

- Tasarlanan düzeneğe kullanılarak düşük maliyetler ile farklı kombinasyonlardaki yüklemeler gerçekleştirilebilecektir. Yapılacak çalışmalar sonucunda literatürde bulunma konusunda çalışmalar artırılabilir.
- Tasarlanan yüklemeye düzeneği ile sadece dikdörtgen kesit değil, farklı kesit geometrisine sahip (T, L) betonarme kirişler de test edilebilecektir.
- Burulma ve diğer yüklemelere maruz kalacak elemanlarda yapılabilecek güçlendirme yöntemlerinde yapılacak güçlendirmenin çeşidine göre deney düzeneğinin düzenlenmesi mümkün olacaktır.

Teşekkür

Çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için katkılarından dolayı Konya Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne (Proje No: 241004006) teşekkürlerimizi sunarız. Çalışma ilk yazarın Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

KAYNAKLAR

- Cengiz, S., Solak, A., Ünal, A., & Kamanlı, M. (2024). Numerical investigation of the behavior of reinforced concrete beams produced with self-compacting concrete. *Revista de la construcción*, 23(2), 271-295.
- Cengiz, S. (2025). The Effect of Axial Load Ratio and Torsional Moment on the Flexural Capacity of Reinforced Concrete Columns.
- Ersoy, U., 1975, Betonarmede burulma: davranış mukavemet şartnameler hesap için öneriler, Güven Kitabevi.
- Ersoy, G. ve Özcebe, G., 2016, Betonarme/Temel İlkeler, İstanbul, Evrim Yayınevi, p.
- Kamanlı, M., Döndüren, M. S., Çöğürçü, M. T., Kekeç, B., & Ünal, A. (2023). February 6, 2023, Kahramanmaraş Earthquakes Hatay. Eğitim Yayınevi.
- Keskin, O. K. (2025). *Experimental Investigation of the Effect of Reinforcement Types and Placements on Torsional Behavior in Reinforced Concrete Beams* (Master's thesis).
- Koutchoukali, N., Belarbi A., 1997, Effect of Concrete Strength on the behavior of RC Beams Subjected to Pure Torsion, High Strength Concrete First International Conference, July 1997, Hawaii, 38-51
- Ünal, A., Kamanlı, M., Solak, A., & Cengiz, S. (2023). Numerical investigation of the effect of support conditions on beam shear behaviour in full scale reinforced concrete beams. *Grağevinar*, 75(12.), 1193-1201.
- Solak, A., Cengiz, S., Ünal, A., & Kamanlı, M. (2024). Numerical investigation of torsional behaviour of reinforced concrete elements with different section shapes. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 12(4), 1022-1033.
- Turan, A. İ., 2019, Paslanmaya Maruz Kalmış Kirişlerin Burulma Dayanımı, Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Yang, I. H., Joh, C., Lee, J.W., and Kim, B-S., 2013, Torsional behavior of ultra-high performance concrete squared beams, *Engineering Structures*, 56, 372–383.

İÇTEN BAĞLI ADERANSSIZ ARDGERMELİ ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETON KİRİŞLERİN TEK YÖNLÜ KESME DAVRANIŞI

ONE-WAY SHEAR RESPONSE OF POST-TENSIONED ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE BEAMS WITH INTERNAL UNBONDED TENDONS

Tosif Ghazi¹ ve Furkan Çakmak²

ÖZET

Ardgerme uygulamasının ultra yüksek performanslı fiberli beton (UYPFB) ile kullanımı, kesit geometrisini ve donatı oranını optimize ederek, daha ekonomik ve verimli bir tasarım yapılmasına olanak tanır. Son yıllarda yayımlanan ultra yüksek performanslı fiberli beton kullanımına ilişkin şartname ve araştırma raporları, aderanssız ardgermeli sistemlerin kesme dayanım hesaplarını kapsamamaktadır. Literatürde de bu konu üzerine sınırlı çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada, içten bağlı aderanssız ardgermeli ultra yüksek performanslı fiberli beton kirişlerin tek yönlü kesme davranışı deneysel olarak incelenecektir. Toplamda 13 adet numune test edilecektir. Yapılacak deneyler, literatürde ilk olma özelliği taşıyacak olup, yeni geliştirilecek yöntemler için önemli bir veri kaynağı olacaktır. Numuneler, malzemelerin üzerine monte edilmiş gerinim pulları, yer değiştirme ölçerleri ve yük hücreleri aracılığıyla veri toplama sistemi ile izlenecektir. Ek olarak, dijital görüntü korelasyonu sistemi ile kesme açıklığı bölgesinde sürekli ölçümler toplanacaktır. Bu sayede, kirişlerin ilk yükleme anından göçme ve kırılma noktasına kadar olan davranışı, göçme modu, göçme moduna kadar gerçekleşen olayların sıralaması ve çatlak dağılımı incelenecektir. Yapılacak deneyler kapsamında, halat profili, etriye oranı, boyuna yöndeki yumuşak donatı oranı, beton matris fiber oranı, kesme açıklığı/faydalı derinlik oranı ve halat kılıf çapı parametrelerinin, içten bağlı aderanssız ardgermeli ultra yüksek performanslı fiberli beton kirişlerin tek yönlü kesme davranışına etkisi incelenecektir.

Anahtar Kelimeler: Aderanssız ardgerme, Ultra yüksek performanslı fiberli beton (UYPFB), Tek yönlü kesme, Parametrik analiz

ABSTRACT

The use of unbonded post-tensioning systems with ultra-high-performance fiber-reinforced concrete provides a more economic and efficient solution to emerging engineering challenges. Recent specifications and research reports on the use of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete do not cover prediction of shear strength of unbonded post-tensioned systems. Similarly, there are only limited studies on this topic in the literature. In this study, the one-way shear behavior of internally unbonded post-tensioned ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams will be experimentally investigated. A total of 13 specimens will be tested. The experiments to be conducted will provide the first set of experimental data on the subject matter, and will serve as an important data source for newly developed methods. The specimens will be monitored using a data acquisition system through strain gauges, displacement transducers, and load cells mounted on the materials. Additionally, continuous measurements will be collected in the shear span region using a digital image correlation system. This will allow the behavior of the beams from the initial loading to the point of failure and collapse, the mode of failure, the sequence of events leading to failure, and the crack distribution to be examined. Within the scope

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, tosif.ghazi@std.bogazici.edu.tr

² Dr. Öğretim Üyesi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, furkan.cakmak@bogazici.edu.tr

of the experiments, the effects of tendon profile, stirrup ratio, longitudinal nonprestressed reinforcement ratio, concrete matrix fiber content, shear span-to-effective depth ratio, and tendon sheath diameter on the one-way shear behavior of internally unbonded post-tensioned UHPFRC beams will be investigated.

Keywords: Unbonded post-tensioning, Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC), One-way shear, Parametric analysis

GİRİŞ

Ardgermeli beton, birçok uzun açıklıklı köprüde, otopark yapılarındaki uzun ve ince kirişlerde ve döşemelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ardgerme uygulaması, betonun servis yükleri altında çatlamadan kalarak uzun açıklıkların ve uzun konsolların tasarlanmasına imkân tanır. UYPFB'nin çok yüksek basınç dayanımı, çatlak sonrası yüksek çekme dayanımı ve düşük sünme özellikleri sayesinde, daha ince ve hafif kesitler daha az donatı kullanılarak tasarlanabilir ve böylece karbon emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlayabilir (Li vd., 2025). Ayrıca, UYPFB'nin bu özellikleri, ardgerme halatlarının daha büyük eksantrisitelerle daha yüksek düzeyde ardgerme uygulanmasına olanak tanır. Bu durum, yüksek açıklık-yükseklik oranlarına ulaşarak kesitin verimliliğini artırır ve köprüler ile binalar için ekonomik ve dayanıklı çözümler sunar (Luo vd., 2024).

Bu çalışma, içten bağlı aderanssız ardgermeli UYPFB kirişlerin tek yönlü kesme davranışını deneysel olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Ardgerme halatları, beton içerisine yerleştirilen kılıfların iç yüzeyinin esnek dolgu malzemesi ile yağlanması ile aderanssız olarak kullanılabilir veya harç enjeksiyonu yapılarak betona aderanslı hâle getirilebilir. Aderanslı ardgerme sistemleri yapısal bütünlüğü sağladığı için daha çok tercih edilse de, halatların sağlığının incelenmesindeki zorluklar, halatlarda gözlemlenen korozyon problemleri ve halatların değiştirilememesi durumundan dolayı aderanssız sistemlerin kullanılmasına ilgi artmaktadır (Frosch vd., 2025). Ayrıca, aderansız halatlar tasarım gereksinimlerine bağlı olarak yapı içine yerleştirilebilir (içten bağlı) veya dıştan monte edilebilir (dıştan bağlı). Eksantrite kaybı (Osimani, 2004), dowel etkisinin olmaması ve *deviyör* noktalarındaki yüksek gerilmeler, içten bağlı sistemleri dıştan bağlı sistemlere göre daha avantajlı kılmaktadır.

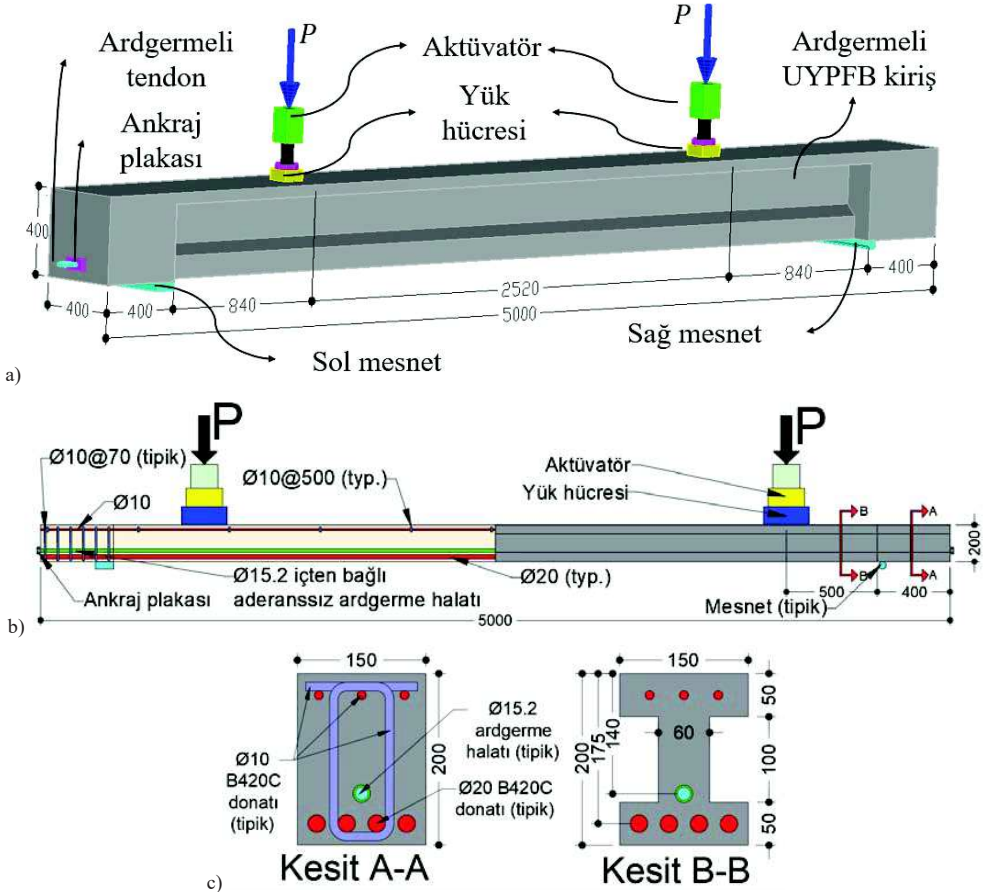
Yazarların bilgisi dâhilinde, içten bağlı aderanssız ardgermeli UYPFB kirişlerin tek yönlü kesme davranışı üzerine yapılmış teorik veya deneysel bir çalışma bulunmamaktadır. Ancak, içten bağlı aderanssız ardgermeli normal veya yüksek dayanımlı beton kirişlerin tek yönlü kesme davranışı üzerine çok sayıda araştırma mevcuttur (Zhang, 2022; Moore vd., 2017). UYPFB'nin, normal veya yüksek dayanımlı betonlarda bulunmayan çatlak sonrası yüksek çekme dayanımı nedeniyle, bu çalışmalarda sunulan gözlemler ve sonuçlar UYPFB için geçerli değildir.

Literatürde dıştan yerleştirilmiş ardgermeli UYPFB kirişlerin tek yönlü kesme davranışı üzerine de araştırmalar mevcuttur (Huang vd., 2025). Fakat yukarıda bahsedilen nedenlere ek olarak, sürtünme kayıplarının farklı olmasından ötürü dıştan bağlı sistemler içten bağlı sistemlerden farklı davranmaktadır. Benzer şekilde, içten bağlı aderanslı öngerilmeli veya ardgermeli UYPFB kirişlerin tek yönlü kesme davranışını inceleyen çalışmalar da vardır (Foster ve Bentz, 2024; Tadros vd., 2011). Ancak yükleme sırasında aderansız halatların uzaması halatın tüm uzunluğuna dağıldığından dolayı, aderansız halatlar genellikle aderanslı halatlara kıyasla daha düşük bir gerilme seviyesi oluşur. Bu durum aderanslı sistemleri aderanssız sistemlerden farklı kılmaktadır.

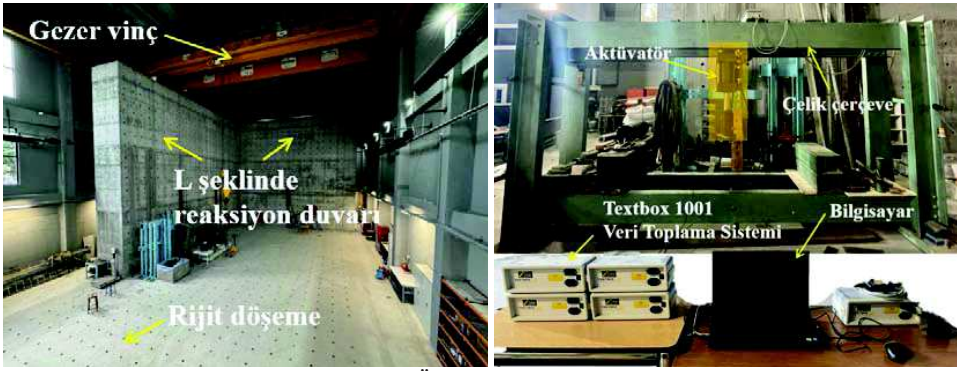
Bu nedenle, içten bağlı aderanssız ardgermeli UYPFB kirişlerin tek yönlü kesme davranışı üzerine bir araştırma gereklidir ve bu çalışmada bu konuya odaklanılmıştır.

DENEY PROGRAMI

Bu çalışmada, toplam 13 adet içten bağlı aderanssız ardermeli UYPFB kiriş, iki nokta yükleme konfigürasyonu altında Şekil 1'de gösterildiği gibi test edilecektir. Testler, Boğaziçi Üniversitesi'nin Yapı Laboratuvarı'nda gerçekleştirilecektir (Şekil 2). Kirişlerin ön tasarımı, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ve AASHTO rehberi (AASHTO, 2024a) dikkate alınarak, öngörülen göçme modu eğilmeden ziyade kesme göçmesi olacak şekilde yapılmıştır. Test edilecek kirişlerin ön tasarımına ilişkin bir özet ve incelenecek parametreler aşağıda sunulmuştur.



Şekil 1. a) Deneysel düzenek; b-c) ön tasarım kesit boyutları ve donatı detayları (boyutlar mm cinsindedir)



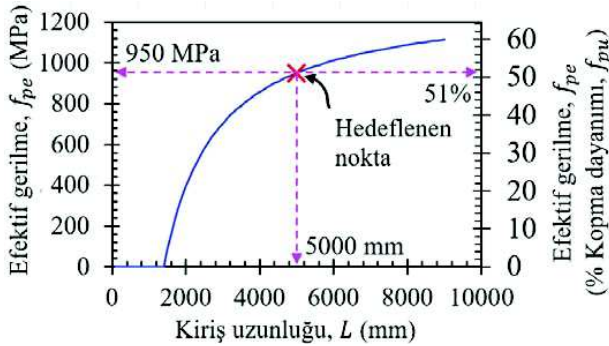
Şekil 2. Boğaziçi Üniversitesi Yapı Laboratuvarı

Numune Boyutlarının Belirlenmesi

Kiriş Uzunluğu

Test edilecek kirişlerin uzunluğunu belirlemede ankraj oturmasından kaynaklanan gerilme kayıpları etkin rol almıştır. Kirişlerin boyu kısalдықça, ankraj oturmasından kaynaklanan gerilme kayıplarının mertebesi artmaktadır. Buna ek olarak, betonun sünmesi, betonun rötresi ve halatın gevşemesi nedeniyle zamana bağlı gerilme kayıpları da olacaktır. Dolayısıyla, kirişlerin boyu bu gerilme kayıplarından sonra kesitte etkili olacak makul bir öngörme kuvveti sağlayacak şekilde seçilmelidir.

Zamana bağlı gerilme kayıplarını halatın kopma dayanımının %10'u olacak şekilde varsayarak ve 9.5 mm ankraj oturması öngörerek (AASHTO, 2024b), uzun dönemde ardgerme halatında oluşacak efektif gerilmenin (f_{pe}) kiriş uzunluğuna (L) göre değişimi Şekil 3'te gösterilmiştir. Buna göre, malzeme kullanımını optimize etmek amacıyla bu çalışmada halatlardaki efektif gerilmenin halat kopma dayanımının (f_{pu}) yaklaşık %50'si olması hedeflenmiş ve kiriş uzunluğu 5 m olarak seçilmiştir.

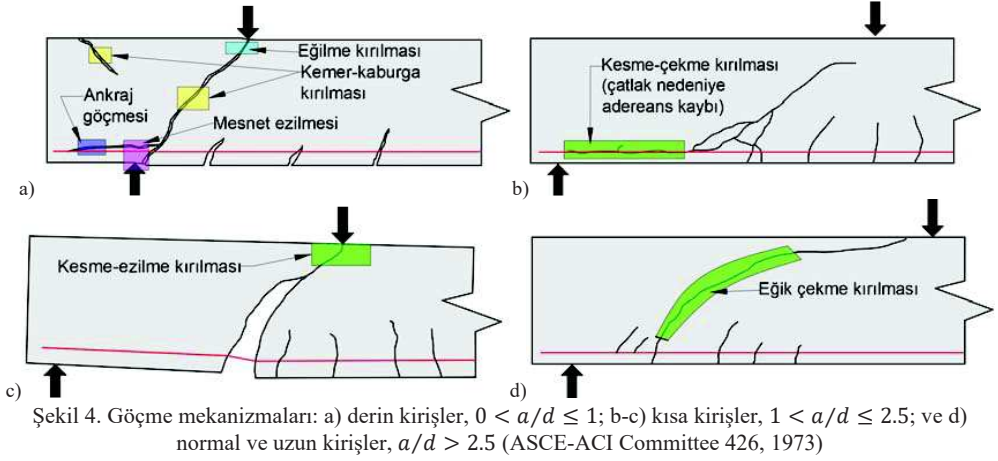


Şekil 3. Halattaki uzun dönem efektif gerilmenin kiriş uzunluğuna göre değişimi

Kesme Açıklığının Faydalı Yüksekliğe Oranı, a/d

Kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d), kirişlerin kesme dayanımı ve kırılma modunu etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Yü kün uygulandığı kesme açıklığı, a , test edilecek kirişlerde beklenen göçme modunun eğilme yerine kesme olması olacak şekilde belirlenmiştir. Kesme göçme modu, Şekil 4'te gösterildiği gibi farklı şekillerde gerçekleşebilir ve bu modların oluşumu büyük ölçüde a/d oranına bağlıdır. ASCE-ACI Committee 426'ya göre (ASCE-ACI Committee 426, 1973), a/d oranı 0-1, 1-2,5 ve 2,5'ten büyük olan kirişler sırasıyla derin kirişler, kısa kirişler ve narin kirişler olarak tanımlanmaktadır. Narin kirişlerde daha çok Bernoulli davranışı gözlemlenirken, derin ve kısa kirişler uygulanan yükü mesnet noktasına eğilmenin yanı sıra esas olarak kemerleşme mekanizması ile taşır. Dolayısıyla, derin ve kısa kirişlerin davranışı narin kirişlerden farklılık göstermektedir. Bu çalışmada, içten bağlı aderanssız ardgermeli UYPFB narin

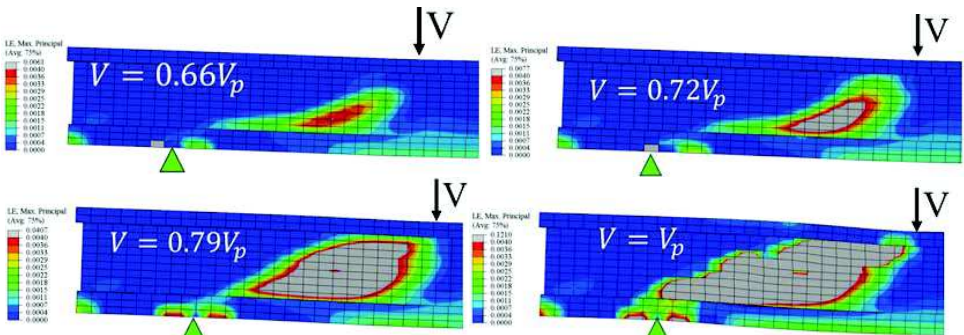
kirişlerin ($a/d \geq 2.5$) davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Güvenli tarafta kalmak ve a/d parametresinin kiriş davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla a/d referans değeri 3.0 olacak şekilde seçilmiştir.



Kesit Boyutlarının ve Donatı Detaylarının Seçimi

Göçme modunun kesme olması için, kritik noktada kesitin eğilme kapasitesinin kesme kapasitesinden yüksek olması gerekmektedir. Şekil 1'deki deney düzeneğine göre, kritik kesit yükleme noktasının hemen altındadır. Kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranını $a/d = 3.0$ olarak belirledikten sonra, göçme modunun kesme olabilmesi için kesitin eğilme kapasitesinin (M_n) kesme kapasitesinden (V_n) en az $3d$ kadar fazla olması gerekmektedir ($M_n > 3V_n d$).

Yazarların bilgisine göre, içten bağlı adereansız ardgermeli UYPFB kirişlerin tek doğrultulu kesme dayanımını tahmin edecek bir formülasyon mevcut değildir. AASHTO Rehberi'nde (AASHTO, 2024a) bulunan kesme kapasitesinin hesabı ile ilgili hükümler, halatların betona adereanslı olmadığı ve kesitin içerisinde bulunan ardgerme kırılımlarının etkisi nedeniyle, ardgerme halatı içeren kesitler için uygun değildir. Fakat kesitin ön tasarımı ve gerekli donatı miktarını belirlemek için AASHTO Rehberi'nde (AASHTO, 2024a) bulunan denklemlerin kullanımı ilk aşamada uygun bulunmuştur. Buna göre belirlenen kesit boyutları ve donatı gereksinimleri doğrultusunda kirişler, sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiş ve ön tasarım sonuçlandırılmıştır (Şekil 1). Şekil 5, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, farklı yük seviyelerinde kesme açıklık bölgesinde asal çekme deformasyonları göstermektedir. Şekil 5'te görüldüğü gibi, seçilen kiriş boyutları ve donatı oranı, Şekil 1'deki yüklemeye konfigürasyonu altında kirişlerin kesme kırılma modu ile göçtüğünü göstermektedir. Kirişlerin ankrāj bölgelerine ait uç kısımları, olası patlama ve çatlama durumlarını önlemek amacıyla kalınlaştırılmış ve 70 mm aralıklarla çatlama donatısı eklenmiştir.



Şekil 5. Farklı yük seviyelerinde kesme açıklık bölgesinde asal çekme deformasyonları

Test Matrisi

Bu çalışmada, Şekil 1’de gösterilen boyutlara sahip toplam 13 adet kiriş üretilecektir. Yapılan literatür taraması, şu parametrelerin kesme davranışına etkisinin önemli olduğunu göstermiştir: 1) halat profili; 2) etriye oranı; 3) boyuna yöndeki yumuşak donatı oranı; 4) UYPFB matrisi fiber oranı; 5) kesme açıklığı/faydalı derinlik oranı; ve 6) halat kılıf çapı. Bu çalışmada, bu parametrelerin içten bağlı aderanssız ardgermeli UYPFB kirişlerin tek yönlü kesme davranışına etkisi incelenecektir. Bu doğrultuda oluşturulan test matrisi Tablo 1’de gösterilmiştir.

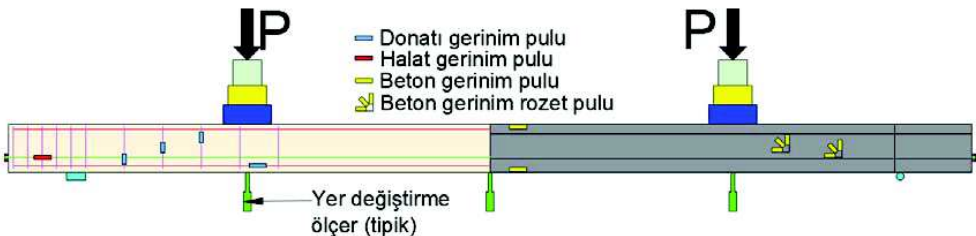
Tablo 1. Test matrisi

Kiriş	ϕ_d (mm)	Boyuna Donatı				Enine Donatı		Halat Profili	V_f (%)	a/d
		Yumuşak	ρ_s (%)	Ardgerme	ρ_{ps} (%)	ρ_v (%)	ρ_v (%)			
Ps v0 112.0 2% 3.0 d16	16	4- ϕ 20	11.97	1- ϕ 15.7	1.78	-	-	Düz	2	3.0
Pd v0 112.0 2% 3.0 d16	16	4- ϕ 20	11.97	1- ϕ 15.7	1.78	-	-	Eğrili	2	3.0
Ps v0.8 112.0 2% 3.0 d16	16	4- ϕ 20	11.97	1- ϕ 15.7	1.78	0.79	-	Düz	2	3.0
Ps v1.1 112.0 2% 3.0 d16	16	4- ϕ 20	11.97	1- ϕ 15.7	1.78	1.05	-	Düz	2	3.0
Ps v1.8 112.0 2% 3.0 d16	16	4- ϕ 20	11.97	1- ϕ 15.7	1.78	1.79	-	Düz	2	3.0
Ps v1.6 14.2 2% 3.0 d16	16	4- ϕ 12	4.21	1- ϕ 15.7	1.78	-	-	Düz	2	3.0
Ps v1.6 17.6 2% 3.0 d16	16	4- ϕ 16	7.57	1- ϕ 15.7	1.78	-	-	Düz	2	3.0
Ps v0 112.0 1% 3.0 d16	16	4- ϕ 20	11.97	1- ϕ 15.7	1.78	-	-	Düz	1	3.0
Ps v0 112.0 3% 3.0 d16	16	4- ϕ 20	11.97	1- ϕ 15.7	1.78	-	-	Düz	3	3.0
Ps v0 112.0 2% 2.0 d16	16	4- ϕ 20	11.97	1- ϕ 15.7	1.78	-	-	Düz	2	2.0
Ps v0 112.0 2% 4.0 d16	16	4- ϕ 20	11.97	1- ϕ 15.7	1.78	-	-	Düz	2	4.0
Ps v0 112.0 2% 3.0 d25	20	4- ϕ 20	11.97	1- ϕ 15.7	1.78	-	-	Düz	2	3.0
Ps v0 112.0 2% 3.0 d35	30	4- ϕ 20	11.97	1- ϕ 15.7	1.78	-	-	Düz	2	3.0

ϕ 20, ϕ 16, ϕ 12 sırasıyla 20, 16 ve 12 mm çapındaki donatıları; ϕ 15.7 ise 15,7 mm çapındaki halatı ifade eder.
 ρ_s : yumuşak donatı oranı; ρ_{ps} : ardgerme halat oranı; ρ_v : etriye donatı oranı; V_f : hacimsel fiber oranı; a/d : kesme açıklık/faydalı yükseklik oranı; ϕ_d : kılıf çapı.

Veri Toplama Sistemi

Numuneler, beton ve donatılar üzerine yerleştirilecek gerinim pulları ve yer değiştirme sensörleri ile TestBox 1001 veri toplama sistemi kullanılarak izlenecektir. Şekil 6, donatı, halat ve beton gerinim pullarının ve yer değiştirme sensörlerinin konumlarını göstermektedir. Donatılar üzerine yerleştirilen gerinim pulları, numune göçtüğü anda enine ve boyuna yöndeki donatıların akma dayanımına ulaşmış olup olmadığını belirlemek için kullanılacaktır. Benzer bir şekilde, halat üzerine yerleştirilen gerinim pulu, halattaki gerilmeyi deney süresince takip edebilmek için kullanılacaktır. Orta açıklıkta beton yüzeyinin alt ve üst noktalarına yerleştirilen gerinim pulları, sabit moment bölgesinde UYPFB’deki gerilmeyi belirlemek için kullanılacaktır. Son olarak, kesme açıklığında beton üzerindeki asal gerilmeleri tespit edebilmek için rozet tipi gerinim pulu kullanılacaktır.



Şekil 6. Gerinim pulu ve yer değiştirme sensör noktaları

Üç yer değiştirme sensörü, birinin açıklığın ortasında ve diğer ikisinin yüklerin hemen altında olacak şekilde yerleştirilecektir. Bu sensörlerden elde edilen veriler, numunelerin yük–yer değiştirme davranışını oluşturmak için kullanılacaktır. Ayrıca, numunelerin kesme açıklığı bölgesindeki bir yüzü, dijital görüntü korelasyonu sistemi ile ölçümler alınacak şekilde hazırlanacaktır. Bu sistem, kesme kritik bölgesinden sürekli ölçümler elde edilmesini sağlayacaktır.

SONUÇ

Test edilecek numuneler hazırlık aşamasındadır. Yapılacak deneyler sonucunda elde edilen gözlemler ve bulgular, içten bağlı aderanssız ardgermeli UYFPB kirişlerin tek yönlü kesme davranışı ve bu davranışa etki eden faktörler hakkında önemli bilgiler sağlayacaktır. Bu kapsamda, göçme modunun karakterizasyonu, göçmeye kadar olan olayların sıralaması, kesme açıklığındaki çatlak dağılımı ve halattaki gerilmenin değişimi gibi parametreler incelenecektir. Elde edilen veriler ışığında, içten bağlı aderanssız ardgermeli UYFPB kirişlerin tek yönlü kesme kapasitesini tahmin edebilmek için yeni bir metodun geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma 25A04SUP2 proje koduyla Boğaziçi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir. Sağladığı maddi katkılardan dolayı Boğaziçi Üniversitesine teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2024a) Guide Specifications for Structural Design with Ultra-High Performance Concrete, 1st Ed., Washington D.C
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2024b) Load and Resistance Factor Design LRFD Bridge Design Specifications, 10th Ed., Washington D.C
- Foster SJ and Bentz E (2024) "Design of UHPC prestressed girders for shear", *Structural Concrete*, 25(2), 780-795
- Frosch RJ, Williams CS, Bowlin SK, Rhodes MB, Derks DS, Okumus P and Villanueva JM (2025) Considerations for the Design and Construction of Bonded and Unbonded Post-Tensioned Concrete Bridge Elements, NCHRP Project 12-118
- Huang X, Yang Y and Huang S (2025) "The shear capacity analysis of externally prestressed UHPC beams based on the modified compression field theory", *Engineering Structures*, 345, 121553
- Joint ASCE-ACI Task Committee 426 on Shear and Diagonal Tension of the Committee on Masonry and Reinforced Concrete of the Structural Division (1973) "The shear strength of reinforced concrete members", *Journal of the Structural Division*, 99(6), 1091-1187
- Li S, Han G, Du B, Jiang Z and Sun L (2025) "Carbon emissions assessment of ultra-high performance concrete in construction industry Calculation method and case study", *Energy and Buildings*, 329, 115260
- Luo S, Zhao H, Qiao D, Tan C, Shao X, Ma J and Zhou C (2024) "Experimental and numerical investigation on deck system of a 102 m simply supported prestressed UHPC box-girder highway bridge", *Engineering Structures*, 316, 118601
- Moore AM, Williams CS, Massey JB, Bayrak O, Ghannoum WM and Jirsa JO (2017) "Shear behavior of post-tensioned girders", *ACI Structural Journal*, 114(6), 1615-1625
- Osimani F (2004) The Use of Unbonded Tendons for Prestressed Concrete Bridges, Master Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Tadros M, Lawler J, El-Khier MA, Gee D, Kurt A, Lucier G and Wagner E (2021) Implementation of ultra-high-performance concrete in long-span precast pretensioned elements for concrete buildings and bridges, Precast Prestressed Concrete Institute, Chicago IL USA
- Zhang Z (2022) Physical and numerical modeling of shear resistance of cast-in-place post-tensioned bridge girders, PhD Thesis, University of California Davis

KÖPRÜ ÜSTYAPI KİRİŞLERİNİN ENİNE DOĞRULTUDAKİ ÇEVİRİMSSEL DAVRANIŞI VE GÜÇLENDİRME ÖNERİLERİ

CYCLIC RESPONSE OF BRIDGE SUPERSTRUCTURE GIRDERS IN THE TRANSVERSE DIRECTION AND RETROFIT STRATEGIES

Serenay ATEŞ¹, Onur TUNABOYU² ve Özgür AVŞAR³

ÖZET

2023 Kahramanmaraş depremlerinde köprülerin büyük çoğunluğu kullanılabilir durumda kalsa da bazı köprülerde çeşitli seviyede yapısal hasarlar tespit edilmiştir. Enine doğrultuda üstyapı ve deprem takozları arasında meydana gelen çekişme nedeniyle köprü üstyapısını oluşturan öngerilmeli önüretimli kirişlerin gövde ve alt başlıklarında ileri seviyede hasarın oluştuğu köprüler tespit edilmiştir. Bu hasar türü, özellikle köprü imalatının kolay ve hızlı bir şekilde yapılması için arada boşluk bırakılmadan yan yana yerleştirilen önüretimli kirişlerin birbirine enleme (diyafram) kirişi ile bağlanmadığı durumlarda tespit edilmiştir. Dolayısıyla enleme kirişi bulunmayan mevcut köprülerin durumu ve hasar görülebilirliği hakkında bir belirsizlik söz konusudur. Köprülerin hasar görülebilirliğinin belirlenmesinde kullanılan mevcut kırılma eğrilerinin üstyapı kirişlerinde meydana gelebilecek hasarları da dikkate alarak geliştirilmesi gerekmektedir. Bu hasar türünün deneysel olarak araştırılması için gerçek kesit ölçülerine sahip önüretimli kirişlerin yarı-statik çevrimsel testlerinin yapılması planlanmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilecek veri sayısal modele yansıtılarak önüretimli köprü kirişlerindeki hasar durumu gerçekçi bir şekilde temsil edilebilecektir. Böylelikle köprü üstyapısında meydana gelebilecek olası hasar durumu da dikkate alınarak köprü kırılma eğrileri geliştirilecektir. Diğer taraftan, enleme kirişi bulunmayan köprülerde benzer hasarın gelecek depremlerde yaşanmaması için bir güçlendirme yöntemi geliştirilmesi planlanmıştır. Enleme kirişi bulunmayan köprülerde üstyapının bütünlüğünü sağlayacak bir güçlendirme yönteminin geliştirilmesi için önüretimli kirişleri birbirine bağlayacak çelik elemanlar tasarlanıp bağlantı detayları geliştirilecektir. Önüretimli kirişleri birbirine bağlayacak çelik elemanlar sayesinde enine doğrultuda deprem takozu ile önüretimli kirişlerin çekişmesi neticesinde oluşan çarpışma etkilerinin tüm üstyapı elemanlarına olabildiğince düzgün bir şekilde aktarılması amaçlanmaktadır. Çalışma kapsamında geliştirilecek üç farklı güçlendirme alternatifi deneysel olarak test edilip sayısal doğrulamaları yapılarak gerek güçlendirmedeki performansları gerekse de uygulanabilirliğindeki başarıları doğrultusunda en etkin güçlendirme yöntemi belirlenecektir.

Anahtar Kelimeler: Köprü enleme kirişi, Güçlendirme, Önüretimli kiriş, Çekişme hasarı

ABSTRACT

Although the majority of bridges remained operational during the 2023 Kahramanmaraş Earthquakes, various levels of structural damage were observed in some bridges. Notably, severe damage was identified in the webs and bottom flanges of prestressed precast girders, primarily due to pounding between the superstructure and shear keys in the transverse direction of bridges. This type of damage was particularly observed in bridges where precast girders were placed adjacent to each other without gaps to facilitate rapid construction, and where no transverse (diaphragm) beams were used to connect the girders. Accordingly, there exists significant uncertainty regarding the condition and vulnerability of existing bridges lacking transverse beams. Current fragility curves used to assess bridge vulnerability need to be

¹ Dr., Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, serenayates@ogr.eskisehir.edu.tr

² Dr.Öğr.Üyesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, onurtunaboynu@eskisehir.edu.tr

³ Prof.Dr., Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, ozguravsar@eskisehir.edu.tr

enhanced to account for potential damage in superstructure girders due to pounding. To experimentally investigate this damage mechanism, quasi-static cyclic tests on precast girders with full-scale cross-sectional dimensions are planned. Data obtained from these experimental studies will be incorporated into numerical models to enable a more realistic representation of damage in precast bridge systems. Consequently, improved fragility curves will be developed by considering potential damage in the bridge superstructure. On the other hand, to prevent similar damage in future earthquakes, a strengthening method is proposed for bridges without transverse beams. Within this scope, steel members will be designed to connect adjacent precast girders, and appropriate connection details will be developed to ensure superstructure integrity. These steel elements are intended to facilitate a more uniform distribution of impact forces across all superstructure components resulting from pounding between shear keys and precast girders. Three different strengthening alternatives will be experimentally evaluated and then numerically validated. The most effective strengthening method will be determined based on both structural performance and practical applicability.

Keywords: Bridge diaphragm beam, Strengthening, Precast Beam, Pounding damage

GİRİŞ

2023 Kahramanmaraş depremlerinde köprülerin büyük çoğunluğu kullanılabilir durumda kalarak hizmet vermeye devam etse de sınırlı sayıda köprüde çeşitli seviyelerde hasarlar tespit edilmiştir. Baş vd. (2024) Şubat 2023 depremleri sonrasında gerçekleştirdikleri saha çalışmasında 140 adet köprü incelenerek hasar dağılımları çıkarılmıştır. İncelenen köprülerde genel olarak; kenar ayakta çatlama ve ötelenme, deprem takozlarında kırılma, elastomer yastıklarda oynama ve yerinden çıkma, üstyapı önüretimli kirişlerinde düzlem dışı kesme kırılması, orta ayak tabanında mafsallaşma ve kalıcı ötelenmeler, yol kaplaması, korkuluk ve diğer ikincil köprü bileşenlerinde hasarlar tespit edilmiştir. Önceki depremlerden farklı olarak, bu hasar türlerinden özellikle üstyapıdaki önüretimli kirişlerinde görülen düzlem dışı kesme kırılması 2023 Kahramanmaraş depremlerinde çok daha yaygın bir şekilde görülmüştür (Avşar vd., 2023). Köprülerde beklenmeyen bu hasar türü enleme kirişi uygulanmamış bitişik nizam önüretimli kirişlerden teşkil edilmiş üstyapıya sahip köprülerde görülmüştür. 1990'lerden sonra Türkiye'deki köprü üstyapı imalatında sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri olan bitişik bir şekilde yerleştirilen önüretimli kirişler birbirlerine sadece üst başlık seviyesinden tabliyeye bağlanmaktadır (Avşar, 2009). Enleme kirişi uygulanmaksızın önüretimli kirişlerin yan yana yerleştirilerek gerçekleştirilen bitişik nizam uygulamasının tercih edilmesinin en önemli sebebi köprü imalatının kolay ve hızlı bir şekilde yapılmasıdır. Diğer taraftan, bitişik nizam kiriş uygulamalarında ne açıklık ortasında ne de mesnet bölgelerinde enine doğrultuda enleme (diyafram) kirişi imalatı yapılmadığından tabliye ve önüretimli kirişlerden oluşan köprü üstyapısında tam anlamıyla yapısal bütünlük sağlanamamaktadır (Şekil 1 Şekil a-b). Tabliyenin varlığı önüretimli kirişlerin üst seviyesinde kısmi bütünlük sağlasa da özellikle uzun açıklıklı köprülerde kiriş derinlikleri artmaya başladıkça, kirişler alt seviyelerinde bir bütün olarak hareket edememektedirler. 2020 yılında yürürlüğe giren Deprem Etkisi Altında Karayolu ve Demiryolu Köprü ve Viyadükleri Tasarımı için Esaslar kapsamında kompozit prekast kirişli yerinde dökme plaklı köprü tabliyelerin mesnetlerinde (orta ayak ve kenar ayaklarda) ve en az bir adet olmak üzere açıklıklarında enleme kiriş düzenlenmesi ile üstyapı kirişlerinin birbirine bağlanması zorunlu hale getirilmiştir. Şekil 1c'de kırmızı ve sarı çerçeve içerisinde gösterilen enleme kirişleri sırayla orta ayak ve açıklıkta üstyapı kirişlerini birbirine bağlamaktadır. Enleme kirişleri çoğunlukla imalat kolaylığı açısından bitişik nizam olmayan, aralarında belirli miktarda mesafe bulunan üstyapı kirişlerini bağlamak için kullanılmaktadır.

Enleme kirişi bulunmayan köprülerin önüretimli kirişlerinde gözlenen düzlem dışı kesme kırılması, köprü enine doğrultusunda köprü üstyapısı ile mesnetlerde bulunan deprem takozları arasında meydana gelen çekişmeden kaynaklanmaktadır. Enine doğrultuda oluşan çekişme nedeniyle deprem takozlarında meydana gelen hasar beklenen bir durumdur. Sigorta vazifesi gören deprem takozları hasar alarak altyapıya aktarılacak deprem etkileri ve neticede altyapı bileşenlerinde oluşacak yapısal hasar sınırlandırılabilir. Fakat üstyapıda meydana gelecek hasar nedeniyle önüretimli kirişlerde oluşabilecek öngerme kaybı ve düzlem dışı kesme hasarı önüretimli kirişlerin

yük taşıma kapasitesini olumsuz yönde etkileyerek köprünün yıkılmasına dahi sebep olabilir. Bu sebeple, depremlerde enine doğrultuda meydana gelebilecek çekiçleme nedeniyle kapasite tasarım ilkesi yaklaşımı gereği deprem takozlarında oluşabilecek hasar kabul edilirken, üstyapıda herhangi bir hasar oluşmaması beklenmektedir. Şubat 2023 depremleri sonrasında Şekil 2’de gösterildiği üzere köprü enine doğrultusunda üstyapı ve deprem takozu arasında meydana gelen çekiçleme, enleme kirişi bulunmayan üstyapı kirişlerinde ileri seviyede hasara neden olmuştur. Kirişlerin alt başlıkları diğer kirişlerle bağlanmadığından deprem takozu ile çarpışan kiriş alt başlığına etki eden darbe yükü kirişin düzlem dışı kesme kapasitesinin aşılmasına ve öngerme halatlarında hasar oluşmasına neden olarak köprünün taşıma gücü kapasitesini tehlikeye sokmaktadır.



(a) Bitişik (b) Bitişik (c) Ayrık
Şekil 1. Köprü üstyapısında bitişik ve ayrık nizam önüretimli kiriş uygulamaları (Avşar ve diğ., 2023)



Şekil 2. 2023 Kahramanmaraş depremlerinde önüretimli köprü kirişlerinde meydana gelen düzlem dışı kesme hasarı örnekleri (Avşar vd., 2023)

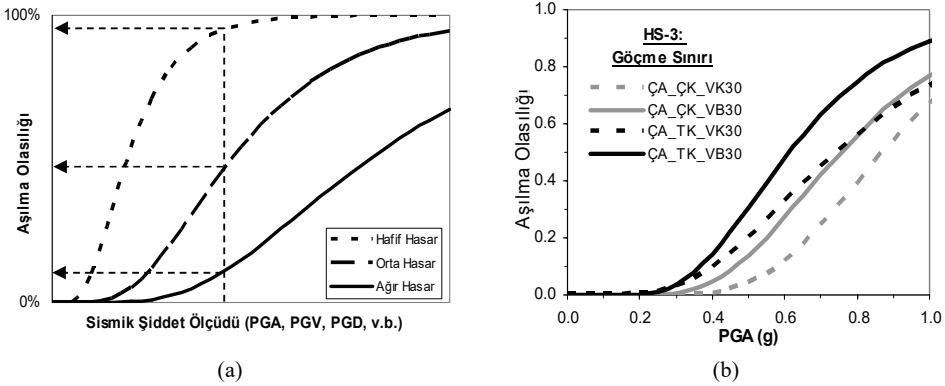
Ülkemizdeki mevcut köprülerin büyük bölümünün 2020 yılı öncesi olduğu düşünüldüğünde enleme kirişi uygulanmamış birçok köprü bulunmaktadır. Baş vd. (2024)’nin inceledikleri 140 adet köprüden 85 tanesinde enleme kirişinin olup olmadığı tespit edilebilmiştir. Enleme kiriş durumu tespit edilebilen 85 köprünün %62’sinde enleme kirişi bulunmağı belirtilmiştir. Dolayısıyla enleme kirişi bulunmayan köprülerin gelecekte yaşanacak depremlerde hasar görülebilirliklerinin gerçekçi bir şekilde belirlenmesi ve yetersiz olanların güçlendirilmeleri önem arz etmektedir. Bu amaç doğrultusunda planlanan deneysel çalışmada ilk olarak önüretimli kirişlerin düzlem dışı davranışlarının belirlenmesi için çevrimsel yüklem altında deneyleri yapılacaktır. Elde edilecek deneysel veri, köprülerin kırılma eğriliğinin elde edilmesinde oluşturulacak sayısal modellerde önüretimli kirişlerin düzlem dışı davranışının gerçekçi bir şekilde temsil edilebilmesi için kullanılacaktır. Daha sonra enleme kirişi olmayan köprülerin güçlendirilmesi amacıyla köprü üstyapısının bütünlüğünü sağlayabilmek için farklı konfigürasyonda oluşturulan çelik elemanlarla önüretimli kirişler birbirine bağlanacaktır. Farklı çelik bağlantı detayı ile birbirine bağlanan önüretimli kirişler aynı çevrimsel yüklem altında test edilerek uygulanan güçlendirmenin etkinliği ortaya konacaktır.

KÖPRÜ KIRILGANLIK EĞRİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Köprülerin bulunduğu konumun sismik tehlikesine bağlı olarak köprülerde meydana gelebilecek belirli hasar seviyesine ulaşılma ya da aşılma olasılığı kırılmalık eğrileri ile belirlenmektedir. Dolayısıyla kırılmalık eğrileri belirli sismik şiddet etkisi altında köprülerinin olası hasar görebilirliğini veren olasılıksal araçlardır. Buna göre Denklem (1)'de tanımlanan fonksiyon, köprü yapısının maruz kalacağı sismik etkinin (E) incelenen hasar sınırı (HS) için hesaplanan köprü kapasitesine (K_{HS}) ulaşılması ya da aşılması olasılığını verir. Denklem (1)'deki olasılıksal ifade köprünün maruz kalabileceği depremin şiddetini belirlemede kullanılan belirli bir sismik şiddet ölçütüne ($\dot{S}\ddot{O}$) göre tanımlanmıştır.

$$P(HS | \dot{S}\ddot{O}) = P[(E \geq K_{HS}) | \dot{S}\ddot{O}] \quad (1)$$

Avşar (2009) çalışmasında, Türkiye'deki karayolu köprüleri yapısal özelliklerine göre sınıflandırılarak belirlenen köprü tipleri için kırılmalık eğrileri farklı şiddet ölçütleri için elde edilmiştir. Şekil 3Şekil a'da herhangi bir köprü tipinin üç farklı hasar sınırı için temsili kırılmalık eğrileri gösterilmektedir. Şekil 3b'de ise dört farklı köprü tipinin Göçme Sınırı için en büyük yer ivmesine (PGA) göre elde edilmiş kırılmalık eğrileri gösterilmektedir. Benzer kırılmalık eğrileri deprem tehlikesi yüksek farklı ülkelerde bulunan köprüler için de elde edilmiştir (Yamazaki vd., 2000; Choi vd., 2004; Tavares ve diğ., 2012; Sung ve diğ., 2013).

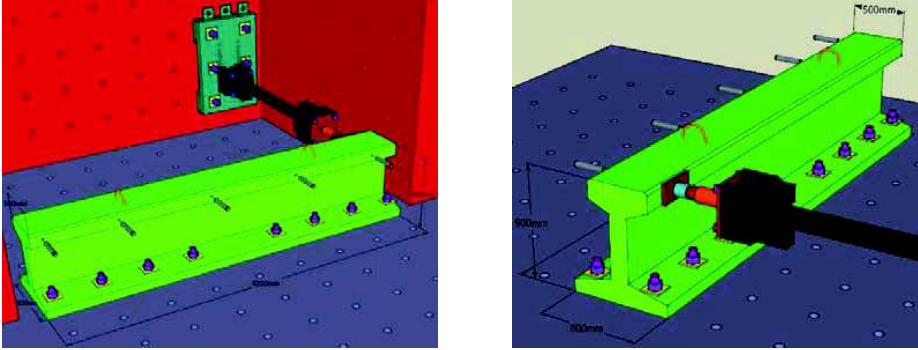


Şekil 3. Köprü kırılmalık eğrileri (Avşar vd., 2011)

Köprü kırılmalık eğrileri üzerine yapılan geçmiş çalışmalar ve bu konuda derleme makaleleri (Billah ve Alam, 2015) incelendiğinde köprülerde hasar oluşumlarının genellikle orta ayaklarda, elastomer yastıklarda, sabit mesnetlerde, kenar ayaklarda ve temel kazıklarında oluştuğu vurgulanmıştır. Geçmiş çalışmaların hepsinde (yazarların bildiği kadarıyla) üstyapının elastik kaldığı ve herhangi bir hasar almadığı kabulü yapılmıştır. Fakat deprem takozları ile üstyapı kirişleri arasında meydana gelen enine doğrultudaki çekiçleme etkileri farklı derz boşlukları nedeniyle sadece belirli üstyapı kirişlerine aktarılmaktadır. Dolayısıyla, çekiçleme etkilerinin aktarıldığı bu kirişlerin alt başlıklarında oluşan kuvvetlerin, enleme kirişi olmamasına bağlı olarak diğer üstyapı kirişlerine aktarılamaması nedeniyle bu kirişlerde ileri seviyede hasar oluşmaktadır. Görüleceği üzere gerek diğer ülkeler için gerekse de ülkemiz için geliştirilmiş kırılmalık eğrilerinde çalışmanın konusu olan enine doğrultuda meydana gelebilecek çekiçleme nedeniyle enleme kirişi bulunmayan köprülerde önerilmeli kirişlerde meydana gelebilecek hasarlar dikkate alınmamıştır. Bu durum enleme kirişi olmayan köprüler için mevcut kırılmalık eğrilerinin güvenilirliğini ortadan kaldırmaktadır. Mevcut kırılmalık eğrilerinin köprünün hasar görebilirliğini gerçekçi bir şekilde temsil edebilmesi için önerilmeli kirişlerin düzlem dışı davranışlarının sayısal modelde dikkate alınması gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda önerilmeli kirişlerin alt başlık seviyesinde düzlem dışı uygulanacak çevrimsel yüklemeye ile hasar türü ve kuvvet yer değiştirme ilişkisi elde edilecektir.

Önüretimli Kirişlerin Düzlem Dışı Deneyleri

Mevcut karayolu köprülerinde sık kullanılan önüretimli kiriş kesitlerinden biri olan 90cm derinliğindeki kesit kullanılarak laboratuvar imkanları çerçevesinde 4.2m'lik öngerilmeli kiriş alt başlık seviyesinde uygulanacak yatay çevrimsel yüklem altında test edilecektir. Mevcut laboratuvar imkanları kapsamında gerçekleştirilebilecek deneysel çalışmada yatay yüklemenin kiriş alt başlığına uygulanabilmesi için önüretimli kiriş ters bir şekilde güçlü zemine üst başlığından bağlanacaktır (Şekil 4). Dolayısıyla gerçek durumda üst başlığın köprü tabliyesi ile tutulması deneysel çalışmada temsil edilebilecektir. Deprem takozu ile alt başlık arasında gerçekleşen çekiçleme dinamik bir etkidir. Laboratuvar imkanları çerçevesinde dinamik bir test gerçekleştirilmesi mümkün değildir. Bunun yerine hidrolik güç veren ile başlık seviyesinden uygulanacak yarı-statik tek yönlü olarak artan yatay yüklem ile kirişin düzlem dışı çevrimsel davranışı, kesme hasarının kiriş boyunca gelişimi ve dağılımı belirlenecektir. Deprem takozu ile önüretimli kiriş arasında meydana gelen çekiçleme kuvveti tek yönlü bir kuvvettir, deprem esnasında aynı kirişin deprem takozundan uzaklaşması durumunda kuvvet sıfırlanacaktır. Dolayısıyla laboratuvar ortamında uygulanacak yüklem sadece itme yönünde tek doğrultulu çevrimsel bir şekilde gerçekleştirilecektir. Yer değiştirme tabanlı bir yüklem protokolü ile kiriş alt başlık seviyesinde itilecektir. Yatay yüklemenin uygulanacağı kirişin alt başlığında ve kiriş boyunca belirli aralıklarda (her 1m'de) yüklem hizasında yer değiştirmeler deplasman ölçerler yardımıyla elde edilecektir. Yük ölçerden elde edilecek yük verisi ile kirişin uygulanan çevrimsel yüklem altında kuvvet-yer değiştirme ilişkisi elde edildikten sonra köprünün oluşturulacak sayısal modeline tanımlanarak kirişte oluşabilecek hasar sayısal analiz sonuçlarına yansıtılabilecektir.

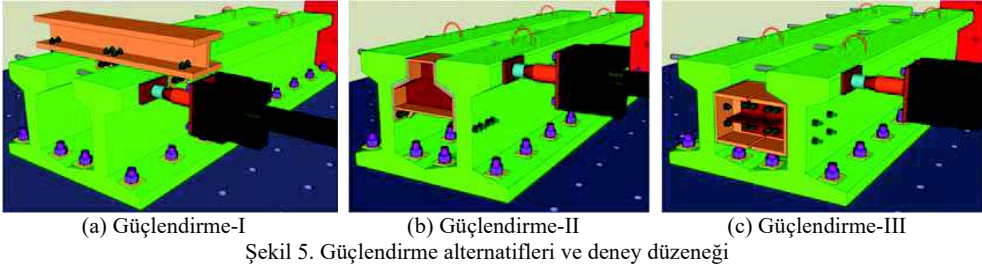


Şekil 4. Önüretimli kirişlerin alt başlığından yatay yüklemenin uygulanması

Mevcut Önüretimli Kirişlerin Güçlendirilmesi

Planlanan deneysel çalışmanın ikinci aşamasında enleme kirişi bulunmayan köprü üstyapısını temsil etmek üzere iki adet önüretimli kiriş bitişik nizam olarak yerleştirilecektir. Önüretimli kirişler alt başlık seviyesinden birbirine çelik profillerle bağlanarak kirişlerin uygulanan yüklem altında bir bütün olarak çalışması amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda üç farklı çelik bağlantı alternatifi planlanmıştır. Bu detayların planlanmasında mevcut köprüde bulunan deprem takozunun konumu dikkate alınarak çelik profillerinin bağlantısının yapılabileceği bölgelere yerleştirilecektir. Dolayısıyla yüklemenin uygulanacağı nokta (deprem takozu ile çekiçlemenin meydana geleceği konum) ile güçlendirme elemanı arasında kaçıklık olması söz konusudur. Bitişik nizam kirişlerin alt başlıkları arasında yeterli boşluk bulunmaması durumunda özellikle 2. ve 3. Güçlendirme Alternatiflerinde (Şekil 5b-c) çelik elemanlar modüler olarak imal edilip yerinde bağlanacaktır. Bu alternatiflerden en pratik uygulamanın 1. Güçlendirme Alternatifi (Şekil 5a) olduğu açıktır. Fakat yüklem ile çelik profil arasında kaçıklık olması, bağlantının sadece öngerme halatlarının bulunduğu alt başlık bölgesinde yapılabilecek olması bu yöntemin zayıf yanlarıdır. Bir önceki adımda uygulanan yüklem protokolü tekrarlanarak benzer ölçümler alınacaktır. Deneyler sonrasında üç farklı güçlendirme alternatifinin gerek yapısal performansı gerekse de güçlendirme alternatiflerinin

uygulama aşamasında karşılaşılan zorluklar dikkate alınarak en etkin güçlendirme yöntemine karar verilmesi planlanmaktadır.



SONUÇ

Planlanan deneysel çalışma ile enleme kirişi olmayan köprülerin önüretimli kirişlerinde meydana gelebilecek hasarı engelleyebilecek bir güçlendirme sisteminin geliştirilerek deneysel olarak performansının incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda planlanan alternatif güçlendirme yöntemlerinin detayları geliştirilip tasarlandıktan sonra performansları deneysel olarak laboratuvar ortamında gerçekleştirilecek testlerle belirlenecektir. Bu aşamada güçlendirme yönteminde uygulanan detayın önüretimli kirişler arasında yük aktarımındaki başarısı, önüretimli kirişlerdeki hasar dağılımı ve çelik bağlantı detaylarının uygulanabilirliği hususları karşılaştırılmalı olarak ele alınacaktır. Aynı zamanda geliştirilecek güçlendirme yönteminin uygulanabilir, ekonomik ve pratik bir yöntem olması hedeflenmektedir. Çalışmanın diğer amaçlarından biri de köprülerin üstyapı kirişlerinde meydana gelebilecek hasar durumunu da dikkate alan köprü kırılma eğrilerinin geliştirilmesidir. Mevcut kırılma eğrileri, önüretimli kirişlerde meydana gelebilecek hasar durumunu hesaba katmadığından köprülerin risk değerlendirme sonuçlarının gerçekçi bir şekilde belirlenmesi mümkün değildir. Gerçekleştirilecek deneysel çalışma ile önüretimli kirişlerin düzlem dışı histeretik davranışı sayısal modele yansıtılarak geliştirilecek kırılma eğrilerinin köprülerde meydana gelebilecek gerçek hasar durumunu yansıtacaktır. Bu kapsamda geliştirilecek kırılma eğrileri köprülerin önceliklendirme ve risk değerlendirme çalışmalarında kullanılarak daha güvenilir sonuçlar elde edilmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- Baş S, Hunt J, Gencturk B, Jampole E, Sonmezer YB, Chancellor B, Bassal P, Celiker M, Apaydin N, Sezen H (2024) "Seismic performance and damage assessment of bridges during the 2023 Kahramanmaraş, Türkiye earthquakes (M w= 7.8, M w= 7.6)", *Earthquake Spectra*, 40(4):2339-2363.
- Avşar Ö, Bozer A, Tunaboyu O, Sülev E, Demirtaş Y (2023) Mw 7.7 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremlerinde 2000 Sonrası Yapılmış Betonarme Binalar ile Bölgedeki Karayolu Köprülerinin Sismik Performansı: Hatay Saha Gözlemleri Teknik Raporu, <http://dx.doi.org/10.13140/rg.2.2.22933.40166>.
- Avşar Ö (2009) Fragility Based Seismic Vulnerability Assessment of Ordinary Highway Bridges In Turkey, Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, Ankara
- Deprem Etkisi Altında Karayolu ve Demiryolu Köprü ve Viyadükleri Tasarımı için Esaslar, T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 06 Ekim 2020.
- Yamazaki F, Motomura H, Hamada T (2000) "Damage assessment of expressway networks in Japan based on seismic monitoring", *Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland.
- Choi E, DesRoches R, Nielson B (2004) "Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones", *Engineering Structures*, 26(2):187-199.
- Tavares DH, Padgett JE, Paultre P (2012) "Fragility curves of typical as-built highway bridges in eastern Canada", *Engineering Structures*, 40:107-118.
- Sung YC, Hsu CC, Hung HH, Chang YJ (2013) "Seismic risk assessment system of existing bridges in Taiwan", *Structure and Infrastructure Engineering*, 9:903-917.
- Billah AHMM, Alam MS (2015) "Seismic fragility assessment of highway bridges: a state-of-the-art review", *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(6):804-832.

BETONARME KİRİŞLERİN GÜÇLENDİRİLMESİNDE YENİ BİR YÖNTEM OLARAK 3B YAZDIRILMIŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN UYGULANMASI

APPLICATION OF 3D PRINTED CEMENT-BASED COMPOSITES AS A NOVEL METHOD IN STRENGTHENING REINFORCED CONCRETE BEAMS

Mustafa Furkan GÜLER^{1,2}, Hasan Murat TANARSLAN³, Çağlar YALÇINKAYA⁴, Ali MARDANİ⁵,

ÖZET

Son yıllarda Türkiye’de meydana gelen yıkıcı depremler, mevcut betonarme yapı stokunun deprem etkileri altında önemli yapısal yetersizlikler sergilediğini ortaya koymuştur. Bu durum, çeşitli yetersizliklere sahip betonarme elemanlar için yenilikçi, uygulanabilir ve ekonomik güçlendirme yöntemlerine olan ihtiyacı artırmıştır.

Üç boyutlu beton yazdırma (3BBY) teknolojisi; kalıpsız üretim, geometriye uyulanabilirlik ve işçilik gereksiniminin azaltılması gibi avantajları sayesinde yapısal güçlendirme alanında önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu çalışmada yeni bir yöntem olarak çeşitli yetersizliklere sahip betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılmak üzere 3BBY ile üretilen çimento esaslı kompozit elemanların geliştirilmesi ve yapısal katkılarının değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, yazdırılabilir karışım tasarımları geliştirilecek; mikro donatılandırma, yazdırma deseni ve katman kalınlığı gibi parametrelerin malzeme davranışı üzerindeki etkileri incelenecektir. Ayrıca, geliştirilen kompozitlerin temel mühendislik özellikleri ve betonarme kirişlerin güçlendirilmesindeki etkinliği deneysel olarak değerlendirilecektir. Anahtar kelimeler: üç boyutlu beton yazdırma, betonarme, güçlendirme

ABSTRACT

The destructive earthquakes that have occurred in Türkiye in recent years have revealed that the existing reinforced concrete building stock exhibits significant structural deficiencies under seismic actions. This situation has increased the need for innovative, practical, and economical strengthening methods for reinforced concrete members with various deficiencies. Three-dimensional concrete printing (3DCP) offers significant potential in the field of structural strengthening due to its advantages, such as formwork-free production, geometric adaptability, and reduced labor requirements. This study, as a novel method, aims to develop cement-based composite elements produced by 3DCP for use in the strengthening of reinforced concrete beams with various deficiencies and to evaluate their structural contribution. Within this scope, printable mix designs will be developed, and the effects of parameters such as micro-reinforcement, printing pattern, and layer thickness on the material behavior will be investigated. In addition, the fundamental engineering properties of the developed composites and their effectiveness in strengthening reinforced concrete beams will be evaluated experimentally.

Keywords: three-dimensional concrete printing, reinforced concrete, strengthening

¹ Doktora Öğrencisi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, m.furkan.guler@adu.edu.tr

² Araş. Gör., Aydın Adnan Menderes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Aydın

³ Prof. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, murat.tanarслан@deu.edu.tr

⁴ Doç. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, caglar.yalcinkaya@deu.edu.tr

⁵ Prof. Dr., Bursa Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bursa, alimardani@uludag.edu.tr

GİRİŞ

Türkiye, aktif fay hatları nedeniyle yüksek deprem tehlikesi altında bulunan ülkeler arasında yer almaktadır. Ülke genelinde yer alan çok sayıda aktif tektonik yapı, yerleşim alanlarının önemli bir bölümünü doğrudan deprem riski altında bırakmaktadır. Son yıllarda meydana gelen 2020 Elâzığ-Sivrice, 2020 Sisam (İzmir) ve 2023 Kahramanmaraş depremleri, mevcut yapı stokunun deprem güvenliği açısından taşıdığı riskleri açık biçimde ortaya koymuştur. Bu depremler sonucunda çok sayıda yapı ağır hasar almış veya yıkılmış, ciddi can ve mal kayıpları meydana gelmiştir.

Depremler sonrasında gerçekleştirilen saha incelemeleri ve hasar tespit çalışmaları, performansı yetersiz yapıların önemli bir kısmında mevcut yönetmelik gereklerini karşılamayan çeşitli yapısal yetersizliklerin bulunduğunu göstermiştir. Yetersiz donatı düzeni, düşük malzeme dayanımı, detaylandırma eksiklikleri, düzensiz taşıyıcı sistem davranışı ve yetersiz kesit kapasitesi gibi sorunlar, yapıların deprem etkileri altında beklenen performansı sergileyememesine neden olmuştur. Ayrıca, çok sayıda yapının yetersiz mühendislik hizmetiyle inşa edilmiş olması, mevcut yapı stokunun deprem güvenliği açısından önemli ölçüde risk taşımaya yol açmıştır. Bu durum, mevcut yapıların yeniden değerlendirilmesini ve etkili güçlendirme yöntemlerinin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır.

Son yıllarda, üç boyutlu (3B) yazdırma teknolojilerinin inşaat mühendisliği alanındaki uygulamalarına yönelik araştırmalar önemli ölçüde artış göstermiştir. Özellikle farklı ölçeklerde yapı bileşenlerinin ve yapısal elemanların dijital üretim teknikleri kullanılarak imal edilmesi hem tasarım esnekliği hem de üretim verimliliği açısından dikkat çekici bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu kapsamda, üç boyutlu beton yazdırma (3BBY) teknolojisi, geleneksel beton üretim yöntemlerinden farklı olarak, herhangi bir kalıp sistemine ihtiyaç duymadan, önceden tanımlanmış geometriye sahip elemanların katmanlı üretim mantığıyla doğrudan imal edilmesine olanak sağlamaktadır (Ahmed, 2023). Böylece karmaşık geometrilere sahip elemanların üretilebilmesi, üretim sürecinde zaman kazanımı sağlanması, işçilik gereksiniminin azaltılması ve malzeme kullanımının optimize edilerek inşaat maliyetlerinin düşürülmesi gibi önemli avantajlar ortaya çıkmaktadır (Shakor vd., 2017; Lloret vd., 2015).

3BBY teknolojisi, yalnızca yeni yapı üretiminde değil, mevcut yapıların onarım ve güçlendirilmesinde de önemli bir potansiyele sahiptir. Bu teknoloji ile üretilen güçlendirme elemanlarının, ilave kalıp ve yoğun işçilik gerektirmeden farklı geometrilerdeki taşıyıcı elemanlara uyarlanabilir biçimde olması, geleneksel güçlendirme yöntemlerine kıyasla önemli bir avantaj sağlamaktadır. Mantolama, çelik plaka ve lif takviyeli polimer esaslı yöntemler uygulama ve detaylandırma açısından çeşitli sınırlılıklar içerebilirken, 3BBY tabanlı çözümler daha kontrollü, tekrarlanabilir ve ihtiyaca özel uygulamalara olanak tanımaktadır.

Mevcut literatür incelendiğinde, 3BBY teknolojisi ile ilgili; beton bileşimi, beton karışımlarının iyileştirilmesi, yapısal elemanlar bazında köprü kirişlerinin üretimi ve belirli boyutlarda binaların inşası gibi konularda araştırmalar yapılmaktadır (Lowke vd., 2018; Mechtcherine vd., 2019). Ancak betonarme taşıyıcı elemanların yapısal performansını artırmaya yönelik olarak 3BBY ile üretilmiş çimento esaslı güçlendirme bileşenlerinin tasarımı, üretimi, uygulanabilirliği ve mekanik katkısının değerlendirilmesine ilişkin araştırmaların bulunmadığı görülmektedir. Bu nedenle, 3BBY teknolojisiyle üretilen yenilikçi güçlendirme elemanlarının inşaat sektörüne kazandırılması; hem mevcut yapı stokunun iyileştirilmesine yönelik alternatif çözümler geliştirilmesi hem de ekonomik, sürdürülebilir ve uygulanabilir yeni nesil güçlendirme yaklaşımlarının ortaya konulması açısından büyük önem taşımaktadır. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmekte olan bu çalışma ile literatüre yeni bir güçlendirme yöntemi kazandırılması hedeflenmektedir.

DENEYSEL ÇALIŞMA

3B Yazdırılabilir Karışımların Geliştirilmesi

3BBY üretim sürecinde kullanılacak karışımın, yazdırma aşamasında nozuldan sorunsuz biçimde pompalanıp ekstrüde edilebilecek yeterli akış kabiliyetine sahip olması; ekstrüzyon sonrasında ise katmanların kendi ağırlıkları altında bozulmadan geometrik bütünlüğünü koruyabilecek ve üst üste yerleştirilen katmanların stabil biçimde taşınmasını sağlayabilecek taze malzeme davranışı göstermesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra, üretim kalitesinin sürdürülebilir olması açısından nozul çıkışındaki malzemenin süreksizlik, ayrışma veya çatlama oluşturmada homojen, sürekli ve bütüncül bir şekilde ilerlemesi büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, gerçekleştirilecek deneysel çalışmanın ilk aşamasında, ekstrüzyon ve yazdırılabilirlik gereksinimlerini karşılayacak uygun karışım tasarımının oluşturulmasına odaklanılacaktır. Bu aşamada proje ekibinde bulunan Doç. Dr. Çağlar YALÇINKAYA'nın ve Prof. Dr. Ali MARDANI'nin önceki projelerinden elde ettikleri tecrübelerden de faydalanılacaktır. Elde edilen yazdırılabilir karışımların ilk etapta 7, 28 ve 56 günlük eğilme ($40 \times 40 \times 16 \text{ mm}^3$ prizma numune) ve basınç ($40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ parçalar) dayanımları bulunacaktır. Yapılacak testlerde kalıplanmış referans numunelerde en az 50 MPa basınç dayanımına ulaşılması hedeflenmektedir.

Belirlenen referans karışımlar esas alınarak, bu karışımların mekanik performansını geliştirmeye yönelik olarak lif takviyesi uygulamaları gerçekleştirilecektir. Çalışma kapsamında seçilen uygun karışım gruplarında, farklı donatılardırma yaklaşımlarının malzemenin dayanım ve yapısal davranışı üzerindeki etkileri araştırılacaktır. Bu süreçte, Doç. Dr. Çağlar Yalçinkaya'nın yürütücülüğünde tamamlanan ve 121M284 kodlu "3B Yazdırılabilir Puzolanlı Harçların Geliştirilmesi ve Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması" başlıklı TÜBİTAK projesi kapsamında edinilen bilgi birikimi ve deneysel altyapıdan yararlanılacaktır. 3B yazdırılmış kompozitlerde donatılardırma yöntemleri ile mekanik özelliklerin iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Bununla birlikte, donatılardırılmış ve donatılardırılmamış numunelerde farklı yazdırma desenlerinin ve kalınlığının malzemenin mekanik performansı ve bütüncül davranışı üzerindeki etkileri de incelenecektir. Bu kapsamda, yazdırma deseni, donatılardırma yaklaşımı ve katman kalınlığı gibi üretim parametrelerinin kompozit davranış üzerindeki katkısının ortaya konması amaçlanmaktadır.

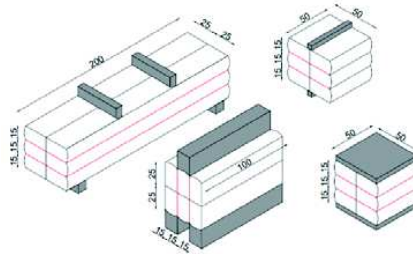
Geliştirilen lifli ve liffsiz karışımlar DEÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda TÜBİTAK 121M284 numaralı proje ile kurulmuş olan yazıcı ile yazdırılacaktır (Şekil 1). Hazırlanan taze harç, harç pompası ile basılarak nozul çıkışına kadar itilmektedir. 3B beton yazıcısı, X, Y, Z ve C eksenlerinde olmak üzere 4 eksen hareket kabiliyetine sahiptir. Yazıcının çalışma alanı planda $1 \times 1 \text{ m}^2$ 'dir. Yaklaşık 1 m yüksekliğe kadar yazdırma yapılabilmektedir. Filamentler, 25 mm çaplı dairesel nozulla yazdırılacak ve yekpare ve şekil stabilitesine sahip filamentlerin oluşup oluşmadığı test edilecektir.



Şekil 1. DEÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda yer alan 3B harç yazıcısına ait görseller

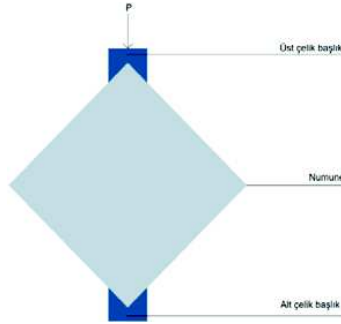
Üretilen numunelerde eğilme ve basınç deneyleri gerçekleştirilecektir. Ayrıca yine numunelerde katmanlar arası bağın kalitesini test eden kesme bağ dayanımı deneyi yapılacaktır. Bu deneyler Yalçinkaya (2022)'de verilen yöntemlerle ve yüklemeye yönleriyle gerçekleştirilecektir (Şekil 2). Anizotropi sebebiyle yüklemeye yönlerine bağlı olarak dayanımlar değişebilmektedir. Ancak

çalışmada yapısal performansı daha çok temsil ettiği düşünülen, Yalçınkaya (2022)'de sunulmuş olan doğrultularda eğilme, basınç, kesme ve yarma yüklemeleri gerçekleştirilecektir.



Şekil 2. Birinci aşama çalışmalarında yapılacak eğilme, basınç, kesme ve yarma deneylerinin doğrultuları

Yazdırılan filamentler arasındaki bağ kalitesinin de etkisini içerecek şekilde, kompozit sistemin bütüncül davranışının değerlendirilmesine yönelik diyagonal basınç testleri gerçekleştirilecektir (Şekil 3.). Bu testler aracılığıyla, filamentler arası aderansın kompozit malzemenin genel mekanik performansı üzerindeki katkısının ortaya konması hedeflenmektedir.



Şekil 3. Diyagonal basınç testi deney düzeneği

Gerçek boyutlu laminelerin yazdırılması

DEÜ laboratuvarındaki yazıcı ile yaklaşık 1 m uzunluğunda lamineler yazdırılabilirken, projede yekpare eğilme güçlendirmesi için kirişlere tatbik edilecek laminelerin boyutu 2,4 m'yi bulmaktadır. Proje kapsamında, karışım geliştirilmesi, kompozitlerin malzeme ve diyagonal testlerinin yapılması işlemleri DEÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarı'ndaki yazıcı ile, tam boyutlu kesme ve eğilme numunelerinin üretimi ise Bursa Uludağ Üniversitesi (BUÜ) Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda Prof. Dr. Ali Mardani yönetimindeki daha büyük yazdırma alanına sahip yazıcı ile yapılacaktır (Şekil 4.). DEÜ bünyesinde kesme numunelerinin üretimi mümkünken tüm gerçek boyutlu kesme ve eğilme laminelerinin tek bir yazıcıdan çıkabilmesi adına BUÜ bünyesindeki yazıcı kullanılacaktır. Bu sebeple BUÜ bünyesinde yer alan yazıcı kullanılarak gerçek ölçülere sahip kesme ve eğilme laminelerinin yazdırılması planlanmaktadır. Bu sayede geliştirilen karışım ve kompozitlerin iki farklı yazıcıda yazdırılabilirliği de sınanmış olacaktır.

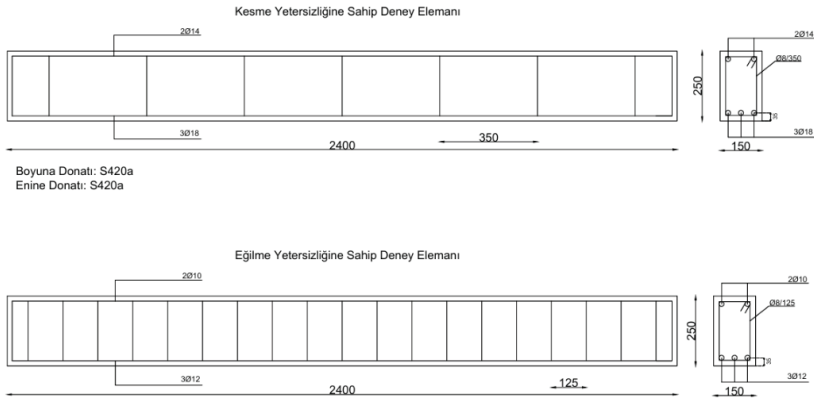


Şekil 4. BUÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda yer alan 3B harç yazıcısına ait görseller

İki farklı yazıcıda aynı karışımlar kullanılarak üretilen kompozitlerinin performansını kıyaslamak üzere diyagonal basınç testi numuneleri de üretilecek, kompozitlerin dayanımları DEÜ'de yazdırılanlarla kıyaslanacak, elde edilen mekanik performans arasındaki fark belirlenecektir

Betonarme Kirişlerin Mekanik Testleri

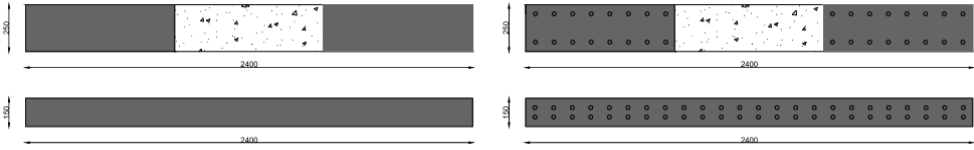
Deney elemanlarının geometrik boyutları benzer olmasına rağmen, kesme dayanımı yetersiz deney elemanlarının a/d oranı 3,72, düşük eğilme dayanımına sahip deney elemanlarının a/d oranı 4,65 olacak şekilde test edilecektir. Hesaplamalar sonrası eğilme kapasitesi düşük kirişte Ø8 çapında S420a donatısı 125 mm aralıkla enine donatı (etriye) olarak kullanılacaktır. S420a boyuna donatı ise çekme bölgesinde 3Ø12 ve basınç bölgesinde 2Ø10 olarak belirlenmiştir (Şekil 5.).



Şekil 5. Eğilme ve Kesme Elemanı Geometrik Boyutları ve Donatı Detayları

Güçlendirme elemanlarının betonarme kirişlere bağlanmasında en yaygın kullanılan yöntemler, epoksi ile yapıştırma ve mekanik ankraj uygulamalarıdır. Mekanik ankraj, genellikle güçlendirme malzemesinin uç noktalarında biriken gerilmenin, betonun ya da epoksinin kayma dayanımını aşması sonucu laminelerin beton yüzeyinden erken yük seviyelerinde ayrılmasını engellemek amacıyla tercih edilir. Bu tür durumların önlenmesi için literatürde sıklıkla mekanik ankraj kullanılmaktadır. Yapılacak çalışmada, güçlendirme elemanlarının ankraj ile bağlandığı numunelerde mekanik ankraj yöntemi uygulanacaktır. Bu şekilde, ankraj ve epoksi yapıştırma yöntemlerinin 3BBY ile yazdırılan elemanlar üzerindeki etkisi incelenecektir. Çalışmanın diğer bir değişkeni ise katman kalınlığının betonarme kiriş davranışına olan etkisidir. Yapılan araştırmalar doğrultusunda, mekanik özelliklerinin yanı sıra katman kalınlığının da farklılık gösterdiği numuneler seçilecektir. Böylece katman kalınlığının betonarme kirişlerin davranışları üzerindeki etkisi araştırılacaktır. Diğer taraftan, farklı lamine türlerinin üretim maliyetleri ve performans açısından değerlendirilmesi yapılmış olacaktır. Beton basınç dayanımı 20 MPa olan kiriş testlerinden sonra betonarme kirişe sunacağı katkı en yüksek olan lamine türü belirlenerek beton basınç dayanımı 9 MPa olan kirişler üzerindeki

etkisi de bu aşamada test edilecektir. Laminelerin betonarme kirişlere bağlanması için epoksi ve ankrajla yapıştırma yöntemlerinin tipik şekilleri Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6. 3B yazdırılmış çimento esaslı kompozitlerin kesme ve eğilme güçlendirmesi için kirişlere epoksi (sol) ve mekanik ankraj (sağ) ile bağlanması

DeneySEL çalışmada düşük eğilme dayanımına ve kesme yetersizliğine sahip betonarme kirişlerde farklı bağ şekillerinde uygulanan 3B yazdırılmış çimento esaslı kompozit laminelerin dayanım ve davranışta sağlayacağı iyileştirmeler mekanik deneylerle ortaya konulacak, göçme mekanizmaları araştırılacaktır. Deney elemanlarının testleri Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Mekanik Laboratuvarlarında yapılacaktır.

SONUÇ

Eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak literatüre yeni bir güçlendirme yöntemi önerilmesi sağlanacaktır. Önerilen güçlendirme yaklaşımının mekanik performansı üzerine; **yazdırma deseni, katmanlar arası bağ dayanımı, numune geometrisi/kalınlığı, donatılendirme yöntemi ve güçlendirme elemanlarının betonarme kirişe bağlanma biçimi** araştırılacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenmektedir (Proje No: 125M556 Proje Başlığı: 3B Yazdırılmış Çimento Esaslı Kompozitlerin Yapısal Güçlendirme Yöntemi Olarak Çeşitli Yetersizliklere Sahip Betonarme Kirişlere Katkısının Değerlendirilmesi). Yazarlar TÜBİTAK’a teşekkür eder. Bu çalışmanın yazım sürecinde dil ve ifade düzenlemeleri için yapay zekâ tabanlı araçlardan sınırlı ölçüde yararlanılmıştır.

KAYNAKLAR

- Ahmed, G. H. (2023). A review of “3D concrete printing”: Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability. İçinde *Journal of Building Engineering* (C. 66). Elsevier Ltd.
- Lloret, E., Shahab, A. R., Linus, M., Flatt, R. J., Gramazio, F., Kohler, M., ve Langenberg, S. (2015). Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication. *CAD Computer Aided Design*, 60, 40-49.
- Lowke, D., Dini, E., Perrot, A., Weger, D., Gehlen, C., ve Dillenburger, B. (2018a). Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges. *Cement and Concrete Research*, 112, 50-65.
- Mechtcherine, V., Nerella, V. N., Will, F., Näther, M., Otto, J., ve Krause, M. (2019). Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. *Automation in Construction*, 107.
- Shakor, P., Sanjayan, J., Nazari, A., ve Nejadi, S. (2017). Modified 3D printed powder to cement-based material and mechanical properties of cement scaffold used in 3D printing. *Construction and Building Materials*, 138, 398-409.
- Yalçınkaya, Ç. (2022). Influence of Hydroxypropyl Methylcellulose Dosage on the Mechanical Properties of 3D Printable Mortars with and without Fiber Reinforcement. *Buildings*, 12(3).

TARİHİ YIĞMA MİNARELERDE DENETİMSİZ HASAR TESPİTİ İÇİN ÇOK KAMERALI BİR YAKLAŞIM

A MULTI-CAMERA APPROACH FOR UNSUPERVISED DAMAGE DETECTION IN HISTORIC MASONRY MINARETS

Cemile DUMAN¹, Kemal HACİEFENDİOĞLU², Tunahan ASLAN³, Tekin GÜLTOP⁴

ÖZET

Bu çalışmada, tarihi yığma minarenin sarsma masası deneyi ile test edilen ölçekli laboratuvar modelinden kamera tabanlı yöntemle elde edilen yer değiştirme verileri kullanılarak yapısal hasar anomalisi tespiti gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen çok kameralı sistem, minarenin 0,15 m ile 3,85 m arasındaki dört farklı yükseklik kotunu hedef alan kameralardan 300 Hz örnekleme hızında X-yönü yer değiştirme zaman serileri elde etmekte; ardından Piramitsel Lucas-Kanade (PLK) seyrek optik akışı, üç kademeli kamera hareketi kompanzasyonu ve Butterworth yüksek geçiren filtre aşamalarından oluşan bir video işleme boru hattı aracılığıyla yapısal titreşim sinyalinin parazit bileşenlerden arındırmaktadır. Ham video kayıtları işlendikten sonra elde edilen zaman serileri, 4 saniyelik kayan pencereler ve dört adımlı robust normalizasyon prosedürüyle (doğrusal trend giderme, medyan merkezleme, MAD+IQR ölçekleme, tanh kırma) derin öğrenme girdi tensörlerine dönüştürülmektedir. Etiket gerektirmeyen denetimsiz öğrenme paradigması çerçevesinde, bilgisayarlı görme alanındaki üç farklı kavramsal çerçeveden esinlenerek özgün otokodlayıcı mimarileri tasarlanmıştır: optik akış felsefesine dayanan SpatioTemporalAE (2B konvolüsyonel), hareket büyütme felsefesine dayanan AttentionDenoisingAE (Transformer öz-dikkat mekanizmalı) ve nesne takip felsefesine dayanan MultiScaleTcnAE (dilatasyonlu çok ölçekli zamansal konvolüsyonel). Modeller, 32 günlük sarsma masası kaydından derlenen, 1.158.280 örneklili ve iki farklı hasar senaryosu içeren veri seti üzerinde karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, SpatioTemporalAE mimarisinin ROC-AUC = 0,9352 ve Ortalama Kesinlik = 0,9055 değerleriyle hem en yüksek anomali ayırım gücünü hem de en yüksek parametre verimliliğini (65.345 parametre, 0,25 MB) sergilediğini ortaya koymaktadır. En düşük yeniden yapılandırma kaybına sahip modelin en düşük anomali ayırım gücünü göstermesi ise denetimsiz yapısal sağlık izleme sistemlerinin tasarımında mimari seçim kriterlerinin yalnızca eğitim kaybına dayandırılmayacağını ortaya koyan önemli bir metodolojik bulgudur.

Anahtar Kelimeler: Yapısal sağlık izleme, Kamera tabanlı yer değiştirme ölçümü, Denetimsiz anomali tespiti, Otokodlayıcı, Tarihi minare, Sarsma masası deneyi

ABSTRACT

This study presents a camera-based structural damage detection framework applied to a scaled laboratory model of a historic masonry minaret subjected to shake table excitation. The proposed multi-camera system acquires X-direction displacement time series at 300 Hz from cameras targeting at four height levels between 0,15 m and 3,85 m, and processes raw video recordings through a dedicated pipeline encompassing Pyramidal Lucas-Kanade sparse optical flow, a three-stage camera motion compensation strategy, and Butterworth high-pass filtering to isolate structural vibration from spurious components. The resulting displacement series are

¹ Doktora Öğrencisi, Gazi Üniversitesi, Ankara, cemile.duman@gazi.edu.tr

² Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, kemalhaciefendioglu@ktu.edu.tr

³ Doktora Öğrencisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, hann80@outlook.com

⁴ Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, Ankara, tglutop@gazi.edu.tr

segmented into 4-second sliding windows and normalized via a four-step robust procedure comprising linear detrending, median centering, MAD-and-IQR-based scaling, and hyperbolic tangent soft clipping before being converted to deep learning input tensors. Within an unsupervised learning paradigm requiring no damage labels, three novel autoencoder architectures are proposed, each inspired by a distinct computer vision concept: SpatioTemporalAE (2D convolutional, inspired by optical flow), AttentionDenoisingAE (Transformer self-attention, inspired by motion magnification), and MultiScaleTcnAE (dilated multi-scale temporal convolutional, inspired by object tracking). All architectures are benchmarked on a shake table dataset of 1,158,280 samples compiled from 32 days of recording across two distinct structural damage scenarios. SpatioTemporalAE achieves the highest anomaly discrimination power with ROC-AUC = 0.9352 and Average Precision = 0.9055, while simultaneously being the most compact model at 65,345 parameters (0.25 MB), yielding a parameter efficiency nearly three times higher than the largest competitor. A key methodological finding is that the model with the lowest reconstruction loss produces the lowest anomaly discrimination, demonstrating that reconstruction loss alone is an insufficient design objective for unsupervised structural health monitoring. All three models successfully detected both damage scenarios, establishing the feasibility of contactless, label-free camera-based SHM for historic masonry structures.

Keywords: Structural health monitoring, Camera-based displacement measurement, Unsupervised anomaly detection, Autoencoder, Historic minaret, Shake table experiment

GİRİŞ

Tarihi yığma minareler, ince ve uzun gövde geometrileri nedeniyle deprem başta olmak üzere dinamik yüklere karşı son derece kırılğan bir davranış sergilemektedir (Doebing vd., 1996). Bu yapıların yapısal sağlık durumunun belirlenmesinde geleneksel ivmeölçer tabanlı Yapısal Sağlık İzleme (SHM) sistemleri sensör montajı gerektirmekte; bu durum tarihi doku açısından müdahaleci bir nitelik taşımaktadır.

Kamera tabanlı yer değiştirme ölçümü, temas gerektirmeyen yapısı, yüksek uzamsal çözünürlüğü ve çok noktalı eş zamanlı ölçüm kapasitesiyle bu kısıtlamalara güçlü bir alternatif sunmaktadır (Farrar ve Worden 2007, Bai vd., 2018, Qian vd., 2026). Bununla birlikte literatürde, kamera verisi üzerinde denetimsiz derin öğrenme temelli anomali tespitini ele alan çalışmalar sınırlıdır.

Bu çalışmanın katkıları şöyle özetlenebilir: (i) bilgisayarlı görme kavramlarından esinlenen üç özgün otokodlayıcı mimarisi önerilmiştir; (ii) 1,15 milyondan fazla örnek ve iki hasar senaryosu içeren kapsamlı bir sarsma masası veri seti üzerinde sistematik karşılaştırma yapılmıştır; (iii) kamera verisine özgü robust normalizasyon prosedürü tanımlanmıştır; (iv) düşük yeniden yapılandırma kaybı ile yüksek anomali ayırım gücü arasındaki gerilim deneysel olarak belgelenmiştir. Ayrıca şekil 1 de çalışmanın tüm adımları grafik olarak özetlenmiştir.

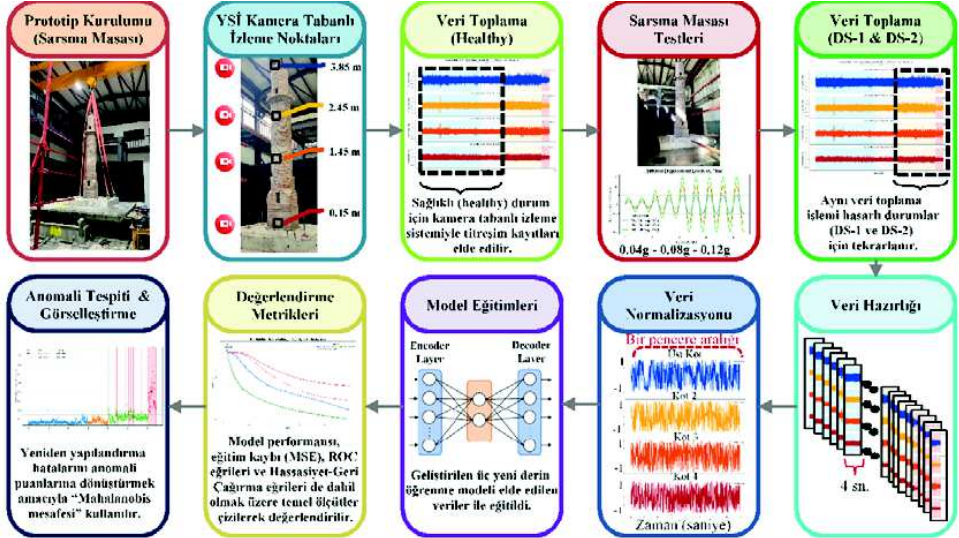
DENEYSEL DÜZENEK VE VERİ SETİ

Bayburt Ulu Camii minaresinin fiziksel özellikleri esas alınarak Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapı Sağlığı İzleme Laboratuvarında ölçekli model inşa edilmiştir (Duman vd., 2024). Model yeterli rijitliğe ulaşmaya kadar ivmeölçer ve kamera izleme sistemleri ile senkronize olarak sürekli takip edilmiştir. Tarihi yığma minareler ince uzun yapıları gereği yüksek hasar oranlarına ulaşmadan göçme durumuna ulaştığı için modelde düşük hasar oranlarının elde edilmesi hedeflenmiştir.

Çok Kameralı Sarsma Masası Deneyi

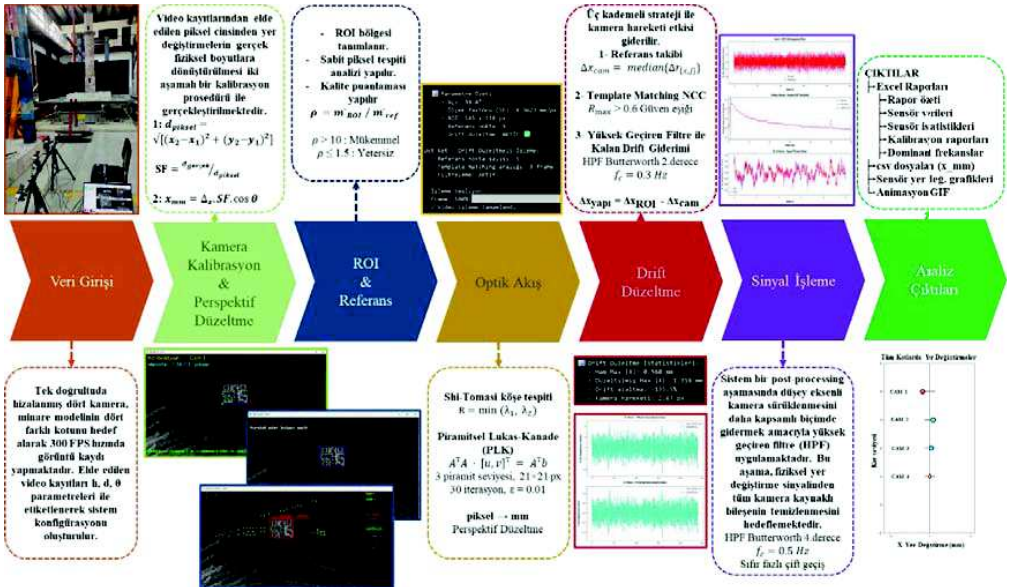
Tarihi yığma minarenin ölçekli laboratuvar modeli, sarsma masası üzerine yerleştirilerek 0,04g, 0,08g ve 0,12g şiddetlerinde deprem uyarımına tabi tutulmuştur. Şekil 2’de gösterilen kamera tabanlı izleme sistemindeki her bir kamera dört farklı yükseklik kotuna (0,15 m, 1,45 m, 2,45 m ve 3,85 m)

odaklanarak izleme yapacak şekilde konumlandırılmıştır. Yapının sarsma masasına sağlam bir şekilde montajı yapıldıktan sonra yapının sağlıklı durumuna ait ölçüm kayıtları elde edilmiştir. Hasarlı durumlara ait kayıtlar ise deprem uyarılarından sonra gerçekleştirilmiştir. X-yönü yatay yer değiştirme verileri 300 Hz örnekleme hızında kaydedilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği kurulumundan anomali tespitine tüm iş akışı

Ham video kayıtları, Piramitsel Lucas-Kanade (PLK) seyrek optik akış algoritmasıyla işlenmiştir (Schreier vd., 2009). Şekil 2’de kamera titremesinden kaynaklanan parazit sinyal, median referans takibi, NCC tabanlı şablon eşleştirme ve Butterworth yüksek geçiren filtre ($f_c = 0,3 \text{ Hz}$) aracılığıyla üç kademeli kompanzasyon stratejisiyle giderilmiştir. Post-processing aşamasında ise doğrusal trend giderme, 4. dereceden Butterworth HPF ($f_c = 0,5 \text{ Hz}$), sıfır fazlı



Şekil 2. Video işleme iş akışı

filtre ve 3-sigma aykırı değer kırma uygulanmıştır. Tüm prosedürlerden sonra yapının yer değiştirme değerlerine ait analiz çıktıları elde edilmiştir.

Veri Bölümlendirme

Deneysel çalışmada sağlıklı ve hasarlı durumlara ait toplam 32 video kaydı şekil 2’de gösterilen tüm aşamaların tamamlanması ile işlenmiştir. Elde edilen tüm çıktılara kronolojik olarak art arda sıralanmıştır. Sağlıklı veri dosyalarının bir kısmı tablo 1’de gösterildiği gibi test grubu olarak ayrılmıştır.

Tablo 1. Veri seti bölümlendirmesi (300 Hz, 4 kanal).

Alt Küme	Dosyalar	Örnek Sayısı	İçerik
Eğitim	day 1–15	543.144	Hasarsız
Test	day 16–20	181.179	Hasarsız
Hasar 1	day 21–30	362.031	DS-1
Hasar 2	day 31–32	71.926	DS-2
Toplam	—	1.158.280	—

Ön İşleme

Ham zaman serileri, $W = 1.200$ örnek (4 saniye) ve $S = 600$ adım büyüklüğüyle (%50 örtüşme) kayan pencerelerle bölünmüştür. Normalizasyon için dört adımlı robust prosedür uygulanmıştır: (1) doğrusal trend giderme, (2) medyan ile merkezleme, (3) MAD+IQR tabanlı robust ölçekleme ve (4) tanh yumuşak kırma.

$$\sigma_p = \max(1,4826 \cdot MAD, IQR/1,349) \quad (1)$$

MODEL MİMARİLERİ

Üç modelin tamamı MSE yeniden yapılandırma kaybı üzerinden eğitilmiş olup anomali skoru olarak test anındaki pencere başına MSE değeri kullanılmaktadır (Bao vd., 2019, Pirrò ve Gentile 2025). Tüm modeller AdamW optimizörü ($lr = 10^{-4}$, weight decay = 10^{-5}), ReduceLROnPlateau öğrenme oranı planlaması ve gradyan kırma ($norm \leq 1,0$) ile 50 epoch boyunca eğitilmiştir.

SpatioTemporalAE — Optik Akış Felsefesi

Giriş tensörü ($N, 1, C, W$) biçimine yeniden şekillendirilerek 2B Conv katmanlarına verilmektedir. Bu sayede kanallar arası uzamsal ilişkiler (yapıdaki farklı kotlardaki noktaların koordineli hareketi) ile zamansal dinamikler eş zamanlı olarak işlenmektedir. Encoder üç Conv2d katmanından, decoder ise simetrik ConvTranspose2d katmanlarından oluşmaktadır.

AttentionDenoisingAE — Motion Magnification Felsefesi

İki aşamalı 1B konvolüsyon encoder, sinüzoidal konumsal kodlama ve dört başlıklı Transformer encoder katmanından oluşmaktadır. Eğitim sırasında girdiye $\sigma = 0,03$ Gauss gürültüsü eklenerek gürültü bastırma kapasitesi güçlendirilmiştir.

MultiScaleTcnAE — Track Anything Felsefesi

Dilasyon oranları 1, 2 ve 4 olan üç TCNBlock’tan oluşan encoder, artık (residual) atlama bağlantıları içeren simetrik bir decoder ile tamamlanmaktadır. Genişleyen alım alanı, hem kısa hem uzun vadeli titreşim örüntülerini eş zamanlı olarak yakalamaktadır (Bai vd., 2018).

Tablo 2. Model mimarisi karşılaştırması.

Model	Felsefe	Parametre	Boyut
SpatioTemporalAE	Optical Flow	65.345	0,25 MB
AttentionDenoisingAE	Motion Magnif.	72.388	0,35 MB
MultiScaleTcnAE	Track Anything	166.244	0,64 MB

ANOMALİ TESPİT YÖNTEMİ

Eğitilen her model tüm veri bölümleri üzerinde çalıştırılarak pencere başına MSE yeniden yapılandırma hatası hesaplanmaktadır. Anomali eşiği, normal veri (eğitim + test) üzerindeki 99,5. yüzdelerlik dilim ile test setinin maksimum hatasının %2 güvenlik marjlı değerinin maksimumu olarak belirlenmektedir:

$$\theta = \max(Q_{0.995}(e_{normal}), \max(e_{test}) \cdot 1,02) \quad (2)$$

Ardışık anomali pencereleri, minimum beş pencere uzunluğu ve iki pencerele sonlandırma kuralıyla birleştirilerek zamansal anomali segmentleri oluşturulmaktadır.

BULGULAR

Anomali Ayırım Gücü

Tablo 3. Model performans karşılaştırması.

Model	AUC	AP	Val Loss	Segment
SpatioTemporalAE	0,9352	0,9055	0,0169	16
AttentionDenoisingAE	0,9283	0,8961	0,0264	11
MultiScaleTcnAE	0,7932	0,7403	0,0095	5

SpatioTemporalAE, hem ROC-AUC (0,9352) hem de Ortalama Kesinlik (0,9055) açısından en yüksek değerlere ulaşmıştır. 0,93 düzeyindeki AUC değeri, modelin hasarlı ve sağlıklı yapı davranışını yüksek güvenilirlikle ayırt edebildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca SpatioTemporalAE, 16 anomali segmenti tespit etmiştir. Bu durum hasarlı bölgelerdeki anomalileri en yüksek oranda tespit edebilme yeteneğine sahip olduğunu göstermiştir.

Model verimliliği açısından bakıldığında ise SpatioTemporalAE, en az parametre sayısına (65345) sahipken en yüksek anomali ayırım gücüne ulaşmıştır. 100000 parametre başına AUC olarak tanımlanan verimlilik metriğinde SpatioTemporalAE (1,431), MultiScaleTcnAE'ye (0,477) kıyasla üç kata yakın daha yüksek bir değer sergilemektedir. 0,25 MB model boyutu, gerçek zamanlı gömülü sistem uygulamaları için belirgin bir avantaj sunmaktadır.

TARTIŞMA

Düşük Kayıp – Yüksek AUC Paradoksu

Bu çalışmanın en çarpıcı bulgusu, en düşük validasyon kaybına sahip modelin (MultiScaleTcnAE, loss = 0,0095) en düşük anomali ayırım gücünü sergilemesidir (AUC = 0,7932). Bu paradoks şu şekilde yorumlanmaktadır: genişleyen dilasyonlu çok ölçekli yapı, hem normal hem de hasarlı örüntüleri genel bir uzaysal çerçevede temsil edebilmekte; bu da hasar sırasında ortaya çıkan yeniden yapılandırma hatasının sınırlı kalmasına yol açmaktadır. Bu bulgu, denetimsiz YSİ sistemlerinde

eğitim kaybının tek optimizasyon kriteri olarak kullanılmasının yetersizliğini somut biçimde ortaya koymaktadır.

Kamera Verisinin Özgün Özellikleri

Kamera tabanlı yer değiştirme verisi, ivmeölçer sinyallerine kıyasla çok küçük genliklere ($\sigma \approx 0,0004-0,0007$ mm), karmaşık bir gürtültü yapısına ve kanallar arası daha zayıf korelasyona sahiptir. Bu özellikler, standart z-skor normalizasyonu yerine önerilen dört adımlı robust prosedürün kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. 2B konvölüsyonel mimari (SpatioTemporalAE), kanallar arası uzamsal ilişkileri zamansal dinamiklerle birlikte işlemesi sayesinde bu veri tipine özgü bir uyum sergilemektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada kamera tabanlı yer değiştirme verisiyle denetimsiz derin öğrenme tabanlı yapısal anomali tespiti kapsamlı biçimde araştırılmış; üç farklı otokodlayıcı mimarisinin karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir. SpatioTemporalAE, AUC = 0,9352 ve AP = 0,9055 değerleriyle hem en yüksek anomali ayırım gücünü hem de en yüksek parametre verimliliğini (1,431 AUC/100K parametre) ortaya koymuştur. Her üç model iki farklı hasar senaryosunu başarıyla tespit etmiş; bu sonuç kamera tabanlı denetimsiz YSİ'nin uygulanabilirliğine dair güçlü bir kanıt sunmaktadır. Düşük kayıp-yüksek AUC paradoksu, denetimsiz yapısal izleme sistemlerinin tasarımında mimari seçim kriterlerinin yalnızca yeniden yapılandırma kaybına dayanmaması gerektiğini vurgulamaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 1001-Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından desteklenen "Tarihi Yiğma Minarelerin Video Kamera Tabanlı Yapı Sağlığının İzlenmesi ve Derin Öğrenme Yöntemine Dayalı Uzun Dönemli Karar Verme Modeli Geliştirilmesi" (Proje No:222M140) başlıklı araştırma projesinin bir ürünüdür. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'A ve Vakıflar Genel ve Bölge Müdürlüğüne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Bai S, Koller J Z and Koltun V (2018) "An empirical evaluation of generic convolutional and recurrent networks for sequence modeling." *arXiv preprint arXiv:1803.01271*.
- Bao Y, Tang Z, Li H and Zhang Y (2019) "Computer vision and deep learning-based data anomaly detection method for structural health monitoring." *Structural Health Monitoring* **18**(2): 401–421.
- Doebling S W, Farrar C R, Prime M B and Shevitz D W (1996) "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review", Technical Report No. LA-13070-MS, United States.
- Duman C, Aslan T, Hacıefendioğlu K and Gültop T (2024) "AI-Based Damage Detection In Historic Masonry Minarets Using A Multi-Camera System" *Ulusal 9. Yapı Mekaniği Laboratuvarları Çalıştayı (Prof. Dr. Uğur ERSOY Onuruna)*, Düzce, Türkiye: 221–226.
- Farrar C R and Worden K (2007) "An introduction to structural health monitoring." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **365**(1851): 303–315.
- Pirró M and Gentile C (2025) "Detection and localization of anomalies in bridges using accelerometer data and sparse auto-encoders" *Developments in the Built Environment* **23**: 100715.
- Qian Z, Feng D, Kong X, Han Y and Li B (2026) "Experimental validation of a multi-camera synchronous system for long-span bridge displacement monitoring." *Structures* **87**: 111600.
- Schreier H, Ortu J-J and Sutton M A (2009) "Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications." *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*, Springer New York, NY.

BOŞLUK GEOMETRİSİ OPTİMİZASYONU İLE YAPISAL PERFORMANSI ARTIRILMIŞ YENİ BİR YIĞMA YAPI TUĞLASI: TASARIM, ÜRETİM VE PLANLANAN DENEYLER

A NEW MASONRY BRICK WITH ENHANCED STRUCTURAL PERFORMANCE THROUGH VOID GEOMETRY OPTIMIZATION: DESIGN, PRODUCTION, AND PLANNED TESTS

Alper ÇELİK¹ ve Ömer MERCİMEK²

ÖZET

Yığma yapıların deprem etkileri altındaki kırılma davranışı, birim düzeyindeki geometrik tasarımın yapısal performans üzerindeki etkisinin yeniden değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada, boşluk geometrisi optimizasyonuna dayalı olarak yapısal performansı artırılmış yeni bir yığma yapı tuğlasının geliştirilme yaklaşımı, üretim süreci ve planlanan yapı mekaniği deneyleri sunulmaktadır. Çalışmanın çıkış noktası, önceki sayısal araştırmalarda boşluk geometrisinin taşıma gücü, rijitlik ve enerji yutma kapasitesi üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koyan bulgulardır. Bu kapsamda, geliştirilen kemer formulu iç boşluk düzenine sahip tuğla geometrileri önce birim düzeyinde değerlendirilmiş, ardından duvar ölçeğinde farklı harç sınıfları ve farklı boşluk oranları altında sayısal olarak incelenmiştir. Bu analizler, boşluk oranındaki artışa rağmen önerilen geometrinin duvar davranışında daha dengeli bir kapasite ve rijitlik kaybı sergileyebildiğini, dolayısıyla boşluk oranı ile performans arasındaki ilişkinin yalnızca miktara değil, boşluk topolojisine de bağlı olduğunu göstermiştir. Bu birikim doğrultusunda, uygun tasarımın mevcut ekstrüzyon esaslı üretim hatlarına yalnızca kalıp başlığında yapılacak sınırlı bir revizyon ile uyarlanabilecek biçimde kurgulanması hedeflenmiştir. Bildiride, sayısal tasarımdan üç boyutlu prototiplemeye, metal kalıp başlığı üretiminden fabrika ölçeğinde numune imalatına kadar uzanan tasarım ve üretim zinciri özetlenmektedir. Ayrıca, üretilen tuğlalar üzerinde gerçekleştirilecek malzeme deneyleri ile bu birimlerle oluşturulacak duvar numunelerinde uygulanması planlanan düzlem içi ve düzlem dışı deney programı tanıtılmaktadır. Çalışmanın, yığma yapılarda deprem performansı odaklı yeni tuğla geliştirme yaklaşımına ve laboratuvar ölçekli doğrulama çalışmalarına katkı sunması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: ArchBrick®, Yığma yapılar, boşluk geometrisi optimizasyonu, düşey boşluklu tuğla

ABSTRACT

The brittle behavior of masonry structures under earthquake loading necessitates a re-evaluation of the influence of unit-level geometric design on structural performance. This study presents the development approach, production process, and planned structural mechanics tests of a new masonry brick with enhanced structural performance based on void geometry optimization. The study is motivated by findings from previous numerical investigations demonstrating that void geometry plays a decisive role in load-carrying capacity, stiffness, and energy dissipation capacity. Within this framework, brick geometries incorporating an arch-shaped internal void configuration were first evaluated at the unit scale and subsequently investigated numerically at the wall scale under different mortar classes and varying void ratios. These analyses showed that, despite the increase in void ratio, the proposed geometry was able to exhibit a more balanced reduction in wall capacity and stiffness, indicating that the relationship between void ratio and structural performance depends not only on the number of voids but also on their topology. In light of this accumulated knowledge, the selected design was configured to be compatible with existing extrusion-based manufacturing lines through only a limited modification to the die head. The paper outlines the design and production chain, extending from numerical design

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Ankara Üniversitesi, Ankara, alper.çelik@ankara.edu.tr

² Doç. Dr., Ankara Üniversitesi, Ankara, omercimek@ankara.edu.tr

to three-dimensional prototyping, die-head fabrication, and full-scale brick production. In addition, the planned experimental program is introduced, including material tests on the manufactured bricks as well as in-plane and out-of-plane tests on wall specimens constructed using these units. The study is expected to contribute to the development of a new earthquake-performance-oriented masonry brick concept and to its validation through laboratory-scale investigations.

Keywords: ArchBrick®, masonry structures, void geometry optimization, hollow brick

GİRİŞ

Yığma yapılar, özellikle deprem etkileri altında sınırlı süneklik ve enerji tüketme kapasiteleri nedeniyle kırılğan davranış sergileyebilen yapı sistemleridir. Bu nedenle, yığma birimlerin geometrik özelliklerinin yapısal performans üzerindeki etkisinin araştırılması önem taşımaktadır. Boşluklu kil tuğlalar, hafiflik, taşınabilirlik ve ısı yalıtımı gibi avantajları nedeniyle yaygın olarak kullanılmakta; bu tür birimlere yönelik araştırmalar da çoğunlukla ısı ve akustik performans üzerine yoğunlaşmaktadır. Buna karşılık, boşluk geometrisinin yapısal davranış üzerindeki etkisini doğrudan inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Özellikle, iç boşluk düzeninin yapı elemanı düzeyindeki mekanik davranışa etkisini geometri optimizasyonu yaklaşımıyla ele alan çalışmaların literatürde yok denecek kadar az olduğu görülmektedir. Bu alandaki boşluğu gidermek amacıyla, Çelik vd. (2025) tarafından düşey boşluklu tuğlaların iç boşluk düzeni yapısal performans odağında sayısal olarak değerlendirilmiş ve kemer esaslı geometrilerin geleneksel referans tuğlalara kıyasla daha elverişli sonuçlar verebildiği gösterilmiştir.

Bu yaklaşım, daha sonra Çelik (2026) çalışmasında birim, duvar ve bina ölçeklerini kapsayan çok ölçekli bir sayısal değerlendirme ile ileri taşınmıştır. Söz konusu çalışmada, kemer formulu yeni tuğla geometrisinin farklı harç sınıfları ve farklı boşluk oranları altında duvar davranışı üzerindeki etkisi incelenmiş; boşluk oranı arttıkça performansın yalnızca boşluk miktarına değil, boşluk topolojisine de bağlı olduğu ortaya konmuştur. Böylece, optimize edilmiş iç boşluk geometrisinin yalnızca birim düzeyinde değil, duvar ve yapı ölçeğinde de yapısal davranışı iyileştirme potansiyeline sahip olduğu gösterilmiştir. Bu bildiriye, söz konusu sayısal birikim temel alınarak geliştirilen yeni tuğla tasarımının üretim süreci özetlenmekte ve laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirilmesi planlanan yapı mekaniği deney programı tanıtılmaktadır.

GELİŞTİRİLEN TUĞLA TASARIMI VE NÜMERİK ÇALIŞMALAR

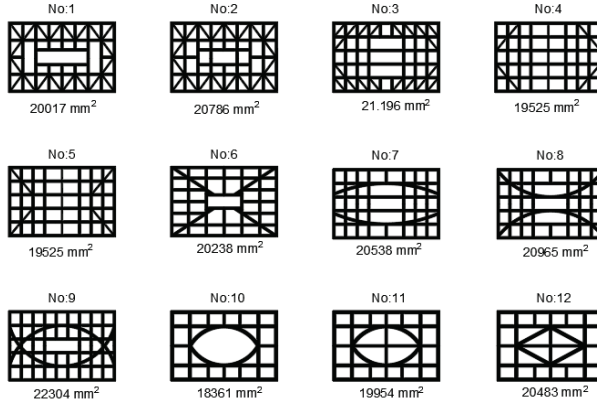
Ön Çalışmalar ve Tasarım Yaklaşımı

Bu çalışmanın çıkış noktası, ülkemizde yaygın olarak kullanılan düşey boşluklu yığma yapı tuğlalarında iç boşluk düzeninin uzun yıllardır büyük ölçüde benzer kalmış olması ve bu geometrilerin yapısal performans açısından sistematik biçimde optimize edilmemiş olmasıdır. Mevcut referans tuğla tipleri, hafiflik ile ısı ve ses yalıtımı gibi işlevsel avantajlar sağlamakla birlikte, boşluk düzenlerinin deprem davranışı üzerindeki etkisi yeterince araştırılmamıştır. Bu nedenle ön çalışmada, geleneksel tuğla geometrileri başlangıç noktası olarak alınmış ve aynı dış ölçüler korunarak daha yüksek yapısal performans sağlayabilecek alternatif boşluk topolojilerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, yeni boşluk desenlerinin mevcut ekstrüzyon temelli üretim mantığına uyurlanabilir olması, tasarım yaklaşımının temel kısıtlarından biri olarak benimsenmiştir.

Çelik vd. (2025) tarafından gerçekleştirilen önceki nümerik çalışmada, kil bazlı pişmiş tuğla malzemesinin doğrusal olmayan davranışını temsil edebilmek amacıyla beton hasarlı plastisite modeli kullanılmıştır. Bu kapsamda, tuğla üretim koşullarını temsil eden numuneler hazırlanmış, basınç altında deneysel gerilme-gerinim davranışları belirlenmiş ve model parametreleri bu verilerle kalibre edilmiştir. Deneysel ve sayısal eğriler arasındaki yakın uyum, geliştirilen malzeme modelinin parametrik analizlerde güvenle kullanılabileceğini göstermiştir. Modelleme yaklaşımına ve beton hasarlı plastisite modeline ait girdilere ilişkin ayrıntılı bilgiler Çelik vd. (2025) çalışmasında sunulmuştur.

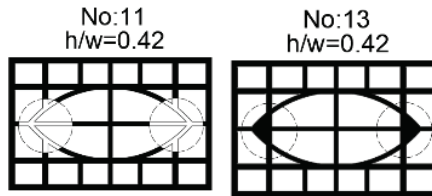
Boşluk Geometrisinin Geliştirilmesi

Doğrulan malzeme modeli kullanılarak öncelikle iki farklı referans düşey boşluklu tuğla sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş, ardından kemer ve kafes davranışından yararlanan toplam 12 farklı alternatif boşluk geometrisi oluşturulmuştur (Çelik vd. 2025). Bu ilk tarama sonucunda, özellikle merkezi kemer düzenine sahip tasarımların daha elverişli bir yük aktarım mekanizması sunduğu görülmüş; bu nedenle gelişim süreci kemer formu geometri üzerinde yoğunlaştırılmıştır. Çelik vd. (2025) tarafından analiz edilen alternatif boşluk düzenlerinin genel görünümü Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Değerlendirilen alternatif boşluk geometrilerine sahip tuğla kesitleri (Çelik vd. (2025))

Ön analizler, orta bölgede kemer formu içeren tasarımların yük taşıma kapasitesi, rijitlik ve enerji tüketme kapasitesi bakımından daha dengeli sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bu aşamada özellikle No:10 ve No:11 tasarımları öne çıkmış, ardından kemer yüksekliği/genişliği (h/w) oranının etkisi ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Değerlendirmeler sonucunda, $h/w = 0.56$ oranına sahip No:11 tasarımının üç asal doğrultuda en dengeli davranışı sunduğu; buna karşılık $h/w = 0.42$ oranının kısa kenar doğrultusunda daha yüksek kapasite sağlamakla birlikte uzun kenar doğrultusunda zayıflık taşıdığı belirlenmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, yük aktarımında zayıflık oluşturan birleşim bölgeleri yeniden düzenlenmiş ve nihai No:13 tasarımı geliştirilmiştir. No:11 ve No:13 tasarımlarına ait geometriler Şekil 2’de verilmektedir. Bu tasarım yaklaşımının önemli bir yönü, geliştirilen yeni geometrilerin geleneksel tuğlalarla aynı dış ölçülerde ve benzer ağırlıkta kurgulanmış olmasıdır. Böylece, önerilen birimlerin mevcut uygulama alışkanlıklarını bozmayacak ve yalnızca sınırlı kalıp başlığı değişiklikleriyle üretim hatlarına uyarlanabilecek nitelikte olması hedeflenmiştir. Bu durum, tasarımın yalnızca yapısal açıdan değil, uygulama ve üretilebilirlik bakımından da rasyonel bir çözüm olduğunu göstermektedir.



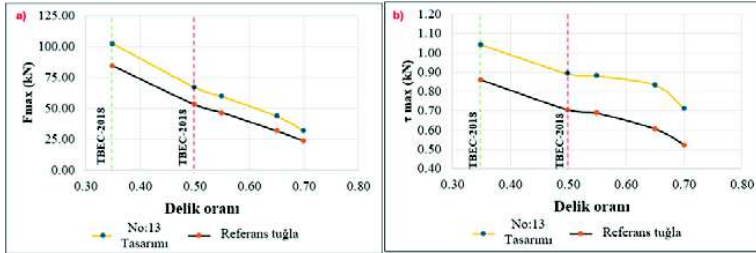
Şekil 2. Yapısal performans açısından öne çıkan No:11 ve optimize edilmiş No:13 tuğla tasarımları

TBDY 2018’de düşey delikli taşıyıcı yığma birimlerin basınç dayanımı, yatay derzlere paralel doğrultu için en az 2 MPa, yatay derzlere dik doğrultu için ise en az 5 MPa olarak tanımlanmaktadır. Bu çerçevede, Çelik vd. (2025) tarafından gerçekleştirilen nümerik değerlendirmelerde X yönü düzlem dışı etkiyi, Y yönü yatay derzlere paralel doğrultudaki yüklemeyi ve Z yönü ise yatay derzlere dik doğrultudaki yüklemeyi temsil etmektedir. Söz konusu çalışmada geliştirilen ve nihai tasarım

olarak öne çıkan No:13 geometrisinin, referans tuğlalara kıyasla taşıma kapasitesinde X yönünde %25'e, Y yönünde %39'a ve Z yönünde %9'a varan artışlar sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, rijitlik bakımından özellikle Y yönünde %13'e ve Z yönünde %12'ye kadar iyileşme elde edilmiş; enerji tüketim kapasitesinde ise X yönünde %300'e, Y yönünde %283'e ve Z yönünde %21'e ulaşan dikkat çekici artışlar görülmüştür. Bu bulgular, No:13 tasarımının özellikle düzlem içi davranış ve enerji yutma kapasitesi açısından önemli avantajlar sunduğunu ve optimize edilmiş iç boşluk geometrisinin yığma birimlerin deprem performansını iyileştirmede etkili bir araç olabileceğini göstermektedir.

Duvar Bazında Nümerik Değerlendirmeler

Çelik (2026) tarafından gerçekleştirilen duvar ölçeğindeki nümerik analiz çalışmasında, yeni tuğla tasarımı ve geleneksel referans tuğlalar kullanılarak oluşturulan duvar panelleri, ASTM E519 standardındaki diyagonal basınç deneyini temsil edecek biçimde sayısal olarak modellenmiştir. Bu kapsamda, tuğla birimler katı elemanlarla, yatay ve düşey derzler ise yüzey-tabanlı kohezif arayüzlerle tanımlanmış ve duvar davranışı ABAQUS ortamında basitleştirilmiş mikro modelleme yaklaşımıyla incelenmiştir. Farklı harç kalitelerini temsil eden arayüz parametre setleri kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde, maksimum kesme gerilmesi, elastisite modülü, kayma modülü, yatay deplasman düzeyi ve enerji yutma kapasitesi gibi performans göstergeleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, özellikle orta ve iyi harç sınıflarında yenilikçi tuğla (No:13 tasarımı) ile modellenen duvarların referans duvarlara kıyasla daha yüksek kesme dayanımı, daha sınırlı yatay deformasyon ve daha yüksek enerji yutma kapasitesi sunduğunu göstermiştir. Çelik (2026) tarafından gerçekleştirilen çalışmanın bir sonraki aşamasında, delik oranının duvar kesme davranışı üzerindeki etkisi ayrıca değerlendirilmiştir. Bu amaçla, farklı boşluk oranlarına sahip ArchBrick ve referans tuğla kesitleri kullanılarak oluşturulan duvar panelleri aynı sınır koşulları altında diyagonal basınç yüklemesine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, boşluk oranı arttıkça referans tuğla duvarlarda beklenen kapasite ve rijitlik kaybının belirginleştiğini; buna karşılık ArchBrick geometrisinin, özellikle yaklaşık %65 boşluk oranı düzeyinde dahi, kesme dayanımını ve rijitliği daha iyi koruyabildiğini ortaya koymuştur. Boşluk oranının kesme kapasitesi üzerindeki etkisini gösteren karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 3'te sunulmaktadır. Bu bulgular, duvar performansının yalnızca boşluk miktarına değil, boşluk topolojisine de bağlı olduğunu göstermekte; ayrıca TBDY 2018'de taşıyıcı yığma duvarlarda öngörülen en fazla %50 boşluk oranı sınırının, geleneksel düşey delik düzenleri için güvenli bir üst sınır olmakla birlikte, geometrisi optimize edilmiş kemer tabanlı tuğlalar açısından yeniden değerlendirilebileceğine işaret etmektedir.



Şekil 3. Farklı delik oranları için No:13 tasarımı ve referans tuğlanın (a) maksimum yük ve (b) maksimum kayma gerilmesi bakımından karşılaştırılması

PROTOTİP ÜRETİM SÜRECİ

Geliştirilen yeni tuğla geometrisinin üretilebilirliğini doğrulamak amacıyla prototip üretim süreci, laboratuvar ölçeğinden sanayi ölçeğine uzanan çok aşamalı bir yaklaşımla gerçekleştirilmiştir. Sürecin başlıca aşamaları Şekil 4'te sunulmaktadır. Bu kapsamda, öncelikle yeni boşluk geometrisine uygun kalıp elemanları hazırlanmış, ardından bu geometri endüstriyel üretim hattına entegre edilerek prototip tuğlaların şekillendirilmesi sağlanmıştır. Üretim çalışmaları, Erbaa Ortaş Tuğla A.Ş. ve Erzincan Ağaoglu Toprak A.Ş. iş birliğiyle, geleneksel düşey boşluklu tuğlaların üretiminde izlenen standart sanayi prosedürleri esas alınarak yürütülmüştür. Prototip tuğlalar, diğer ticari tuğlalarla aynı

toprak özelliklerine sahip hammaddeden üretilmiş, aynı üretim bandında şekillendirilmiş ve yine diğer tuğlalarla aynı şekilde doğal ortam koşullarında kurutulmuştur. Kurutma işlemini takiben numuneler, yaklaşık 800–1000 °C sıcaklık aralığında çalışan Hoffmann fırınında pişirilerek nihai hâline getirilmiştir. Üretim sonrasında tuğlalar üzerinde gerekli kontroller ve testler gerçekleştirilmiş, daha sonra numuneler paketlenerek laboratuvar deneylerinde kullanılmak üzere Ankara Üniversitesi'ne sevk edilmiştir. Böylece, sayısal olarak geliştirilen boşluk geometrisinin mevcut tuğla üretim teknolojileri ile ek bir üretim sistemi gerektirmeden, geleneksel tuğlalarla aynı üretim mantığı içinde uygulanabilir olduğu ortaya konulmuştur.

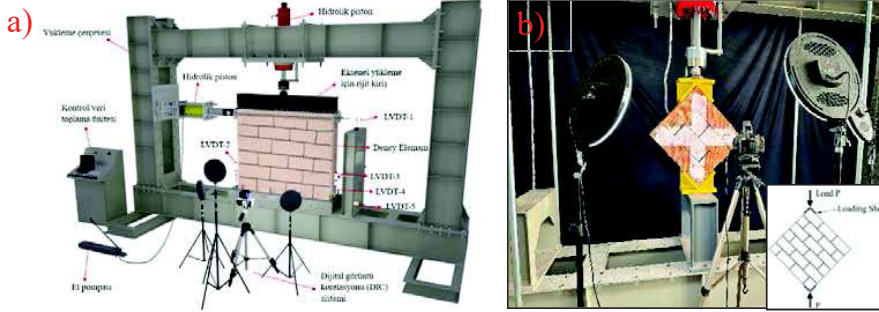


Şekil 4. Geliştirilen tuğla prototiplerinin kalıp hazırlığından üretim, kurutma, pişirme, test, paketlenme ve sevk aşamalarına kadar uzanan üretim süreci

PLANLANAN ELEMAN DENEYLERİ

Geliştirilen yeni tuğla tasarımlarının yapı elemanı düzeyindeki performanslarının deneysel olarak doğrulanması amacıyla kapsamlı bir duvar deneyi programı planlanmıştır. Deneysel programda, iki referans tuğla tipi ile iki farklı geliştirilen tuğla tasarımından oluşturulan duvar numuneleri için beş ayrı yükleme durumu öngörülmüştür. Bu kapsamda her bir duvar tipi eksenel basınç, diyagonal çekme, monotonik yanal yükleme, çevrimsel yanal yükleme ve düzlem dışı eğilme etkileri altında test edilecektir. Bu yaklaşım sayesinde, farklı tuğla geometrilerinin taşıma kapasitesi, kesme davranışı, süneklik, rijitlik kaybı ve düzlem dışı stabilite performansları bütüncül olarak karşılaştırılabilecektir. Böylece, yeni tasarımların taşıma kapasitesi, kesme dayanımı, rijitlik, süneklik, enerji yutma kapasitesi ve hasar gelişim özellikleri, geleneksel düşey boşluklu tuğlalardan oluşturulan duvarlarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilecektir. Yanal yükleme testleri (monotonik ve çevrimsel), Şekil 5a'da gösterilen şematik düzeneğe göre gerçekleştirilecek olup bu testlerde 1200 mm yükseklik ve 1500 mm genişliğe sahip duvar numuneleri kullanılacaktır. Diyagonal basınç testleri ise Şekil 5b'de verilen düzeneğe göre yürütülecek ve bu deneylerde 1000 mm × 1000 mm boyutlarında duvar numuneleri kullanılacaktır. Yanal yükleme deneylerinde, duvarın deprem etkisi altındaki gerçekçi davranışını temsil edebilmek amacıyla yatay yük ile birlikte sabit bir düşey yük de uygulanacaktır. Yatay yük, duvarın üst bölgesine yerleştirilen çelik levhalar aracılığıyla servo-hidrolik yükleme sistemi ile aktarılacak; düşey yük ise kauçuk tabaka, çelik levha, yağlanmış çelik silindireler ve özel çelik profil yardımıyla duvar üst başlığına düzgün ve yayılı biçimde iletilecektir. Bu sistem sayesinde duvar yanal yönde ötelenirken düşey yükleme düzeninin rijitliğini kaybetmeden yalnızca eksenel yük aktarması sağlanacak, böylece deney sırasında düşey yük ile yatay yükün birlikte etki ettiği daha gerçekçi bir sınır durumu elde edilecektir. Tüm numuneler TS EN 998-2 standardına uygun harç ile örülecek ve 28 günlük kür süresinin ardından test edilecektir. Yükleme sırasında yatay ve düşey yer değiştirmeler LVDT'ler ile ölçülecek, yüzey deformasyonları, çatlak başlangıcı ve çatlak yayılımı ise Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) sistemi ile izlenecektir. Özellikle

DIC sistemi, duvar yüzeyindeki yer değiştirme ve şekil değiştirme alanlarının temassız ve tam alanlı olarak belirlenmesi bakımından deneylerin vazgeçilmez bileşenlerinden biri olup, hasar gelişiminin ayrıntılı biçimde değerlendirilmesine olanak sağlayacaktır. Bu sayede her bir duvar tipinin yüklenme altındaki davranışı, çatlak oluşum mekanizması, nihai hasar şekli ve taşıma kapasitesi ayrıntılı olarak ortaya konulacaktır.



Şekil 5. Planlanan duvar deney düzenekleri: (a) aksel basıncı ve düzlem içi yanal yüklemeye deneyleri için önerilen yüklemeye sistemi, (b) diyagonal basıncı deneyi düzeniği

SONUÇ

Bu bildiriye, boşluk geometrisi optimizasyonuna dayalı olarak geliştirilen yeni bir yığma yapı tuğlasının tasarım yaklaşımı, önceki nümerik bulgular ışığında ortaya konulmuş; ayrıca prototip üretim süreci ile planlanan yapı mekaniği deney programı özetlenmiştir. Önceki nümerik çalışmalar, iç boşluk topolojisinin tuğla ve duvar düzeyindeki yapısal davranış üzerinde belirleyici olduğunu ve kemer formulu geometrilerin geleneksel düz boşluklu tuğlalara kıyasla daha elverişli bir performans potansiyeli sunduğunu göstermektedir. Sanayi ölçeğinde gerçekleştirilen prototip üretimi ise, önerilen geometrinin mevcut üretim altyapısı ile uygulanabilir olduğunu ortaya koymuştur.

Planlanan deneysel çalışmalar ile yeni tuğla tasarımlarının aksel yük, kesme etkisi, yanal yüklemeye ve düzlem dışı davranış altındaki performanslarının laboratuvar ortamında doğrulanması hedeflenmektedir. Bu deneylerden elde edilecek bulguların, geliştirilen tuğla tasarımlarının yapı elemanı düzeyindeki mühendislik uygulanabilirliğini ortaya koyması ve yığma yapılarda deprem performansı odaklı yeni tasarım yaklaşımlarına katkı sunması beklenmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, numune üretimi ve deneysel çalışmalar bakımından TÜBİTAK'ın 125M619 numaralı projesi kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca geliştirilen tuğla geometrileri için 2024/021852 başvuru numarası ile ulusal patent başvurusu yapılmıştır.

KAYNAKLAR

- ASTM International. (2022). *ASTM E519/E519M-22: Yığma duvar panellerinde diyagonal çekme (kesme) deney yöntemi için standart test yöntemi*. ASTM International.
- Çelik, A., Anıl, Ö., & Mercimek, Ö. (2025). Numerical analysis of failure performance in novel hollow brick designs. *Engineering Failure Analysis*, 109995.
- Çelik, A. (2026). Seismic resilience of masonry buildings with a novel arch-type hollow brick (ArchBrick): Multi-scale numerical assessment from unit to building level. *Engineering Structures*, 353, 122190.
- Dassault Systèmes Simulia Corp. (2020). *Abaqus analiz kullanıcısı kılavuzu* (Sürüm 2020). Dassault Systèmes.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2017). *TS EN 998-2: Kâgır harcı - Özellikler - Bölüm 2: Kâgır harcı*. TSE.
- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018)*. Resmî Gazete, 18 Mart 2018, Sayı: 30364 (Mükerrer).

KAPI VE PENCERE BOŞLUĞU İÇEREN KAYAR DOLGU DUVAR SİSTEMLERİ İÇİN SİSMİK OLARAK GÜVENLİ DETAYLANDIRMANIN GELİŞTİRİLMESİ

DEVELOPMENT OF SEISMICALLY SAFE DETAILING FOR SLIDING INFILL WALL SYSTEMS WITH DOOR AND WINDOW OPENINGS

İbrahim Serkan MISIR¹, Ali Cihan DEMİR², Çağrı ÇETİK³ ve Sadık Can GİRGIN⁴

ÖZET

Betonarme çerçeve sistemlerde kullanılan geleneksel harçlı dolgu duvarlar, deprem sırasında yapısal sistemle etkileşime girerek çeşitli düzensizliklere ve hasar mekanizmalarına neden olmaktadır. Bu çalışmada, bu olumsuzlukları azaltmaya yönelik geliştirilen kayar dolgu duvar sistemlerinin, kapı ve pencere boşluğu içeren konfigürasyonlardaki davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen deneysel program kapsamında, ince ve kalın duvar tiplerini temsil eden iki ayrı numune grubu üzerinde çalışılmıştır. İnce duvar grubunda (S7–S8 numuneleri) kapı boşluklu sistemler, kalın duvar grubunda (S9–S10 numuneleri) ise pencere boşluklu sistemler test edilmiştir. Numuneler, boşluk çevresindeki detaylandırma ve düşey kasa elemanlarının sürekliliği açısından farklılaştırılmıştır. Sonuçlar, uygun detaylandırma ile boşluklu kayar duvar sistemlerinin %3.5–4.0 aralığındaki ötelenme seviyelerine kadar düzlemiçi yönde güvenle ötelenebildiğini göstermektedir. Özellikle kasa elemanlarının düşey sürekliliğinin hem düzlemiçi hem düzlem dışı davranış üzerinde belirleyici olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kayar dolgu duvar, boşluklu duvar, deprem davranışı, düşük hasarlı sistemler

ABSTRACT

Traditional masonry infill walls in reinforced concrete frames may interact with the structural system during earthquakes, leading to various irregularities and damage mechanisms. To mitigate these adverse effects, this study experimentally investigates the behavior of sliding infill wall systems incorporating door and window openings. The experimental program, conducted at the Structural Engineering Laboratory of Dokuz Eylül University, includes two specimen groups representing thin (S7–S8) and thick (S9–S10) wall configurations. Door-opening systems were tested in the thin wall group, while window-opening systems were examined in the thick wall group. The specimens were differentiated in terms of detailing around the openings and the continuity of vertical framing elements. The results indicate that, with appropriate detailing, sliding infill wall systems with openings can sustain stable in-plane drift levels of 3.5–4.0%. In particular, the continuity of vertical framing elements is identified as a key parameter governing both in-plane and out-of-plane behavior.

Keywords: Sliding infill wall, wall with openings, seismic behavior, low-damage systems

¹ Prof. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, serkan.misir@deu.edu.tr

² Doktora Öğrencisi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst., İzmir, alicihan.demir@ogr.deu.edu.tr

³ Arş. Gör., Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, cagri.cetik@deu.edu.tr

⁴ Doç. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, sadik.girgin@deu.edu.tr

GİRİŞ

Geleneksel harçlı dolgu duvarlar, betonarme çerçeve sistemlerde yaygın olarak kullanılmakla birlikte, deprem etkisi altında yapısal sistemle etkileşime girerek beklenmeyen hasar mekanizmalarına yol açmaktadır. Bu etkileşim; kısa kolon etkisi, yumuşak kat oluşumu ve burulma düzensizlikleri gibi kritik problemlere neden olabilmektedir. Ayrıca dolgu duvarların düşük ötelenme seviyelerinde dahi yoğun düzlemci hasar alması ve ileri seviyelerde düzlem dışı devrilme riski önemli bir güvenlik sorunu oluşturmaktadır.

Bu problemlere çözüm olarak geliştirilen kayar duvar sistemleri, harçsız yatay kayma derzleri sayesinde yapısal çerçeve ile etkileşimi azaltarak daha uyumlu bir deformasyon davranışı sergilemektedir. Bu sistemlerde tuğlalar arasındaki kayma hareketi, dolgu duvarın panel davranışını ve dolayısıyla düzlemci rijitlik katkısını sınırlamaktadır.

Mevcut çalışmalar büyük ölçüde dolu duvar panellerine odaklanmış olup, boşluk içeren kayar duvar sisteminin davranışı sınırlı düzeyde incelenmiştir. Oysa kapı ve pencere boşlukları, duvar sürekliliğini bozarak yük aktarım mekanizmasını değiştirmekte ve yerel gerilme yığılmalarına neden olmaktadır. Bu çalışma, kapı ve pencere boşluğu içeren kayar duvar sistemlerinin davranışını deneysel olarak incelemeyi ve özellikle boşluk çevresindeki detaylandırmanın sistem performansı üzerindeki etkisini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

LİTERATÜR ÖZETİ

Dolgu duvarların çerçeve türü yapı sistemleri üzerinde genellikle baskın bir etkisi bulunmaktadır. Fardis ve Panagiotakos (1997), bu yapıların tasarımında dikkate alınan süneklik düzeyi ve yer ivmelerinin, yapı davranışı üzerinde dolgu duvar etkisine kıyasla görece daha sınırlı bir rol oynadığını belirtmiştir. Buna rağmen, bünyesinde barındırdığı belirsizlikler nedeniyle dolgu duvarlar rijitlik katkısı açısından çoğu zaman yapısal analiz ve tasarımda ihmal edilmektedir.

Depremlerde yumuşak kat mekanizmalarının çoğunlukla dolgu duvarların düzensiz dağılımından kaynaklandığı bilinmektedir. Bununla birlikte deneysel çalışmalar, düzenli dolgu duvar dağılımı durumunda dahi zayıf-yumuşak kat mekanizmasının oluşabildiğini göstermiştir (Dolšek ve Fajfar, 2001). Betonarme çerçeveye kıyasla yüksek düzlemci rijitliğe sahip olan dolgu duvarlar, göçmelerinin ardından ilgili katta rijitliğin ani değişimine ve katın diğer katlara göre yumuşamasına neden olmaktadır. ODTÜ Van depremi saha gözlem raporunda (METU-EERC, 2011), dolgu duvar hasarlarının yaygın olduğu, bazı durumlarda düzlem dışı devrilmelerin yapı davranışında ani değişimlere yol açtığı ve dolgu duvar-çerçeve etkileşiminin yeniden ele alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Kayar duvar türü (kilitli tuğla duvar), 2012 yılında deprem mühendisliği literatüründe yer bulmuş ve etkinliği deneysel olarak gösterilmiştir (Misir vd., 2012; Misir, 2014). Bu çalışmalarda, geleneksel ve kayar tuğla duvarlı betonarme çerçevelerin düzlemci davranışı yarı ölçekli numuneler üzerinde incelenmiştir. Harçsız yatay derzler sahip kayar tuğla duvarlar, geleneksel duvarlara kıyasla panel etkisini ve yanal rijitliği önemli ölçüde azaltarak duvar elemanlarının ağır hasar görmesini engellemiştir. Kayar duvar sistemi, çerçevenin yanal deformasyonuna uyum sağlayarak boş çerçeve davranışına yakın bir performans sergilemiş ve çerçevenin sünekliği üzerindeki olumsuz etkileri minimize etmiştir. Ayrıca ileri ötelenme seviyelerinde dahi bütünlüğünü koruyan duvar, düzlem dışı doğrultuda stabil kalabilmiştir. Kayar yüzeylerde alternatif malzemeler kullanılarak enerji tüketiminin artırılması ve ilave sönüm sağlanması da mümkündür.

Benzer prensibe dayanan çözümler farklı araştırmacılar tarafından da önerilmiştir. Preti vd. (2012), dolgu duvar-çerçeve etkileşimini azaltmak amacıyla yatay plastik derzler içeren duvar sistemleri önermiş ve deneysel sonuçlar bu yaklaşımın dolgu duvar hasarını azaltmada etkili olduğunu göstermiştir. Bu yaklaşım, daha sonra birçok deneysel ve analitik çalışmaya temel oluşturmuştur (Tasligedik, 2014; Dias vd., 2014; Preti vd., 2015; Totoev ve Harthy, 2016; Palios vd., 2017; Tasligedik ve Pampanin, 2017). Bununla birlikte, kayar duvar sistemlerinin pratik uygulamalarına yönelik detaylandırma konularında hâlen geliştirilmesi gereken yönler bulunmaktadır. Ayrıca geleneksel duvarların deprem davranışının iyileştirilmesi konusu da güncelliğini korumaktadır (De Risi vd., 2019; Halici vd., 2023; Demirel vd., 2023; Zhang vd., 2023).

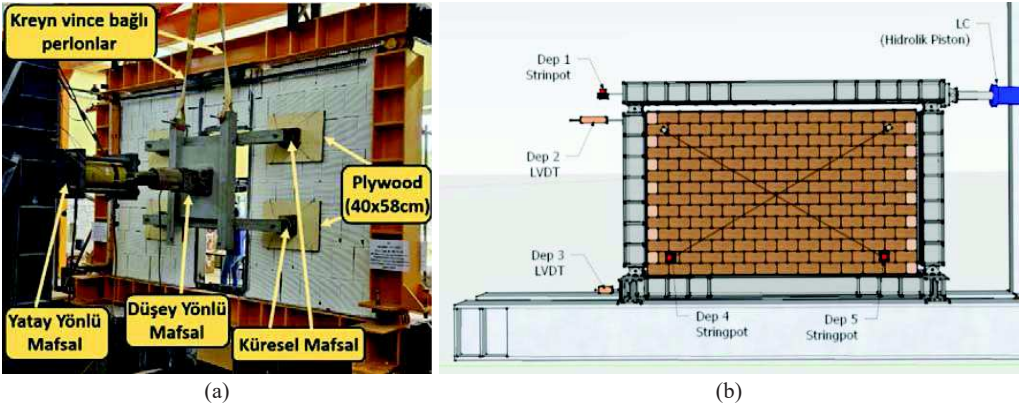
YÖNTEM

Bu çalışmada, boşluk içeren kayar dolgu duvar sistemlerinin davranışı, ardışık olarak geliştirilen numune tasarımları üzerinden deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel program, yalnızca performansın belirlenmesini değil, aynı zamanda önceki numunelerden elde edilen gözlemler doğrultusunda detay çözümlerinin geliştirilmesini hedefleyen iteratif bir yaklaşımla yürütülmüştür. Bu kapsamda her yeni numune, bir önceki numunede gözlenen davranışlara yanıt verecek şekilde yeniden tasarlanmıştır.

Duvar numuneleri 320 cm genişliğinde ve 200 cm yüksekliğinde mafsallı çelik çerçeve içerisinde test edilmiştir (Şekil 1). Numuneler tam ölçekli tuğlalarla harçsız olarak imal edilmiş, kayma yüzeyleri lamba-zıvana detayları ile oluşturulmuştur. Yükleme protokolü ACI 374.1-05 esas alınarak belirlenmiş ve artan genlikli tersinir ötelenmeler üçer tam çevrim halinde uygulanmıştır. Düzlemiçi yükler çerçeveye pozisyon kontrollü tepe yüklemesi olarak, düzlem dışı yükler ise duvar orta yüksekliğinden kuvvet kontrollü olarak uygulanmıştır (Şekil 2a). Deplasmanlar LVDT ve ipli deplasman ölçerler ile ölçülmüş, ayrıca işaretleyiciler yardımıyla elde edilen görüntülerin işlenmesiyle global deformasyonlar izlenmiştir.



Şekil 1. (a) Mafsallı Çelik Çerçevenin montajı, b) boş çerçevenin düzlemiçi kabul testleri



Şekil 2. a) Düzlemiçi ve düzlem dışı yükleme sisteminin genel görünümü, b) sensör yerleşimi

Çalışma kapsamında numuneler, duvar kalınlığı ve boşluk tipine göre iki ana grupta değerlendirilmiştir. 10 cm kalınlığındaki S7 ve S8 numuneleri kapı boşluklu ince duvar sistemlerini, 20 cm kalınlığındaki S9 ve S10 numuneleri ise pencere boşluklu kalın duvar sistemlerini temsil etmektedir. Bu ayrım, boşluk tipi ve duvar kalınlığının düzlemiçi ve düzlem dışı davranış üzerindeki etkilerinin

karşılaştırmalı olarak incelenmesine olanak sağlamaktadır. Düzlemiçi testler ince duvar grubunda %4, kalın duvar grubunda %3.5 ötelenme oranına kadar sürdürülmüş; düzlemdışı testler ise stabilite sınırına ulaşıncaya kadar devam ettirilmiştir.

İnce Duvar – Kapı Boşluklu Sistemler (S7 ve S8 numuneleri)

İnce duvar grubunu temsil eden S7 ve S8 numuneleri, 24 cm yüksekliğinde lamba-zıvanalı tuğlalar ve duvar bağları kullanılarak oluşturulmuş ve yatay kayma düzlemleri içerecek şekilde tasarlanmıştır (Şekil 3a). Referans sistem olarak hazırlanan S7 numunesi, duvar yüksekliği boyunca sekiz adet kayma düzlemi içermektedir. Kapı boşluğu çevresi mafsallı U profiller ile çerçevelenmiş, ancak düşey profiller duvar tepesine kadar devam ettirilmemiştir (Şekil 3b).



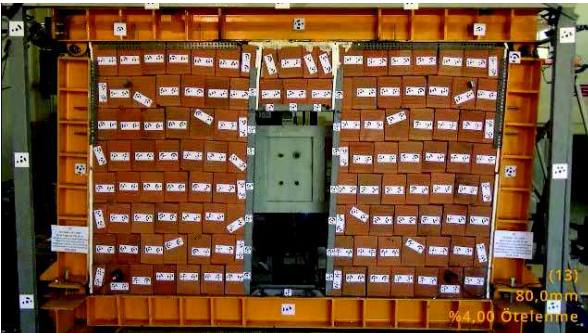
(a)



(b)

Şekil 3. a) S7 numunesindeki tuğlaların ve duvar bağının yerleşimi, b) kapı kasasının imalatı

S7 numunesi düzlemiçi testlerde kayma mekanizmasını başarıyla sergilemiş ve hasarsız kalmıştır. Ancak kapı kasasındaki düşey süreksizlik, düzlemdışı performansı sınırlamıştır. Bu durumu iyileştirmek amacıyla geliştirilen S8 numunesinde, kapı kasasının düşey elemanları duvar yüksekliği boyunca devam ettirilerek üst kirişe kadar uzatılmış ve boşluk çevresinde sürekli bir çerçeve oluşturulmuştur. S8 numunesi yalnızca düzlemdışı yüklemeye altında test edilmiştir. Bu düzenleme ile yük aktarım sürekliliği sağlanmış ve düzlemdışı stabilite belirgin şekilde iyileştirilmiştir. Uygulanan detaylandırma sayesinde her iki numune de hasarsız kalmış ve sistem performansı arzu edilen seviyeye ulaşmıştır.



(a)

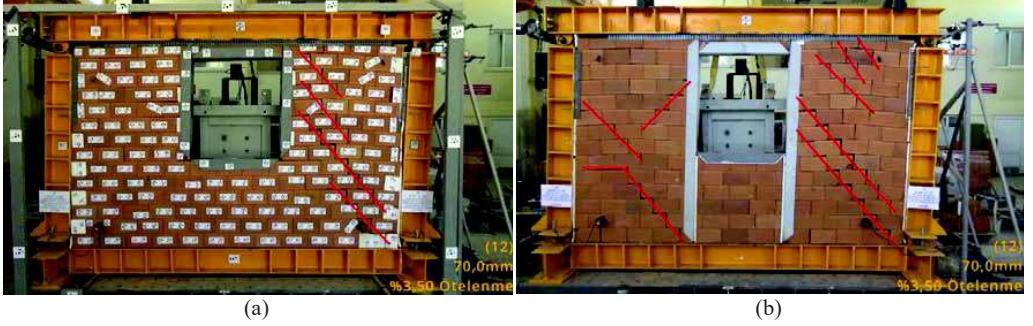


(b)

Şekil 4. a) S7'nin %4 düzlemiçi ötelenmesi ve b) S8'in düzlemdışı test sonrası genel görünümü

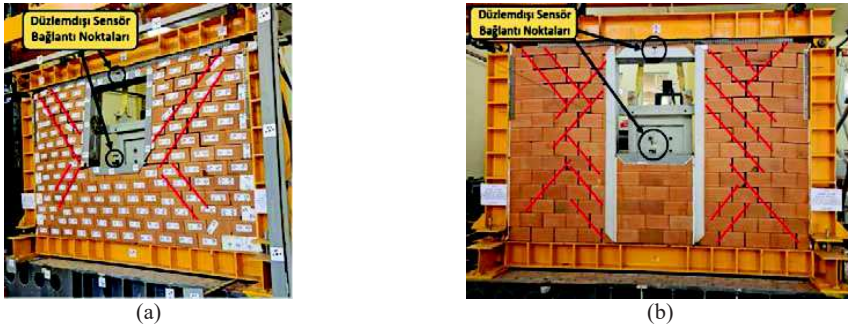
Kalın Duvar – Pencere Boşluklu Sistemler (S9 ve S10 numuneleri)

Kalın duvar grubunu temsil eden S9 ve S10 numuneleri, 15 cm yüksekliğinde lamba-zıvanalı tuğlalar kullanılarak ve duvar yüksekliği boyunca 13 yatay kayma düzlemi oluşturulacak şekilde tasarlanmış pencere boşluklu kayar duvar sistemleridir (Şekil 5a–b). S9 numunesinde duvar üstünde boşluk bırakılmış ve pencere kasası ayaksız olarak oluşturulmuştur. Bu numune düzlemiçi testlerde hedeflenen performansı sağlamış ve hasarsız kalmıştır. Ancak düzlemdışı yüklem sırasında boşluk çevresinde yük aktarımının sınırlı kaldığı ve pencere alt bölgesinde deformasyonların yoğunlaştığı gözlenmiştir. Ayrıca duvar üstündeki süreksizlik, düzlemdışı dayanım ve rijitliği olumsuz etkilemiştir.



Şekil 5. Düzlemiçi %3.5 ötelenme adımında; a) S9 ve (b) S10 numunelerinin genel görünüşleri

S10 numunesi bu zayıflıkları gidermek amacıyla geliştirilmiştir. Bu numunedeki pencere kasasının düşey elemanları duvar yüksekliği boyunca devam ettirilerek alt ve üst kirişlere mesnetlenmiş, böylece numunedeki her iki test sonucunda deformasyon dağılımı daha homojen hale getirilmiş, duvarın düzlemiçi direnci biraz daha azaltılmış, düzlemdışı yük kapasitesi ve rijitliği ise artırılmıştır. Bu iki numune birlikte değerlendirildiğinde, diğer uygulama detaylarının yanında pencere kasasının düşey sürekliliğinin hem düzlemiçi hem düzlemdışı davranış açısından kritik bir tasarım detayı olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6. Düzlemdışı yüklem sonunda; a) S9 ve b) S10 numunelerinin genel görünüşleri

SONUÇLAR

Bu çalışmada, boşluk içeren kayar dolgu duvar sistemlerinde detaylandırmanın sistem davranışı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, sistem performansının boşluk varlığından ziyade, boşluk çevresindeki çerçeve sürekliliği tarafından belirlendiğini açıkça ortaya koymaktadır. Hem ince (S7–S8) hem de kalın (S9–S10) duvar gruplarında, kasa elemanlarının düşey sürekliliğinin sağlanması; yük aktarım mekanizmasını iyileştirmiş, deformasyonların daha dengeli dağılmasını sağlamış ve sistem stabilitesini belirgin şekilde artırmıştır. Buna karşılık, düşey süreksizlik

içeren detaylarda yerel deformasyon yoğunlaşmaları gözlenmiş ve düzlemdışı stabilitenin sınırlı kaldığı tespit edilmiştir. Deneyler sonucunda, ince duvar grubunda %4'e, kalın duvar grubunda ise %3.5'e varan düzlemiçi ötelenme seviyelerine kadar stabil ve hasarsız davranış elde edilmiştir.

Sonuç olarak, kayar dolgu duvar sistemlerinde boşluk içeren uygulamalar için kritik tasarım parametresinin kasa elemanlarının düşey sürekliliği olduğu belirlenmiştir. Uygun detaylandırma ile bu sistemlerin, yüksek ötelenme seviyelerinde dahi düşük hasar potansiyeli ve yeterli düzlemdışı stabilite sağlayabildiği görülmüştür.

Teşekkür

Deneysel çalışmalar ADEP FBA-2023-3063 kodlu araştırma projesine dayanmaktadır. Proje çalışmalarına katkıları sebebiyle TUKDER (Tuğla ve Kiremit Sanayicileri Derneği) yönetimine teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- ACI 374.1-05, Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary, ACI Committee 374, ACI, Farmington Hills, Detroit, Michigan, 2005
- De Risi, M. T., Di Domenico, M., Ricci, P., Verderame, G. M., & Manfredi, G., Experimental investigation on the influence of the aspect ratio on the in-plane/out-of-plane interaction for masonry infills in RC frames. *Engineering Structures*, 189, 523-540, 2019
- Demirel, I. O., Binici, B., and Yakut, A., In-plane seismic performance of different infill wall systems in ductile reinforced concrete frames. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(7), 3433-3459, 2023.
- Dias, A. B., Da Porto, F., Fehling, E., Lourenço, P. B., Morandi, P., Vintzileou, E., & Yakut, A. (2014). Innovative systems for earthquake resistant masonry enclosures in RC buildings. In 9th International Masonry Conference (pp. 1-12)
- Dolšek, M., Fajfar, P., Soft Storey Effects in Uniformly Infilled Reinforced Concrete Frames, *J. Earthq. Eng.*, 5(1), 1-12, 2001
- Fardis, M.N., Panagiotakos, T.B., Seismic Design and Response of Bare and Masonry infilled Reinforced Concrete Buildings. Part II: Infilled Structures, *J. Earthq. Eng.*, 1(3), 475-503, 1997
- Halici, O. F., Demir, U., Zabbar, Y., and Ilki, A., Out-of-plane seismic performance of bed-joint reinforced Autoclaved Aerated Concrete (AAC) infill walls damaged under cyclic in-plane displacement reversals. *Engineering Structures*, 286, 116077, 2023
- METU-EERC, 23 Ekim 2011 Mw 7.2 Van Depremi Sismik ve Yapısal Hasara İlişkin Saha Gözlemleri, İnceleme, METU/EERC 2011-04, METU, Ankara, 2011
- Misir, I.S., Ozcelik, O., Girgin, S.C., Kahraman, S., Experimental Work on Seismic Behavior of Various Types of Masonry Infilled RC Frames, *Struct. Eng. Mech.*, 44(6), 763-774, 2012
- Misir, I.S. Potential Use of Locked Brick Infill Walls to Decrease Soft-Storey Formation in Frame Buildings, *J. Perform. Constr. Fac.*, ASCE, DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000633, 2014
- Palios, X., Fardis, M. N., Strepelias, E., & Bousias, S. N. (2017). Unbonded brickwork for the protection of infills from seismic damage. *Engineering Structures*, 131, 614-624
- Preti, M. Bettini, N., Plizzari, G., Infill Walls with Sliding Joints to Limit Infill-Frame Seismic Interaction: Large-Scale Experimental Test, *J. Earthq. Eng.*, 16(1), 125-141, 2012
- Preti, M., Migliorati, L., Giuriani, E. (2015). Experimental testing of engineered masonry infill walls for post-earthquake structural damage control. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(7), 2029-2049
- Tasligedik, A. S., Damage mitigation strategies for non-structural infill walls. Department of Civil and Natural Resources Engineering University of Canterbury Christchurch, New Zealand, 2014
- Tasligedik, A. S., Pampanin, S., Rocking cantilever clay brick infill wall panels: a novel low damage infill wall system. *Journal of Earthquake Engineering*, 21(7), 1023-1049, 2017
- Totoev, Y., and Harthy, A. A., Semi interlocking masonry as infill wall system for earthquake resistant buildings: a review. *The Journal of Engineering Research*, 13(1), 33-41, 2016
- TBDY-2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, Türkiye, 2018
- Zhang, M., Ding, K., Pang, L., and Ding, J., In-plane/out-of-plane seismic performance of masonry infilled RC frame structure made of nano-SiO₂ reinforced mortar: Experimental study. *Journal of Building Engineering*, 68, 106104, 2023

EKSENEL YÜK VE BURULMANIN BETONARME KOLONLARIN EĞİLME DAVRANIŞINA ETKİSİ*

THE EFFECT OF AXIAL LOAD AND TORSION ON THE FLEXURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS

Salih CENGİZ¹, Mehmet KAMANLI², Alptuğ ÜNAL³, Abdulkadir SOLAK⁴

ÖZET

Bu çalışmada, farklı eksenel yükler ve burulma etkileri altında 10 adet betonarme kolonun eğilme davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın parametreleri eksenel yük oranı, dönme/ötelenme oranı ve etriye aralığıdır. Deneyler sırasında kolonlarda meydana gelen hasarlar incelenmiş, plastik mafsal bölgeleri hasar dağılımı üzerinden yorumlanmıştır. Elde edilen veriler kullanılarak eksenel yük, eğilme ve burulma etkisindeki betonarme kolonların plastik mafsal uzunlukları tartışılmıştır. Kolonlarda meydana gelen plastik dönme değerlerinin TBDY-2018 ve ASCE-SEI-2017 plastik dönme limit değerleriyle karşılaştırılmasıyla burulma etkisinin önemi açıklanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, burulmanın betonarme kolonların eğilme kapasitesini ve plastik dönme limitini azalttığını, plastik mafsal uzunluğunu ve hasarı ise artırdığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme kolon, Burulma, Plastik mafsal

ABSTRACT

In this study, the bending behavior of 10 reinforced concrete columns under different axial loads and torsional effects was experimentally investigated. The parameters of the study were axial load ratio, rotation/displacement ratio, and stirrup spacing. During the experiments, the damage occurring in the columns was examined, and the plastic hinge regions were interpreted based on the distribution of damage. Using the obtained data, the plastic hinge lengths of reinforced concrete columns under the effects of axial load, bending, and torsion were discussed. The significance of the torsional effect was explained by comparing the plastic rotation values observed in the columns with the plastic rotation limit values specified in TBDY-2018 and ASCE-SEI-2017. The results of the study indicate that torsion reduces the bending capacity and plastic rotation limit of reinforced concrete columns, while increasing the plastic hinge length and damage.

Keywords: Reinforced concrete column, Torsion, Plastic hinge

¹ Öğr. Gör. Dr., Konya Teknik Üniversitesi, Konya, scengiz@ktun.edu.tr

² Prof. Dr., Konya Teknik Üniversitesi, Konya, mkamanli@ktun.edu.tr

³ Doç. Dr., Konya Teknik Üniversitesi, Konya, aunal@ktun.edu.tr

⁴ Arş. Gör., Konya Teknik Üniversitesi, Konya, abdulcadirsolak@ktun.edu.tr

* Bu çalışma Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü bünyesinde Prof. Dr. Mehmet KAMANLI danışmanlığında Öğr. Gör. Dr. Salih CENGİZ tarafından 2025 yılında tamamlanan "BETONARME KOLONLARDA EKSENEL YÜK ORANI VE BURULMA MOMENTİNİN, EĞİLME DAYANIMINA ETKİSİ" başlıklı doktora tezinden üretilmiştir.

GİRİŞ

Aktif tektonik kuşaklarda yer alan ülkeler hem can kaybına hem de mal hasarına neden olan ve yapı stoğunun güvenliğini doğrudan tehdit eden depremler yaşarlar. Bu nedenle, binaların depreme dayanıklı olarak tasarlanması ve bu amaçla yapısal elemanların (kolonlar, kirişler ve perde duvarlar gibi) sismik davranışının anlaşılması çok önemlidir.

Depremden etkilenen düzensiz yapısal sistemlere sahip betonarme binalarda, rijitlik ve kütle merkezinin yanlış hizalanması nedeniyle burulma meydana gelebilir. Burulma sonucunda, betonarme kolonlar rijitlik, süneklik ve taşıma kapasitesinde kayıp yaşayabilir. Bu koşullar binaların çökmesine yol açabilir. 6 Şubat 2023'te Kahramanmaraş/Türkiye'de meydana gelen depremde, çok sayıda binada burulma kaynaklı hasarlar tespit edilmiştir (Kamanlı vd., 2023).

Araştırmacılar, özellikle birleşik yük etkileri altında kolon davranışını modellemek için ampirik denklemler ve etkileşim şemaları önermişlerdir. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, farklı kesit tiplerine (dairesel, kare, T, L, X) ve gelişmiş malzemelere (çelik takviyeli beton, çelik boru dolgululu beton) odaklanmıştır. Wang ve Fan (2017), Deng ve ark. (2017), Wang ve ark. (2018), Chen ve ark. (2018), Nie ve ark. (2019), He ve Zhang (2020) ve Jiao ve ark. (2021) gibi araştırmacılar, kesit geometrisinin, donatı elemanlarının ve yük seviyelerinin burulma kapasitesi ve hasar modları üzerindeki kritik etkilerini ortaya çıkarmak için sonlu eleman analizleriyle desteklenen deneysel çalışmalar kullanmıştır. Attarchian ve ark. (2020), Deng ve ark. (2017), Prakash ve ark. (2010), Zhou ve ark. (2022), Solak (2023), Zhu ve ark. (2024) ve Cengiz (2025) birleşik eksenel yük-eğilme-burulma yüklemesi altındaki betonarme kolonların davranışını deneysel olarak araştırmışlardır. Sonuçlar, burulma etkileri altındaki betonarme kolonların eğilme kapasitesinin azaldığını ve hasar modunun kesme şeklinde meydana geldiğini göstermektedir.

Bu deneysel çalışmanın temel amacı, eksenel yük, eğilme ve burulma etkilerine maruz kalan betonarme kolonların davranışını incelemektir. Çalışmada kullanılan değişkenler eksenel yük oranı (n), dönme/yer değiştirme oranı (θ/Δ) ve etriye aralığıdır (s). Çalışmadan elde edilen verilere dayanarak, kolonlar için zarf eğrisi grafiği çizilmiştir. Elde edilen grafik incelenmiş ve elemanların davranışı ile ilgili yorumlar ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Deney sırasında kolonlarda meydana gelen hasar incelenmiş, plastik mafsallık bölgeleri ölçülmüştür. Kolonlarda meydana gelen plastik dönme değerlerinin TBDY-2018 ve ASCE-SEI-2017'deki plastik dönme limit değerleriyle karşılaştırılmasıyla burulma etkisinin önemi açıklanmıştır.

MALZEME VE YÖNTEM

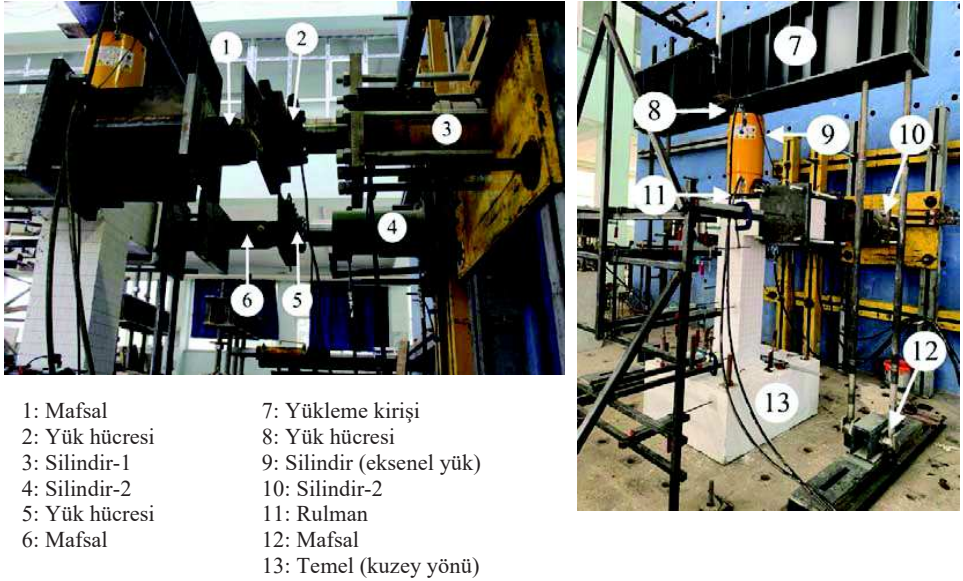
Betonarme kolonların eksenel yük-eğilme-burulma etkileri altındaki davranışını incelemek amacıyla 300x300 mm enkesitli, 1200 mm uzunluğunda betonarme kolonlar üretilmiştir. Numunelere ait özellikler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Deney elemanlarının özellikleri

Eleman	θ/Δ	n	Beton	Donatı Akma	Etriye (mm)
			Dayanımı (MPa)	Dayanımı (MPa)	
T1-N10-S8	1	0.10	24.24	400.36	Φ10/80
T1-N20-S8	1	0.20	25.81	400.36	
T1-N30-S8	1	0.30	24.17	398.02	
T1-N40-S8	1	0.40	25.33	410.75	
T2-N20-S8	2	0.20	25.04	400.36	
T0-N20-S8	0	0.20	23.98	398.02	
T0-N30-S8	0	0.30	26.07	400.36	Φ10/160
T1-N30-S16	1	0.30	28.29	410.75	

(θ : Dönme, Δ : Ötelenme oranı, n: Eksenel yük oranı)

Deneyde kullanılan numunelerdeki kırışlerin uç bölgelerine birer adet 500 kN basma ve çekme kapasiteli yük hücresi yerleştirilerek numunelere uygulanan yatay yükler ölçülmüştür. Deney elemanlarında yük hücrelerine bağlı mafsallı bir plaka düzeneği yapılarak numunelerin ötelenmesinde sistem zorlanmadan hareket etmiştir. Eksenel yük sisteminin deney elemanları ile birleştiği bölgede çelik bilyeler ve plakalar ile oluşturulmuş bir mekanizma yapılmıştır. Böylece ileri ve geri çevrimlerde ve burulma hareketinde sistemin hareket kabiliyeti artırılmıştır. Deney elemanlarının temel kısmında beton dökülmeden önce 8 adet silindir şeklinde boşluklar açılmıştır. Bu boşluklardan ve Konya Teknik Üniversitesi Deprem Araştırma Laboratuvarı döşemesinde bulunan deliklerin içinden transmisyon milleri geçirilerek deney elemanları laboratuvar döşemesine sabitlenmiştir. Böylece deney elemanlarının temel kısmı hareket etmeyerek ankastre mesnet özellikleri göstermiştir. Eksenel yük düzeneği için oluşturulan çelik temel kırışleri deney elemanının iki yanındaki laboratuvar döşemesinde bulunan delikler vasıtasıyla yere sabitlenmiştir. Çelik temel kırışi üzerine bir mafsal mekanizması oluşturulmuştur. Bu mafsallı sistem eksenel yük için oluşturulan çelik yükleme kırışine miller ile bağlanmıştır. Bu sayede ileri ve geri çevrimlerde eksenel yükün sabit kalması sağlanmıştır. Deney elemanı ile çelik yükleme kırışi arasında ise eksenel yük verebilmek amacıyla bir 1000 kN kapasiteli bir hidrolik silindir, verilen eksenel yük değerlerini anlık ölçebilmek amacıyla 1000 kN kapasiteli bir yük hücresi ve burulma esnasında deney elemanlarının rahatça hareket edebilmesi amacıyla bilyeli bir birleşim konulmuştur. Böylece deney elemanlarına hem yatay ötelenme hem eksenel yük hem de burulma momenti aynı anda verilebilmiştir. Deney düzeneğinin laboratuvardaki hali Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği

Elemanlara ilk olarak eksenel yük uygulanmış, daha sonra burulma momenti ile eğilme momenti aynı anda etki ettirilmiş ve elemanlar nihai ötelenme kapasitesine ulaşana kadar deneylere devam edilmiştir.

Kolonlarda eğilme durumu için ötelenme artışları ACI-374 (2005)'e göre seçilmiştir. Bu ötelenme artışı %0.5 olacak şekilde seçilmiştir. Her bir çevrim 3 kez tekrarlanmış ve kolonların eğilme momenti kapasitesinde %20 azalma meydana gelene kadar devam edilmiştir.

SONUÇ

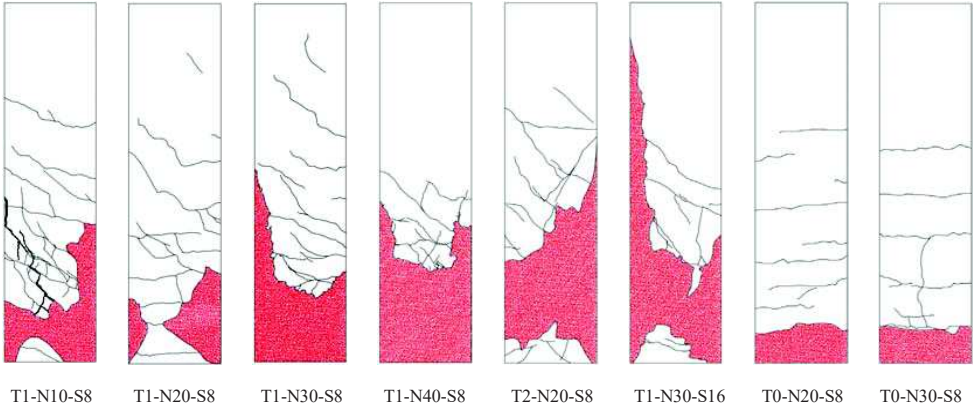
Deneylerden elde edilen veriler ışığında, elemanlara ait deney sonuçları Tablo 2’de sunulmuştur. En büyük eğilme kapasitesine sahip eleman T0-N30-S8 olurken, en az yük taşıma kapasitesine sahip eleman T2-N20-S8 olmuştur. Salt eğilme etkisindeki T0 tipi elemanların plastik mafsallık uzunluğu kesit uzunluğunun yarısı civarında oluşurken, burulma etkisinin olduğu T1 tipi numunelerde ise kesit uzunluğunun yaklaşık 2 katı kadar oluşmuştur. Burulma etkisinin çok daha baskın olduğu T2 tipi numunede oluşan plastik mafsallık ise kolon yüksekliği boyunca meydana gelmiştir (Şekil 2).

Burulma etkisindeki betonarme kolonlarda eksenel yük oranının eğilme kapasitesine etkisini incelemek için T1 serisi elemanlar karşılaştırılmıştır. Bu durumda en büyük eğilme kapasitesine sahip eleman T1-N20-S8 olurken, en az eğilme kapasitesine sahip eleman T1-N30-S8 olmuştur. T1-N10-S8 elemanı referans kabul edilerek eğilme kapasiteleri kıyaslanırsa, T1-N20-S8 %104, T1-N30-S8 %87, T1-N40-S8 %93 eğilme kapasitesine sahiptir. Genel olarak %20 eksenel yük oranına kadar eğilme kapasitesi artmış, %30’dan sonra azalmış, %40’ta ise tekrar artmıştır. Bu sonuçlar eksenel yükün, elemanların eğilme kapasitesi üzerinde doğrusal olmayan bir etkiye neden olduğunu ortaya koymaktadır.

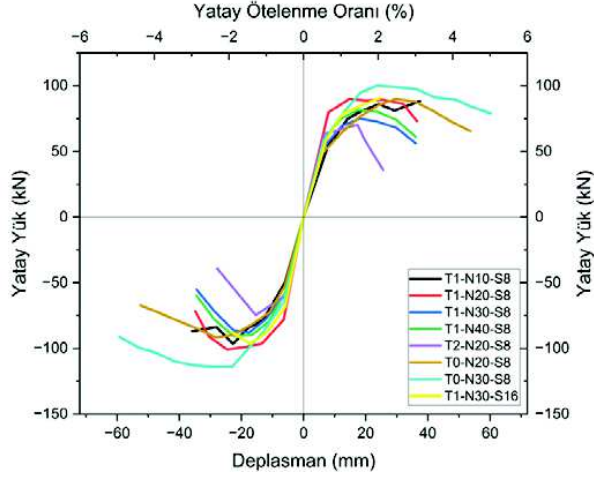
Elemanlarda etriye aralığının etkisini incelemek amacıyla T1-N30-S8 ve T1-N30-S16 elemanları karşılaştırılmıştır. Enine donatı aralığının 80 mm’den 160 mm’ye çıkmasıyla eğilme kapasitesinde yaklaşık %21’lik bir artış meydana gelmiştir. Bu durum enine donatı aralığı arttıkça elemanların eğilme kapasitesinin de artacağı anlamına gelmez. T1-N30-S8 elemanı deney boyunca sünek bir davranış sergilerken T1-N30-S16 elemanı kapasitesine ulaştığında ani bir şekilde kırılarak gevrek bir davranış sergilemiştir. Eğilme-burulma etkileşimindeki her iki elemandaki etriyeler, elemanlarda oluşan kesme gerilmelerini karşılamıştır. Etriye aralığı 160 mm olan T1-N30-S16 elemanındaki etriyeler, kapasitelerini sonuna kadar kullanmış ve pekleşme meydana gelene kadar üzerine yük almaya devam etmiştir. T1-N30-S16 elemanının etriyeleri gerilme-şekilde değiştirme kapasitesine ulaştığında kopmuş ve böylece eleman ani bir şekilde kırılarak göçmüştür. Etriye aralığı 80 mm olan T1-N30-S8 elemanındaki kesme gerilmeleri ise daha çok sayıda etriye tarafından karşılandığı için, etriyeler akma gerilmesinde kalmış ve herhangi bir kopma meydana gelmemiştir. Bu durum T1-N30-S8’in eğilme kapasitesinin, etriyelerin pekleşme bölgesine geçmemesinden dolayı T1-N30-S16’ya göre daha düşük olmasına neden olmuştur. Elemanlara ait zarf eğrisi grafiği Şekil 3’te verilmiştir.

Tablo 2. Elemanlara ait deney sonuçları

Numune	Yükleme Tipi	Burulma Momenti Kapasitesi (T) (kN.m)	Eğilme Momenti Kapasitesi (M) (kN.m)	Plastik Mafsallık (mm)
T1-N10-S8	Eğilme-Burulma	97.74	103.54	500
T1-N20-S8	Eğilme-Burulma	103.47	107.94	350
T1-N30-S8	Eğilme-Burulma	120.80	90.06	600
T1-N40-S8	Eğilme-Burulma	135.43	96.42	550
T2-N20-S8	Eğilme-Burulma	182.34	84.49	750
T1-N30-S16	Eğilme-Burulma	88.84	108.84	1200
T0-N20-S8	Salt Eğilme	-	107.97	150
T0-N30-S8	Salt Eğilme	-	118.78	200



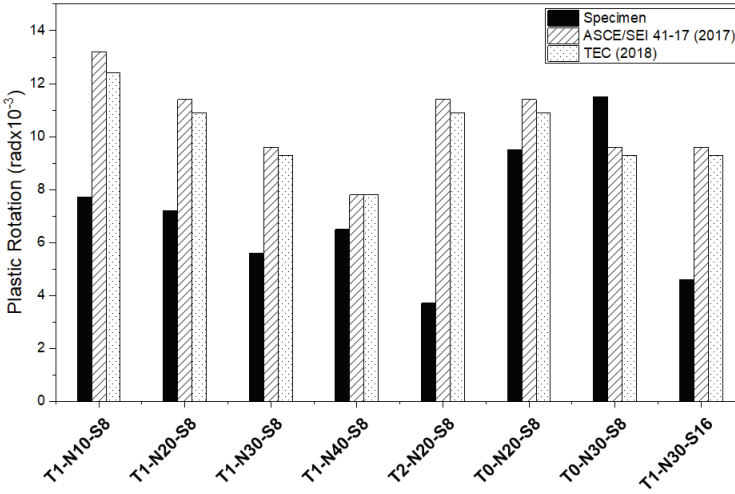
Şekil 2. Elemanlarda oluşan çatlak haritası (batı yönü)



Şekil 3. Elemanlara ait zarf eğrileri

Elemanlarda burulmanın etkisi T0-N20-S8, T1-N20-S8 ve T2-N20-S8 elemanlarının karşılaştırılmasıyla incelenmiştir. Salt eğilme etkisindeki T0-N20-S8'in eğilme kapasitesi ile T1-N20-S8'in eğilme kapasitesi neredeyse aynıdır. Fakat elemanların ötelenme oranları karşılaştırıldığında, T0-N20-S8'in ötelenme oranı T1-N20-S8'in ötelenme oranından %33 daha fazladır. Bu durum T0-N20-S8'in T1-N20-S8 ile yaklaşık aynı eğilme kapasitesine sahip olmasına rağmen daha sünek davranış sergilediğini göstermiştir. Burulmanın baskın olduğu T2-N20-S8 elemanı T0-N20-S8 ile kıyaslandığında, eğilme kapasitesinin yaklaşık %22 azaldığı görülmüştür. Bu durum, burulma etkisi arttıkça kolonların eğilme kapasitesinin azaldığını kanıtlamıştır.

Deneylerden elde edilen elemanların plastik dönme sınırları, TBDY (2018) ve ASCE-SEI (2017) tarafından hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları Şekil 4'te verilmiştir. Sonuçlar, T0-N30-S8 hariç tüm elemanların plastik dönme kapasitesinin her iki yönetmelik değerinin de oldukça altında olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Elemanlara ait plastik dönme limitlerinin karşılaştırılması

DeneySEL çalışmanın sonuçları, betonarme kolonların plastik dönme kapasitesinin burulma, eksenel yük ve enine donatı parametrelerinin karmaşık etkileşimine bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Bu üç parametrenin birleşik etkisi incelendiğinde, plastik dönme kapasitesinde gözlemlenen değişiklikler genel olarak doğrusal bir davranış sergilemiştir. Özellikle, burulmanın varlığı diğer parametrelerin etkilerini önemli ölçüde değiştirmiş ve kolon davranışını şekillendiren birincil faktör olarak ortaya çıkmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma, Konya Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından 221104022 no'lu proje ile desteklenmiştir.

Boduroğlu H, Taşkın B, Özdemir P, Sezen A, İlki A, Vatansever C, Durgun Y, Atahan H, Güney D (2000) "Damage Survey in the Town of Kaynaşlı After November 12th Düzce Earthquake", *Proceedings of the Seminar on Earthquake Hazards and Counter-Measurements for Existing Fragile Buildings*, Bucharest, Romania, 23-24 November, 237-244

KAYNAKLAR

- ASCE/SEI (2017). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, 7-16. Virginia, the U.S.A., American Society of Civil Engineers.
- Attarchian N, Attari N K A, Waezi Z. (2020) "Experimental Investigation of the Seismic Performance of Rectangular Reinforced Concrete Columns Subjected to Combined Flexure-torsion Cyclic Loading" *Journal of Earthquake Engineering*, 26(8), 3954-3976.
- Cengiz S (2025) "Betonarme Kolonlarda Eksenel Yük Oranı ve Burulma Momentinin, Eğilme Dayanımına Etkisi" [Doktora Tezi] Konya Teknik Üniversitesi, *Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya.
- Chen S, Peng W, Yan W (2018) "Experimental study on steel reinforced concrete columns subjected to combined bending-torsion cyclic loading" *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27(11), e1479.
- Deng J, Ma Z J, Liu A, Cao S, Zhang B (2017) "Seismic performance of reinforced concrete bridge columns subjected to combined stresses of compression, bending, shear, and torsion" *Journal of Bridge Engineering*, 22(11), 04017099.
- He Y, Zhang K (2020) "Finite element analysis of the reinforced concrete specialshaped columns under axial force and torsion" *Materials Science and Engineering*, 892, 012083.

- Jiao C, Liu Y, Wei B, Li J, Hu Z, Zhu G (2021) "Seismic performance of circular reinforced concrete columns subjected to compression, bending and torsion with low and moderate shear span ratio" *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 21(135).
- Kamanlı M, Döndüren M S, Çöğürçü M T, Kekeç B, Ünal A, Saydan M, Cengiz S, Lorasokkay M A, Özdemir S A, Solak A, Nakipoğlu A (2023) "Kahramanmaraş Earthquakes Hatay (Türkiye)" *Eğitim Yayınevi*, Konya.
- Nie X, Wang W, Wang Y H, Yu J, Hou C (2019) "Ultimate torsional capacity of steel tube confined reinforced concrete columns" *Journal of Constructional Steel Research*, 160, 207-222.
- Prakash S, Belarbi A, You Y M (2010) "Seismic performance of circular RC columns subjected to axial force, bending, and torsion with low and moderate shear" *Engineering Structures*, 32(1), 46-59.
- Solak A (2023) "Betonarme Kolonların Eksenel Yük ve Burulma Altındaki Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi" [Yüksek Lisans Tezi] Konya Teknik Üniversitesi, *Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya.
- TBDY (2018) "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği", *Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı*, Ankara.
- Wang D, Fan G (2017) "Influence of Torsion Effect on the Mechanical Characteristics of Reinforced Concrete Column" *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 269(1), 012036.
- Wang Y H, Wang W, Chen J (2018) "Seismic behavior of steel tube confined RC columns under compression-bending-torsion combined load" *Journal of Constructional Steel Research*, 143, 83-96.
- Zhou J, Chen Z, Zeng W, Liao H (2022) "Seismic behavior of steel reinforced concrete column with welded studs subjected to combined action of compression-bending-shear-torsion" *Engineering Structures*, 252, 113727.
- Zhu Z, Chen Y, Wu H, Ye P (2024) "Experimental investigation on shear capacity of steel reinforced concrete columns under combined torque" *Journal of Constructional Steel Research*, 213, 108345.

SÜRTÜNMELİ SARKAÇ TİPİ İZOLATÖRLERDE DEPLASMAN KAPASİTESİNİN AŞILMASI DURUMUNUN İNCELENMESİ

INVESTIGATION ON EXCEEDANCE OF DISPLACEMENT CAPACITY IN CURVED SURFACE SLIDERS

Ahmet VARIŞLI¹ ve Gökhan ÖZDEMİR²

ÖZET

Sismik izolasyonlu yapı tasarımında en öne çıkan parametre, sismik izolatörün maruz kalacağı maksimum deplasman değeridir. Bu nedenle, hem basitleştirilmiş hem de karmaşık hesap yöntemlerinde öncelikli olarak maksimum izolatör deplasmanı tahmin edilmeye çalışılır. Yürütülen analizlerde, kullanılan spektrum eğrilerinin ve izolatöre ait kuvvet-deplasman ilişkilerinin gerçeğe ne kadar yakın tanımlandığı büyük önem taşımaktadır. Çünkü, bu iki aşamada yapılacak herhangi bir hata, üretilen sismik izolatörün büyük bir deprem sırasında beklenmedik şekilde deplasman kapasitesinin aşılmasına neden olabilir. Bu çalışmanın amacı sürtünmeli sarkaç tipi izolatörlerin deplasman kapasitelerini aşan hareketlere maruz kalmaları durumunda nasıl davranacaklarını incelemektir. Yürütülecek deneysel faaliyetler kapsamında farklı geometrilere sahip gerçek boyutlarda üretilmiş üç adet çift sürtünme yüzeyli izolatör, deplasman kapasitelerini aşan hareketler altında test edilecektir. Her bir izolatör için deplasman aşım miktarları kayıcı çekirdek çaplarının %10'u, %20'si ve %30'u şeklinde tanımlanacaktır. Testler sırasında izolatör davranışını etkilediği bilinen normal gerilme (30, 45 ve 60 MPa) ve yükleme hızı (5, 25 ve 50 mm/s) da birer parametre olarak seçilmiştir. Elde edilecek deneysel sonuçlar ışığında deplasman kapasiteleri aşılan izolatörlerin kuvvet-deplasman ilişkilerindeki değişimler ortaya konulacaktır.

Anahtar Kelimeler: Sürtünmeli sarkaç tipi izolatör, Sismik izolasyon, Deplasman kapasitesinin aşımı.

ABSTRACT

The most critical parameter in the design of seismically isolated structures is the maximum displacement of the seismic isolator. For this reason, the primary focus of both simplified and advanced analyses methods is to estimate the maximum isolator displacement. In these analyses, it is of great importance that both the employed response spectra and the force-displacement relationships assigned to the isolator are defined as realistically as possible. Any inaccuracy in these two stages may result in exceedance of displacement capacity of seismic isolator unexpectedly during a major earthquake. The objective of this study is to investigate the change in behavior of curved surface sliders when subjected to motions that exceed their displacement capacities. In the experimental program, three full-scale double curved surface sliders with different geometries were tested under displacement histories exceeding their maximum displacement capacity. For each isolator, amplitudes of the exceeding displacements were defined as 10%, 20%, and 30% of the slider diameter. Further parameters known to be effective on the isolator behavior—namely, normal stress (30, 45, and 60 MPa) and loading velocity (5, 25, and 50 mm/s)—were also considered in the tests. Based on the experimental findings, variations in force-displacement relationships of isolators when subjected to displacement demands beyond their capacities will be identified.

Keywords: Curved surface slider, Seismic isolation, exceedance of displacement capacity.

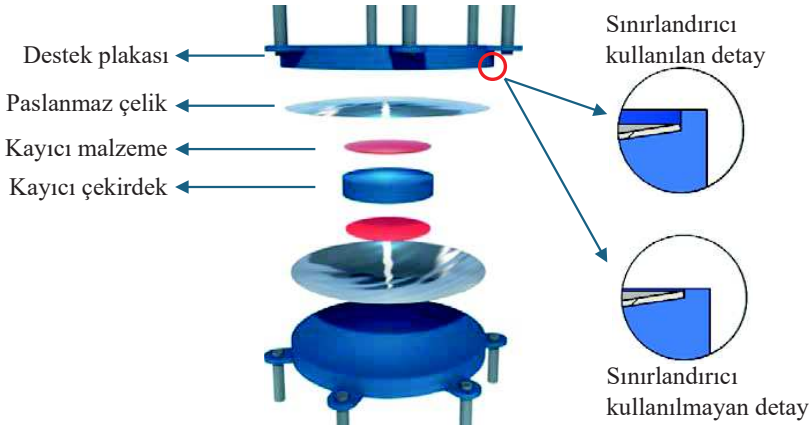
¹ Yüksek Lisans Adayı, TİS Deprem Teknolojileri, Ankara, ahmet.varisli@tis.com.tr

² Prof. Dr., Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, gokhan_ozdemir@eskisehir.edu.tr

GİRİŞ

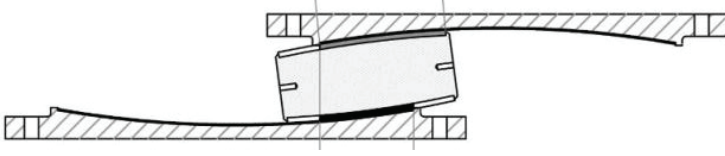
Sismik izolasyon teknolojisinin yalnızca kullanıldığı yapının taşıyıcı sistem elemanlarını değil, aynı zamanda yapı içeriğini de korumadaki başarısı, hem deneysel çalışmalar (Sato vd., 2011; Sasaki vd., 2012; Ryan vd., 2016) hem de yıkıcı depremler sonrasında yapılan saha gözlemleri (Kasai vd., 2013) ile doğrulanmıştır. Dünya’da ve Türkiye’de en yaygın olarak kullanılan sismik izolatör tiplerinden birisi olan sürtüneli sarkaç tipi izolatörler (SSTİ), literatürde Friction Pendulum veya Curved Surface Slider olarak adlandırılmaktadır (Zayas vd., 1990; Mokha vd., 1991; Braun, 2009). Bu izolatörlerin davranışları iki temel parametre ile temsil edilir: (i) eğrisel yüzeyin yarıçapı (R) ve (ii) kayıcı arayüzlerdeki sürtünme katsayısı(ları) (μ). SSTİ deprem etkisi altındaki davranışlarını inceleyen araştırmaların büyük bir kısmı sürtünme katsayısının normal gerilme, yükleme hızı, ortam sıcaklığı ve aşınma gibi yükleme koşullarına bağlı değişimini incelemiştir [Çavdar vd., 2025; 2024; 2023; 2022; Barone vd., 2019; Lomiento vd., 2013; Fenz ve Constantinou, 2006; Calvi vd., 2004; Mokha vd., 1990]. Ancak son yıllarda araştırmacılar farklı bir olguya odaklanmaya başlamıştır: izolatörün deplasman kapasitesinin aşılması. Bu eğilim, mühendislik camiasında yaygın olan, SSTİ için deplasman kapasitesinin aşılması durumunda sismik izolasyonlu yapıların göçebileceği yönündeki inanişe dayanmaktadır.

Literatürde SSTİ’de deplasman kapasitesinin aşılması konusu, deneysel olarak yalnızca çok az sayıda çalışma tarafından incelenmiştir (Becker vd., 2017; Bao vd., 2018; Furinghetti vd., 2021). Bu çalışmalar, izolatörde sınırlayıcı bir kenar (restraining rim) bulunup bulunmamasına göre iki gruba ayrılmaktadır (Şekil 1). Bao vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen deneyler, SSTİ’in dış çeperinde kullanılan bu tür sınırlayıcı kenarların izolatör deplasmanını sınırlamada etkili olduğunu; ancak bunun (i) çarpma etkisi nedeniyle kesme kuvvetlerinde önemli artışlara (5 kata kadar) ve (ii) kayıcı arayüzde temas kaybına yol açan kaldırma (uplift) etkisine neden olduğunu göstermiştir.



Şekil 1. Sürtüneli sarkaç tipi izolatör bileşenleri.

Öte yandan, sınırlayıcı kenar bulunmayan sistemlerde, kayıcı elemanın izolatör deplasman kapasitesini aşarak üst ve alt plakaların kenarlarından kısmen dışarı çıkması (Şekil 2) veya tamamen izolatörden ayrılarak işlevini yitirmesi endişesi bulunmaktadır. Bu bağlamda, Furinghetti vd. (2021) tarafından yürütülen deneysel çalışmada, SSTİ’in histeretik davranışları deplasman kapasitesini aşan hareketlere maruz kalması durumunda incelenmiştir. Yazarlar tarafından yürütülen deneyler, 2,5 mm/s sabit yükleme hızında ve izolatör kapasitesini %50 aşan deplasman değerleri için gerçekleştirilmiştir. Uygulanan deplasman geçmişi, itme-çekme şeklinde yarım çevrimden oluşurken, izolatör üzerindeki normal gerilme 45 MPa olarak seçilmiştir. Elde edilen bulgular, sınırlayıcı kenar bulunmayan SSTİ’in deplasman kapasiteleri aşıldığında dahi işlevlerini kaybetmeden çalışabildiğini açıkça ortaya koymuştur. Diğer taraftan, söz konusu çalışma önemli bulgular sunmakla birlikte; (i) normal gerilme, (ii) yükleme hızı, (iii) deplasman aşım miktarı ve (iv) kayıcı çekirdek çapı gibi parametrelerin etkilerinin izolatörün deplasman kapasitesinin aşımı durumunda incelenmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

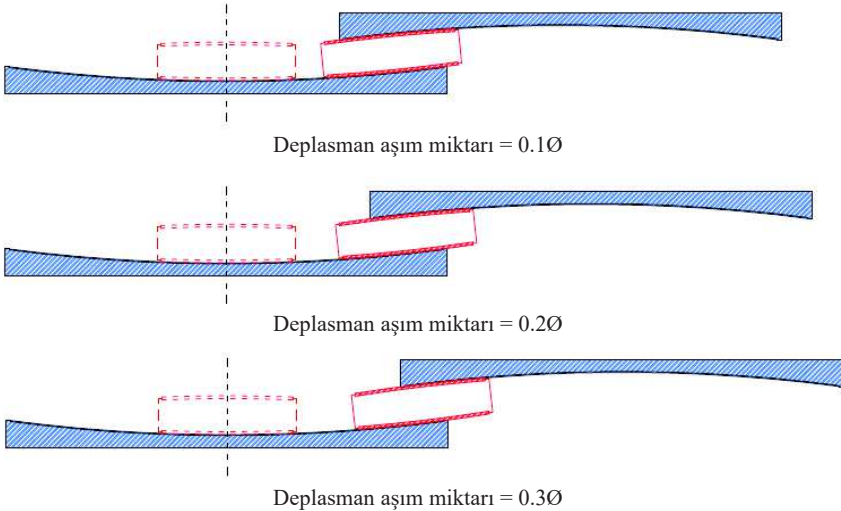


Şekil 2. İzolatörün deplasman kapasitesinin aşılması durumu.

Bu çalışmada farklı normal gerilme seviyeleri, yüklenme hızları, deplasman aşım miktarları ve kayıcı çekirdek çapları dikkate alınarak, deplasman kapasitesini aşan hareketler altında SSTİ'in kuvvet-deplasman ilişkilerindeki değişimlerin belirlenmesine yönelik kapsamlı bir deneysel araştırma yürütülecektir. Deplasman kapasitesinin aşılması sonucu kayıcı malzemede oluşabilecek kümülatif hasarın etkisini tespit etmek amacıyla, test numunelerine uygulanan deplasman geçmişi yarım çevrim yerine bir tam çevrim sinüs hareketinden oluşacaktır.

YÜKLEME PROTOKOLÜ VE DENEY DÜZENEGİ

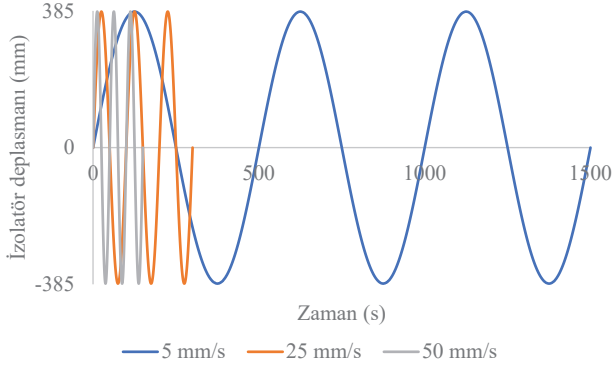
Deplasman kontrollü olarak gerçekleştirilecek testler esnasında izolatörlere tatbik edilecek yatay deplasmanın mertebesi, cihazların deplasman kapasitesinin (D_{max}) ve kayıcı çekirdek çapının (\emptyset) bir fonksiyonu olarak belirlenmiş ve üç farklı aşılma durumu için ($D_{max} + 0.1\emptyset$), ($D_{max} + 0.2\emptyset$) ve ($D_{max} + 0.3\emptyset$) şeklinde tanımlanmıştır. Buna göre, deplasman aşım miktarları kayıcı çekirdek çaplarının %10'u, %20'si ve %30'u olarak seçilmiştir. Testlerde kullanılacak ilk izolatörün (Tip 1) kayıcı çekirdek çapı 250 mm'dir. Bu cihazda, üç farklı aşılma durumu için karşılık gelen yatay deplasman değerleri; 385, 410 ve 435 mm'dir. İkinci cihazın (Tip 2) kayıcı ara eleman çapı ise 360 mm olup 396, 432 ve 468 mm yatay deplasmanlar için testler tekrarlanacaktır. Son olarak, kayıcı ara eleman çapı 460 mm olan üçüncü cihazın (Tip 3) testleri 406, 452 ve 498 mm yatay deplasmanlar altında gerçekleştirilecektir. Deplasman kapasitesindeki farklı aşım miktarlarının temsili olarak gösterildiği çizimler Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Farklı deplasman aşım miktarları için izolatör konfigürasyonları.

Deplasman aşımı olması durumunda izolatörlerin kuvvet-deplasman ilişkilerinin yüklenme hızına olan duyarlılığını belirleyebilmek için testlerde 5, 25 ve 50 mm/s olmak üzere üç farklı yüklenme hızı uygulanmıştır. Temsili olarak, Tip 1 izolatör özelinde, farklı yüklenme hızları ve %10 deplasman aşımı için hazırlanan deplasman-zaman grafikleri Şekil 4'te sunulmuştur. Testler sırasında dikkate alınacak bir diğer parametre de izolatör üzerine uygulanan düşey yükü temsil etmek üzere normal

gerime seviyesidir. Buna göre, test edilen farklı tiplerdeki izolatöre uygulanacak düşey yük değerleri 30, 45 ve 60 MPa normal gerilmeler oluşturacak şekilde seçilmiştir. Yürütülecek deneysel çalışmaya ait yükleme protokolü Tablo 1’de gösterilmiştir.



Şekil 4. Farklı yükleme hızları için deplasman-zaman grafikleri.

Tablo 1. Yükleme protokolü.

Test No	Cihaz No	Aşılma Miktarı (mm)	Düşey Yük (kN)	Maksimum Hız (mm/s)
1	Tip 1	0.1Ø, 0.2Ø, 0.3Ø	1246, 1869, 2492	5, 25, 50
2	Tip 2	0.1Ø, 0.2Ø, 0.3Ø	2724, 4085, 5448	5, 25, 50
3	Tip 3	0.1Ø, 0.2Ø, 0.3Ø	4562, 6842, 9123	5, 25, 50

Bu çalışma kapsamında yapılması planlanan sismik izolatör testleri TİCEM laboratuvarında gerçekleştirilecektir. Şekil 5’te gösterilen sismik izolatör test cihazı düşeyde 15.000 kN, yatayda 1500 kN kuvvet uygulama kapasitesine sahiptir. Yatay doğrultuda uygulanan hareketin maksimum değeri ve hızı ise sırasıyla ± 500 mm ve 100 mm/s’dir.



Şekil 5. Sismik izolatör test cihazı.

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında çift sürtünme yüzeyle sismik izolatörlerde deplasman kapasitesinin aşılması durumunda izolatör davranışında oluşacak değişim incelenecektir. Bunun için gerçek boyutlarda üretilen üç adet sürtünmeli sarkaç tipi izolatör farklı deplasman aşım miktarları göz önünde bulundurularak çevrimsel hareketlere maruz bırakılacaktır. Yürütülecek testler deplasman kontrollü olup sinüs dalgası şeklindeki hareketler altında test edilecek sismik izolatörlerin kuvvet-deplasman ilişkileri incelenecektir. Testler sırasında dikkate alınan deplasman aşım miktarları, izolatörlerin kayıcı çekirdek çaplarının %10'u, %20'si ve %30'u olacak şekilde belirlenmiştir. Deplasman kapasiteleri aşılan sismik izolatörlerin normal gerilme ve yükleme hızı değerlerinden nasıl etkilendiğini belirleyebilmek için 30, 45 ve 60 MPa normal gerilme değerlerinin yanı sıra 5, 25 ve 50 mm/s yükleme hızları da yükleme protokolünde dikkate alınacaktır. Elde edilecek deneysel veri ışığında öncelikle deplasman aşımına uğrayan izolatörlerin görevini yerine getirip getiremediği belirlenecektir. Eğer herhangi bir hasar durumu söz konusu olmaz ise, kuvvet-deplasman ilişkilerinin deplasman aşımına bağlı olarak nasıl değiştiği ve modellenebilir olup olmadığı üzerinde durulacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 124M663 numaralı proje ile desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Bao Y, Becker TC, Sone T, Hamaguchi H (2018) "Experimental study of the effect of restraining rim design on the extreme behavior of pendulum sliding bearings" *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 47(4):906-924.
- Barone S, Calvi GM, Pavese A (2019) "Experimental dynamic response of spherical friction-based isolation devices" *Journal of Earthquake Engineering*, 23(9):1465-1484.
- Becker TC, Bao Y, Mahin SA (2017) "Extreme behavior in a triple friction pendulum isolated frame" *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 46(15):2683-2698.
- Braun C (2009) "The sliding isolation pendulum – an improved recentring bridge bearing," *Steel Construction*, 2(3):203-206.
- Calvi G, Ceresa P, Casarotti C, Bolognini D, Auricchio F (2004) "Effects of axial force variation in the seismic response of bridges isolated with friction pendulum systems" *Journal of Earthquake Engineering*, 8(Special Issue 1):187.
- Cavdar E, Ozdemir G, Ozcamur U (2022) "Experimental investigation on hysteretic behavior of a double friction pendulum and frictional heating," *Proceedings of the 17th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, Torino, İtalya, 11-16 September.
- Çavdar E, Özdemir G, Bruschi E, Quaglini V, Özcamur U (2025) "Dynamic Friction Coefficient of Sliding Isolators at Different Low Temperatures and Exposure Times" *Journal of Earthquake Engineering*, 29(12):2512-2531.
- Çavdar E, Özdemir G, Quaglini V, Bruschi E, Özcamur U (2024) "Friction coefficient of sliding isolators in icing conditions" *Structures*, 63(106369).
- Çavdar E, Quaglini V, Özdemir G, Karuk V, Bruschi E, Özcamur U (2023) "Experimental investigation of wear effects on the friction coefficient of a curved surface slider: comparison of small-and full-scale tests" *Journal of Earthquake Engineering*, 27(16):4575-4594.
- Fenz D ve Constantinou M (2006) "Behaviour of the double concave friction pendulum bearing" *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35(11):1403-1424.
- Furinghetti M, Yang T, Calvi PM, Pavese A (2021) "Experimental evaluation of extra-stroke displacement capacity for Curved Surface Slider devices" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 146(106752).
- Kasai K, Mita A, Kitamura H, Matsuda K, Morgan TA, Taylor AW (2013) "Performance of seismic protection technologies during the 2011 Tohoku-Oki earthquake" *Earthquake Spectra*, 29(1).
- Lomiento G, Bonessio N, Benzoni G (2013) "Friction model for sliding bearings under seismic excitation" *Journal of Earthquake Engineering*, 17(8):1162-1191.
- Mokha A, Constantinou M, Reinhorn A, Zayas V (1991) "Experimental study of friction-pendulum isolation system," *Journal of Structural Engineering*, 117(4):1201-1217.

- Mokha A, Constantinou M, Reinhorn A (1990) “Teflon bearings in base isolation I: Testing” *Journal of Structural Engineering*, 116(2):438-454.
- Ryan KL, Soroushian S, Maragakis E, Sato E, Sasaki T, Okazaki T (2016) “Seismic simulation of an integrated ceiling-partition wall-piping system at E-Defense. I: Three-dimensional structural response and base isolation” *Journal of Structural Engineering*, 142(2).
- Sato E, Furukawa S, Kakehi A, Nakashima M (2011) “Full-scale shaking table test for examination of safety and functionality of base-isolated medical facilities” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 40(13):1435-1453.
- Sasaki T, Sato E, Ryan K, Okazaki T, Mahin S, Kajiwara K (2012) “NEES/E-defense base-isolation tests: effectiveness of friction pendulum and lead-rubber bearing systems” *Proceedings of the 15th World Conference of Earthquake Engineering*, Lizbon, Portekiz, 24-28 September.
- Zayas V, Low S, Mahin S (1990) “A simple pendulum technique for achieving seismic isolation” *Earthquake Spectra*, 6(2):317-333.

BIÇAK PLAKALI BİRLEŞİMLERDE FARKLI PARAMETRELERİN YORULMA PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

EVALUATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT PARAMETERS ON FATIGUE PERFORMANCE IN KNIFE-PLATE CONNECTIONS

Elif AYDIN¹ ve Fatih ALEMDAR²

ÖZET

Çelik yapılarda yorulma hasarları, öngörülemez doğası ve ani kırılmalara yol açma potansiyeli nedeniyle yapısal güvenliği tehdit eden en kritik limit durumlardan biridir. Bu çalışma kapsamında yapılacak 24 adet deney ile birlikte, yüksek gerilme konsantrasyonuna sahip bıçak plakalı birleşimlerin yorulma performansı; kaynak uzunluğu, kaynak kalınlığı, profil kesiti ve birleşim tipi gibi parametreler için belirlenmeye çalışılacaktır. Testler neticesinde elde edilen veriler ile S-N eğrileri oluşturularak, bu detayların standartlardaki mevcut yorulma kategorileri ile uyumunun belirlenmesi planlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bıçak plakalı birleşimler, Yorulma, S-N eğrileri

ABSTRACT

Fatigue damage in steel structures is one of the most critical limit conditions affecting structural safety due to its unpredictable nature and potential to cause sudden failure. Through 24 experiments to be conducted as part of this study, the fatigue performance of knife plate connections with high stress concentrations will be investigated for parameters such as weld length, weld thickness, cross-sectional profile, and connection type. Using the data obtained from the tests, S-N curves will be plotted in order to determine the compatibility of these details with the existing fatigue categories in the standards.

Keywords: Knife plate connections, Fatigue, S-N curves

GİRİŞ

Çelik yapılarda yorulma, tekrarlı yüklemeler altında malzemenin akma dayanımının çok altındaki gerilmelerde dahi meydana gelebilen, önceden tahmini güç ve ani kırılmalara yol açan kritik bir limit durumdur. Yapısal süreksizlikler ve kaynak noktalarında yoğunlaşan gerilme yığılımları, mikroskobik çatlak ilerlemesini tetikleyerek sistemin servis ömrünü doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, bıçak plakalı birleşimler gibi hassas detayların yorulma performansının S-N eğrileriyle analizi, güvenli tasarım ve işletme ömrünün belirlenebilmesi için hayati önem taşımaktadır.

Bıçak plakalı birleşimlerde farklı kaynak kalınlığı, farklı kaynak uzunluğu, farklı gerilim azaltma boşluk uzunluğu, profil kesitinin değişken olması gibi parametrelerin çekme kapasitesine olan etkisi deneysel olarak araştırılmıştır (Aydın ve Alemdar, 2025). Yorulma davranışı üzerinde farklı kaynak uzunluğunun araştırıldığı deneysel çalışmalar yapılmış ve farklı kaynak kalınlıklarının çekme kapasitesine olan etkisi sonlu elemanlar analizleri ile belirlenmiştir (Salman, 2019). Plaka ve profil kalınlığı değişkenlerinin bıçak plakalı birleşimlerin yorulma davranışı üzerindeki etkisi

¹ Öğr.Gör.Dr., İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul, elif.aydin@iku.edu.tr

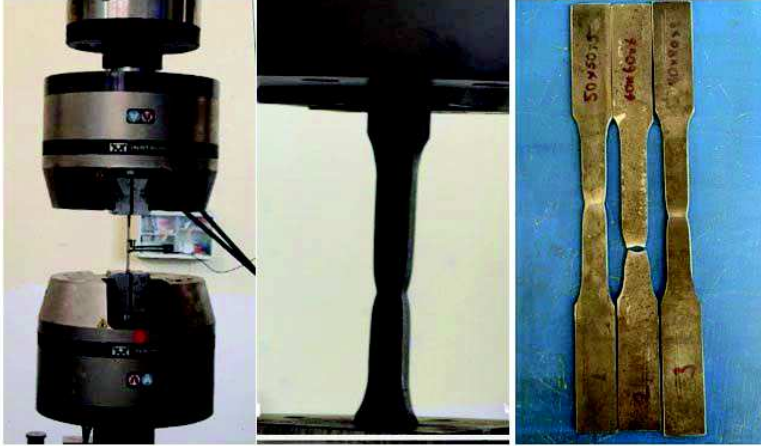
² Doç. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, falemdar@yildiz.edu.tr

araştırılmıştır (Liu vd., 2006). L profilden teşkil edilmiş çapraz çerçeve sistemlerde tek tip kaynak uzunluğuna bağlı yorulma performans değerlendirmesi için deneyler gerçekleştirilmiştir (Battistini, 2014). Yine çapraz çerçeve sistemlerdeki birleşimlerde kaynağın eşit ve eşit olmayan uzunluklarda uygulandığı durumlar için yorulma deneyleri yapılmıştır (Mc Donald ve Frank, 2009). Kaynak kenarı yarıçapı, malzeme sabitleri ve gerilme yoğunluğu faktörü gibi parametrelerin değişimini dikkate aldıkları çelik kiriş detaylarından oluşan köprü üzerinde hesaplamalar yaparak çatlak genişliği ve yorulma ömrü arasında ilişki kurmaya çalışılmıştır (Putri vd., 2022). Detaylı literatür araştırması neticesinde çalışmaya konu olan birleşimler için belirtilen parametrelerin yorulma performansı üzerindeki etkisi konusunun eksik kaldığı görülerek bu çalışmanın yapılmasına karar verilmiştir.

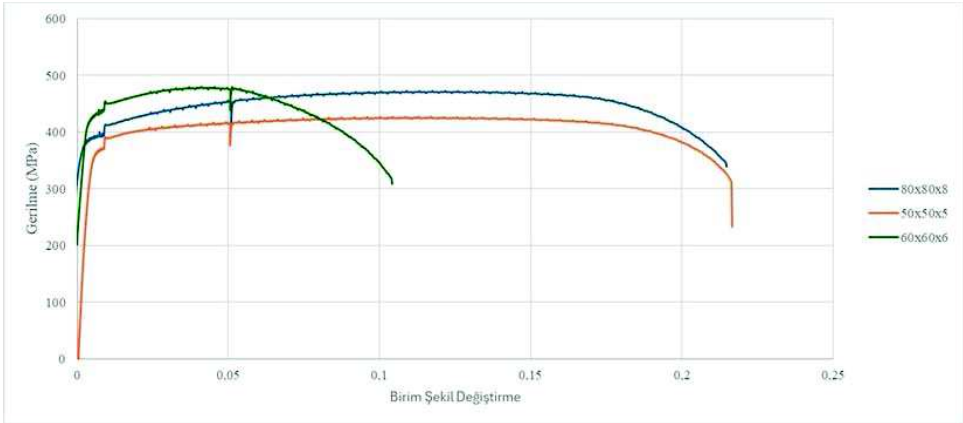
DENEYSSEL ÇALIŞMA

Çekme Deneyleri

Malzeme mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için ASTM-A370 standardına göre profillerden numuneler alınarak Şekil 1'de görüldüğü üzere teste tabi tutulmuştur (ASTM, 2007). Şekil 2'de 3 farklı kesite ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri verilmiştir. 24 adet numune üzerinde çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kapasite değerleri çekme performansını göstermesinin yanı sıra yorulma deneylerinde gerilme aralığının belirlenmesi için de kullanılacaktır.



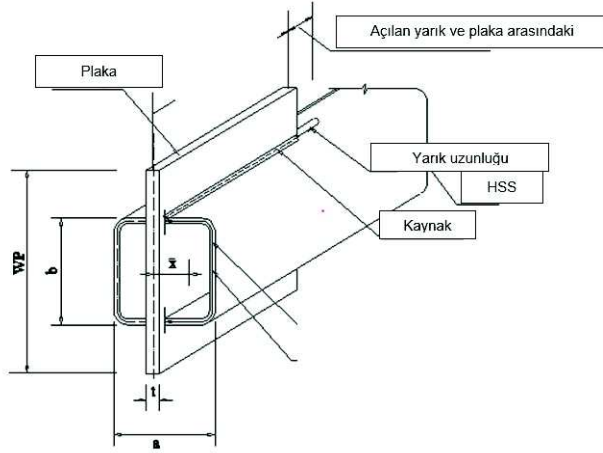
Şekil 1. Malzeme testleri



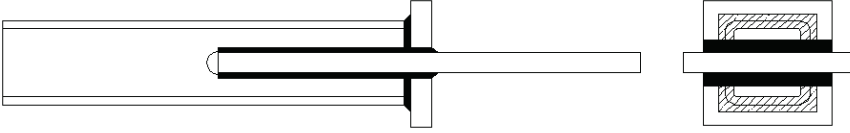
Şekil 2. Farklı kesitli profillere ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri

Yorulma Deneyleri

HSS profilde yarık açılması ardından bu yarığa plakanın kaynaklar yardımı ile bağlantısının sağlanması ile 24 adet numune Şekil 3'te olduğu gibi hazırlanmıştır. Deney parametrelerinden biri kapak plakalı bağlantıyı temsil eden Şekil 4'te gösterilen tip II birleşimlerdir.



Şekil 3. Bıçak plakalı birleşimler (Birleşim Tip I)



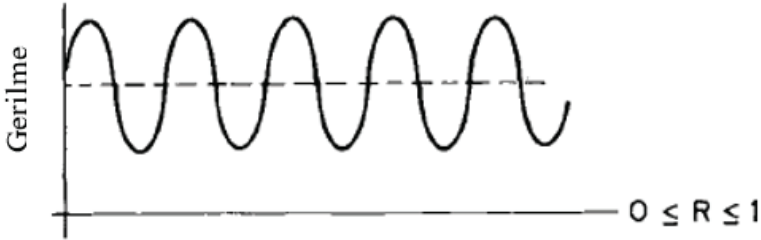
Şekil 4. Kapak plakalı birleşimler (Birleşim Tip II)

Statik, dinamik ve yorulma gibi farklı türde deneylerin yapılabildiği (Instron, 2001) Şekil 5'te görülen INSTRON 8803 marka/model test cihazında deneyler gerçekleştirilecektir.



Şekil 5. INSTRON Test Cihazı

Farklı kaynak uzunluğu, farklı kaynak kalınlığı, profil kesit değişkeni ve farklı birleşim tipi için yapılacak olan yorulma deneylerinde aksel yüklemeye altında sabit genlikli Şekil 6'da görüldüğü gibi yüklemenin yalnızca çekme bölgesinde kaldığı durum dikkate alınarak gerilme oranı $R=0.1$ olacak şekilde (Borsom ve Rolfe, 1999) maksimum ve minimum değerler hesaplanacaktır. Bunlar çekme deneylerinden elde edilen kapasite yükünün %60'ına denk gelen bir değer olarak seçilerek 2 Hz olarak uygulanması planlanmaktadır.



Şekil 6. Çekme yüklemesi için gerilme oranı (Borsom ve Rolfe, 1999)

Yorulma deney aşaması için numunelere ait detaylar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Yorulma testine ait numune bilgileri

Deney Adı	Numune Sayısı	HSS Kesit
Birleşim Tip 1-Kaynak Uzunluğu Araştırması	9	50x5
Birleşim Tip 1-Profil Kesiti	6	50x5, 60x6, 80x8
Birleşim Tip 1-Kaynak Kalınlığı	6	50x5
Birleşim Tip 2	3	50x5

Deney çalışması kapsamında, tekrarlı yüklemeye maruz bırakılan her bir numune için çatlak başlangıç ve ilerleme evreleri penetrant sıvı kullanılarak hassasiyetle izlenecek ve çatlak uzunlukları ölçülecektir. Bu süreçte kaydedilen ilk çatlak çevrim sayısı ve nihai hasar çevrim sayısı verileri, çalışmanın temel çıktısı olan S-N eğrilerinin oluşturulmasında kullanılacaktır.

Farklı kesit ve kaynak geometrilerinin (kalınlık, uzunluk) yorulma direnci üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, elde edilen bu çevrim sayıları uygulanan sabit gerilme aralığı ile ilişkilendirilerek S-N eğrileri grafiksel olarak ifade edilecektir. Böylelikle, bıçak plakalı birleşimlerin yorulma ömrü karakteristikleri sayısal olarak ortaya konulacak ve mevcut tasarım standartlarındaki (AASHTO, 2007) yorulma kategorileriyle kıyaslanarak literatüre bir katkı sağlanmaya çalışılacaktır.

SONUÇ

Yapılması planlanan deneyler sonucunda, bıçak plakalı birleşimlerin yorulma ömrünü etkileyen başlıca parametrelerin belirlenmesi hedeflenmektedir. Bu sayede, mevcut ve gelecekte tasarlanacak çelik yapı birleşim detaylarının yorulma performansları daha gerçekçi bir bakış açısıyla değerlendirilebilecek, ayrıca tasarım aşamasında yorulmadan kaynaklanabilecek hasarların oluşum mekanizmaları ortaya konulabilecektir.

Mevcut yönetmeliklerde yorulma ömrüne ilişkin çeşitli tanımlamalar ve hesap yöntemleri yer almakla birlikte, bu çalışmada incelenen parametrelerin yorulma davranışı üzerindeki etkilerine dair detaylı bilgi bulunmamaktadır. Bu kapsamda, gerçekleştirilecek deneylerden elde edilecek veriler, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar Yönetmeliği (Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar Yönetmeliği, 2018) ile AISC (AISC/360, 2016) şartnamelerine göre elde edilen hesap sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

Özellikle elastik sınırların altında meydana gelebilen yorulma hasarları üzerinde, deneysel çalışmada dikkate alınan değişkenlerin etki düzeyinin ortaya konulmasının, çelik yapılarda yorulma davranışına ilişkin belirsizliklerin azaltılmasına önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu deneysel çalışma 124M809 numaralı Proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

- AASHTO LRFD (2007) Bridge Design Specifications SI Units, 4 th Edition, USA.
- ANSI/AISC 360-16 (2016) Specification for Structural Steel Buildings.USA.
- ASTM (2007) Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM-A370, USA.
- Aydın E ve Alemdar F (2025) “Experimental and Finite Element Analysis Evaluation of the Effect of Variable Parameters on Tensile Capacity in Knife Plate Connections”, *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*, <https://doi.org/10.1007/s40996-025-01992-2>.
- Barsom JM and Rolfe ST (1999) Fracture and Fatigue Control in Structures: Applications Of Fracture Mechanics, ASTM, Philadelphia
- Battistini AD (2014) Stiffness and Fatigue Behavior of Cross Frames for Steel Bridge Applications, Ph.D. Thesis, The University of Texas, Austin.
- Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliği (2018), Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- INSTRON (2001) Instron Model 8802–8806 Load Frames. Reference Manual – Pre-Installation. M21-28800-70, Rev B.
- Liu Y, Dawe JL, Li J (2006) “Experimental Study of Gusset Plate Connections For Tubular Bracing”, *Journal of Constructional Steel Research*, 62: 132-143.
- Mc Donald GS and Frank KH (2009) The Fatigue Performance of Angle Cross-Frame Members in Bridges, American Institute for Iron and Steel, The University of Texas, Austin.
- Putri CA, Tateishi K, Shimizu M and Hanji T (2022) “Failure Probability for Fatigue Crack in Web Plate of Bridge Girder”, *International Journal of Steel Structures*, 22: 42-45.
- Salman ND (2019) Çelik çekme kirişlerde bağlantıların yorulmasının deneysel incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

İNCE CİDARLI ÇELİK LEVHA–BULON BAĞLANTILARINDA ÖN GERİLMENİN ÇEKME VE KAYMA HASARI ÜZERİNE ETKİSİ

EFFECT OF BOLT PRETENSION ON NET-TENSION AND SHEAR-OUT FAILURE IN THIN-WALLED STEEL PLATE–BOLT CONNECTIONS

Mert ÜSTÜN¹, Orhan Gazi ODACIOĞLU² ve Orhan DOĞAN³

ÖZET

İnce cidarlı çelik sistemlerin kullanımı; yüksek dayanıma sahip olup ağırlıkça avantaj sağlaması, imalat ve montajının kolay olması gibi sebeplerle prefabrik/modüler yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerde yapısal performans büyük ölçüde bağlantı davranışına bağlı olup, bulonlu bağlantılar pratikliği ve uygulama kolaylığı nedeniyle öne çıkmaktadır. Ancak, kalın çelik elemanların aksine ince cidarlı çelik levhalar, düşük kalınlıkları ve sınırlı plastik deformasyon kapasiteleri nedeniyle yerel göçme modlarına daha yatkındır. Bu çalışmada, ince cidarlı çelik levha–bulon bağlantılarında bulon ön gerilmesinin çekme ve kayma hasarı davranışı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, farklı çap kalınlıklarına sahip bulonlar kullanılarak, farklı ön gerilme seviyeleri altında tek eksenli çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel program kapsamında göçme modları ve taşıma kapasiteleri detaylı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bulon ön gerilmesinin çekme hasarı taşıma kapasitesini yaklaşık %10, kayma hasarı taşıma kapasitesini ise yaklaşık %20 oranında artırdığını göstermiştir. Ayrıca, bulon çapının artmasıyla birlikte uygulanan ön gerilmenin etkisi daha belirgin hale gelmiş ve her iki göçme türünde de taşıma kapasitesindeki artışın daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İnce cidarlı çelik, Bulon ön gerilmesi, Çekme hasarı, Kayma hasarı

ABSTRACT

The use of thin-walled steel systems has become widespread in prefabricated and modular construction due to their high strength-to-weight ratio, as well as ease of fabrication and assembly. In such systems, structural performance is largely governed by connection behavior, with bolted connections being preferred due to their practicality and ease of application. However, unlike thick steel elements, thin-walled steel plates are more susceptible to localized failure modes due to their reduced thickness and limited plastic deformation capacity. In this study, the effect of bolt pretension on net-tension failure and shear-out failure behavior in thin-walled steel plate–bolt connections were experimentally investigated. Within this scope, uniaxial tensile tests were conducted under different levels of bolt pretension using bolts with varying diameters and thicknesses. Failure modes and load-carrying capacities were evaluated in detail within the experimental program. The results indicated that bolt pretension increased the load-carrying capacity by approximately 10% for net-tension failure and 20% for shear-out failure. Furthermore, as the bolt diameter increased, the effect of pretension became more pronounced, leading to greater improvements in load-carrying capacity for both failure modes.

Keywords: Thin-walled steel, Bolt pretension, Net-tension failure, Shear-out Failure

¹ İnş. Müh, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, mertustun0@gmail.com

² Dr. Öğr. Üyesi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, odacioglu@kku.edu.tr

³ Prof. Dr., Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, odogan@kku.edu.tr

GİRİŞ

Sürdürülebilir inşaat ve malzeme verimliliği odaklı tasarıma yönelik küresel yönelim, modern yapı mühendisliğinde soğukta şekillendirilmiş ince cidarlı kesitlerin yaygınlaşmasına zemin hazırlamıştır (Lin ve Yam, 2024). İnce cidarlı çelik yapı sistemleri, hafiflik, yüksek taşıma kapasitesi ve üretim-montaj süreçlerindeki verimlilikleri sayesinde günümüz mühendislik uygulamalarında önemli bir yer edinmiştir. Bu sistemlerde elemanların davranışı kadar, elemanlar arasındaki yük aktarımını sağlayan bağlantı detayları da kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle bulonlu bağlantılar, pratik uygulanabilirlikleri ve ekonomik avantajları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmekte; ancak ince kesitli levhaların sınırlı kalınlığı, bu bağlantılarda klasik çelik yapılardan farklı ve daha karmaşık hasar mekanizmalarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır (Yu, 2000; Rogers ve Hancock, 2000).

Literatürde, ince cidarlı çelik levha-bulon bağlantılarının davranışı üzerine yapılan çalışmalar, bağlantı kapasitesinin yalnızca kenar mesafesi, delik çapı, levha kalınlığı gibi geometrik parametrelere değil, aynı zamanda temas yüzeyindeki sürtünme koşullarına ve bulon sıkma kuvvetine de duyarlı olduğunu göstermektedir (Kulak et al., 2001; Packer & Henderson, 1997). Özellikle bulon ön gerilmesi, temas yüzeyleri arasında ek bir sıkıştırma kuvveti oluşturarak yük transfer mekanizmasını değiştirmekte ve bağlantının kayma kapasitesini sürtünme yoluyla artırmaktadır (Zadanfarrokh ve Bryan, 1992). Bu durum, yükün doğrudan bulon kesitine aktarılmasını geciktirerek daha rijit bir başlangıç davranışı sağlamakta (Bickford, 2007) böylece taşıma kapasitesini artırmaktadır.

İnce cidarlı levhaların düşük bükülme rijitliği, ön gerilme kuvveti altında delik çevresinde oluşan gerilme yığılmalarını ve temas basıncı dağılımını farklılaştırmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar, bulon sıkma torkuna bağlı olarak gelişen bu ön gerilmenin, levhanın yerel burkulma eğilimini kısıtlayabileceğini ve çekme kapasitesi üzerinde iyileştirici bir etki yaratabileceğini göstermektedir (Teh ve Gilbert, 2012).

İnce cidarlı çelik elemanların bulonla bağlanması durumunda, ince cidarlı çelik levha, düşük kalınlığa ve sınırlı plastik deformasyon kapasitesine sahip olduğundan dolayı yerel göçme modları oluşmaktadır. Bu çalışma kapsamında, ince cidarlı çelik levha-bulon bağlantılarında bulon ön gerilmesinin çekme ve kayma hasar mekanizmaları üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Farklı bulon gövde çapına sahip bağlantılarda ön gerilme ve ön gerilmesiz olmak üzere gerçekleştirilen çekme deneyleri ile bağlantıların, taşıma kapasitesi ve hasar modları detaylı olarak incelenmiştir. Bu yönüyle çalışma, ince cidarlı çelik bağlantıların daha güvenilir ve performans odaklı tasarımına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

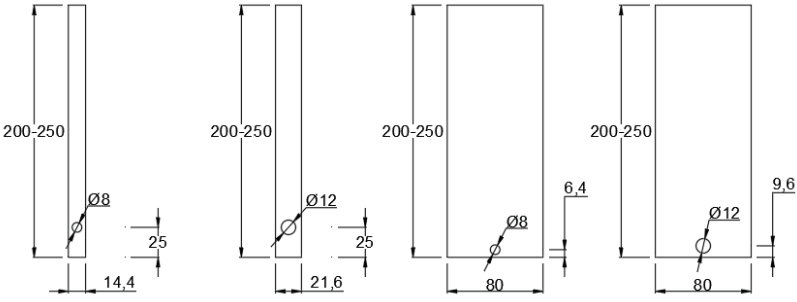
DENEYSEL PROGRAM

Deney Numuneleri

Bu deneysel çalışmada, bulon bağlantı noktasında ince cidarlı levhada oluşan çekme ve kayma hasar türünü, 8 ve 12 mm çapında bulonlara göre gözlemlmek için Şekil 1 de gösterildiği gibi levha numuneleri oluşturulmuştur.

İnce cidarlı levhada S235JR yapısal çeliği kullanılmıştır. TS EN 10025-2 (2006) standardına uygun yapılan levha çekme deneyi sonucunda çelik levhanın 242 MPa akma dayanım ve 396 MPa çekme dayanımı olduğu bulunmuştur. Kullanılan levhalar 1 mm kalınlığa ve 200-250 mm aralığında yüksekliğe sahiptir. Çekme hasar türü numunelerin levha genişliği delik çapının 1,8 katına sahip olup, kenar uzaklığı delik çapının merkezinden 25 mm olarak belirlenmiştir. Kayma hasar türü numunelerinde levha genişliği 80 mm belirlenmiş olup, kenar uzaklığı delik çapının merkezinden ölçülmek üzere delik çapının 0,8 katı olacak şekilde tasarlanmıştır.

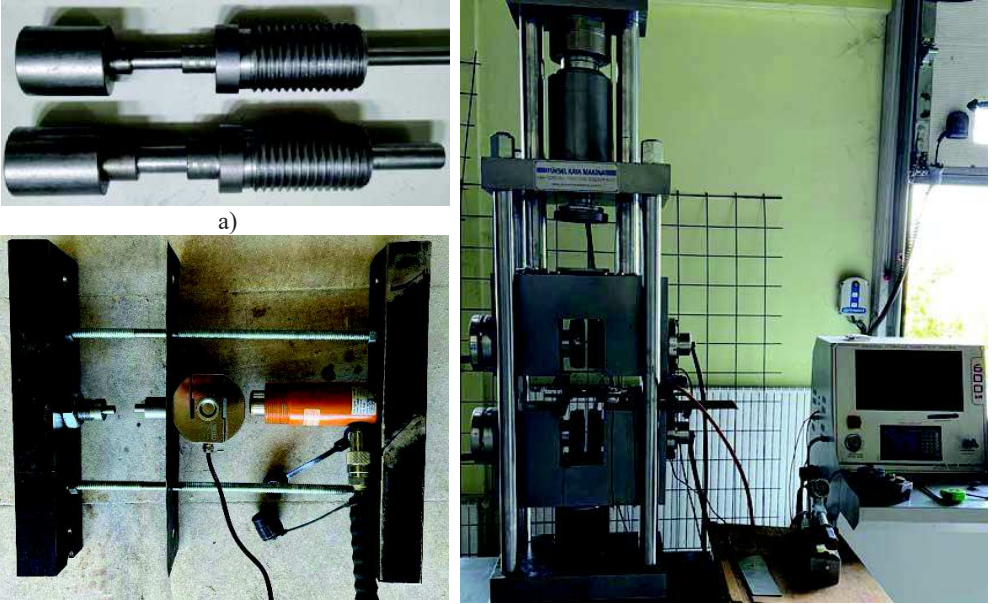
Ön gerilme kuvvetinin uygulandığı numunelerde ince cidarlı levhaya oranla daha rijit 2,5 mm kalınlığında ve delik çapının 2 katı oranında dış çapa sahip düz rondelalar kullanılmıştır.



Şekil 1. Çekme ve kayma hasar türüne göre 8 ve 12 mm delik çapına sahip deney numunelerinin boyutlandırılması

Deney Düzenegi ve Yöntemi

Deneyler, ön gerilme kuvvetini bir bulonun davranışını temsil eden özel bir düzenek kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu düzenekte bulon; gövde, baş ve somun olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. Somun ve bulon başı, 1.5d anahtar ağız kuralı esas alınarak 12 mm çapında silindirik formda tasarlanmıştır. Somun ve bulon başı bileşenlerinin merkezinden gövde bileşeni olan çelik çubuğun geçmesine imkân verecek şekilde Şekil 2a'da gösterildiği gibi tasarlanmıştır. Bu tasarım sayesinde uygulanan ön gerilme kuvvetinin levha yüzeyine düzgün ve homojen bir şekilde aktarılması sağlanmıştır.



Şekil 2. a) Bulonda gövde, baş ve somunu temsil eden üç ana bileşen, b) Bulon ön gerilme kuvvetinin aktarıldığı düzenek, c) Levha çekme deney aletine düzenegin monte edilmiş hali

Levha üzerine etkiyen kuvvetin uygulanması için 10 ton yük taşıma kapasiteli, tek yönlü 50 mm strok boyuna sahip el pompasına bağlı hidrolik silindir ve uygulanan kuvvetin ölçülmesi için 7500 N kapasiteli S tipi yük hücresi, TDG 8 kanallı quazi-statik veri sayısallaştırıcı kullanılmıştır. İkincil eksen doğrultusunda ön gerilme etkisi oluşturan bu düzenegin genel görünümü Şekil 2b'de sunulmuştur.

Bu özel düzenek, 600 kN kapasiteli levha çekme deney düzeneğine Şekil 2c’de gösterildiği gibi monte edilmiştir. Levhalara çekme cihazı aracılığıyla çekme gerilmesi uygulanırken, özel düzenek içerisinde çelik çubuk etrafına yerleştirilen rondela vasıtasıyla levha yüzeyinde basınç gerilmeleri oluşturulmuştur. Çekme deneyleri, test süresini optimize etmek ve statik davranışı yakalamak adına deplasman kontrollü olarak 10 mm/dk yükleme hızında gerçekleştirilmiş ve pullar aracılığıyla uygulanan basınç gerilmeleri deney süresince sabit tutulmuştur. Her parametre seti için üç numune test edilerek sonuçların tekrarlanabilirliği değerlendirilmiştir.

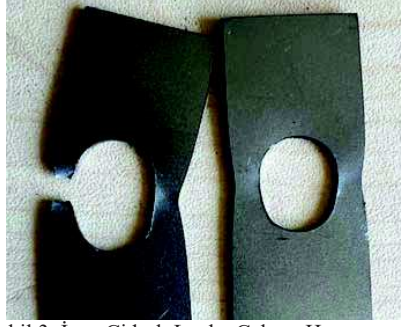
DENEYSEL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

İnce cidarlı çelik levha-bulon birleşim numuneleri üzerinde farklı bulon gövde çaplarında gerçekleştirilen çekme ve kayma deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 1’te sunulmuştur. Bu kapsamda, levha dış yüzeyinde 5 MPa basınç gerilmesi oluşturacak şekilde uygulanan ön gerilme kuvveti (F), levha maksimum yük taşıma kapasitesi (N_u), levha ortalama yükü (N_{ort}) ve değişkenlik katsayısı (CoV) üzerindeki etkileri detaylı olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 1. Çekme ve Kayma Hasar Türüne Göre Levha Çekme Deneyi Verileri

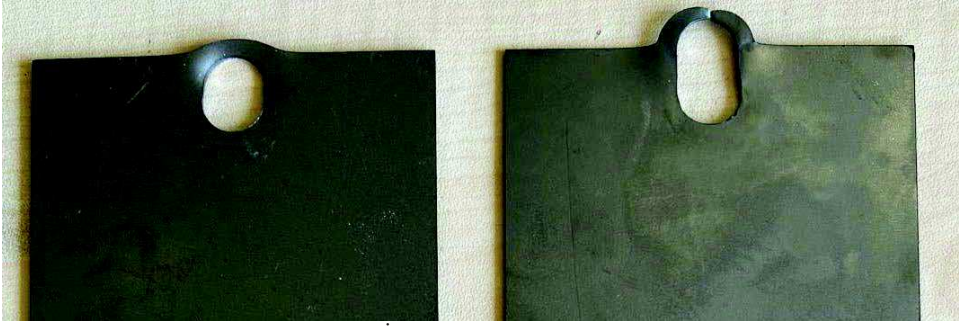
Hasar Türü	Delik/Bulon Çapı	Deney Sayısı	Referans (Ön Gerilmesiz)			5 MPa Ön Gerilme			
			N_u (kN)	N_{ort} (kN)	CoV	F (kN)	N_u (kN)	N_{ort} (kN)	CoV
Çekme	8	1	2,91	2,77	0,13	0,75	3,11	3,01	0,09
Çekme	8	2	2,60			0,75	2,89		
Çekme	8	3	2,81			0,75	3,02		
Çekme	12	1	3,53	3,86	0,24	1,70	4,08	4,27	0,15
Çekme	12	2	4,07			1,70	4,30		
Çekme	12	3	3,98			1,70	4,43		
Kayma	8	1	2,55	2,53	0,02	0,75	3,03	2,97	0,06
Kayma	8	2	2,53			0,75	2,89		
Kayma	8	3	2,51			0,75	2,98		
Kayma	12	1	3,50	3,52	0,08	1,70	4,25	4,23	0,08
Kayma	12	2	3,62			1,70	4,31		
Kayma	12	3	3,43			1,70	4,12		

Çekme hasarının gerçekleşeceği deneyler değerlendirildiğinde, referans (ön gerilmesiz) durumda 8 mm çaplı numunelerde maksimum taşıma kapasitesi 2,60–2,91 kN aralığında olup, CoV değerinin 0,13 gibi düşük bir seviyede olduğunu göstermiştir. 12 mm çaplı numunelerde ise taşıma kapasitesi 3,53–4,07 kN aralığına yükselmiş olup, CoV değerinin 0,24 seviyelerinde bulunmuştur. Çap artışının net-kesit alanını büyütmesi nedeniyle maksimum taşıma kapasitesinde bir artış gözlenmiştir. 5 MPa ön gerilme uygulanmasıyla birlikte tüm çekme numunelerinde maksimum taşıma kapasitelerinde artışı meydana gelmiş ve 8 mm çaplı numunelerde 2,89–3,11 kN (CoV:0,09), 12 mm çaplı numunelerde ise 4,08–4,43 kN (CoV:0,15), aralığında değerler elde edilmiştir. Şekil 3’de görüldüğü gibi 5 MPa gerilme etkisi altında çekme davranışı hasar türünün oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 3. İnce Cidarlı Levha Çekme Hasarı

Kayma hasarının gerçekleşeceği deneyler incelendiğinde ise referans durumda 8 mm çaplı numunelerde maksimum taşıma kapasite 2,51–2,55 kN (CoV:0,02), aralığında değişirken, 12 mm çaplı numunelerde bu değer 3,43–4,50 kN (CoV:0,08), aralığına ulaşmıştır. Ancak çekme hasarının gerçekleştiği deneylere kıyasla kayma hasarının gerçekleşeceği deneyler daha düşük değişkenlik gözlenmiş ve daha kararlı değerler elde edildiği görülmüştür. 5 MPa ön gerilme uygulanmasıyla birlikte kayma hasarının maksimum taşıma kapasitesi 8 mm çap için 2,89–3,03 kN (CoV:0,06), 12 mm çap için ise 4,12–4,31 kN (CoV:0,08), aralığına yükselmiştir. Şekil 4’de görüldüğü gibi 5 MPa gerilme etkisi altında kayma davranışı hasar türünün oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 4. İnce Cidarlı Levha Kayma Hasarı

Ön gerilme etkisiyle levha yüzeyinde oluşan basınç gerilmelerinin sürtünme katkısı sağlaması ve aynı zamanda rondelalar vasıtasıyla levhayı iki yandan sıkıştırarak delik çevresindeki yerel burkulma eğilimini minimize ederek çekme ve kayma hasarının taşıma kapasitesinin sırasıyla yaklaşık olarak %8-10 aralığı ve %17-20 aralığı oranlarında artmasını sağlamıştır.

Karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, ön gerilmenin sağladığı görece kapasite artışının 8 mm çaplı numunelerde daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu durum, küçük çaplı birleşimlerde davranışın daha çok yerel hasar mekanizmaları tarafından kontrol edilmesi ve ön gerilmenin oluşturduğu sıkıştırma etkisinin bu mekanizmalar üzerinde daha etkin rol oynaması ile açıklanabilir. Buna karşılık, 12 mm çaplı numunelerde mutlak kapasite artışı daha yüksek olmakla birlikte, ön gerilmenin oransal katkısı sınırlı kalmaktadır.

SONUÇ

Sonuç olarak, bulon çapı ve ön gerilme etkisi, ince cidarlı çelik levha–bulon birleşimlerinin mekanik performansı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bulon çapının artırılması taşıma kapasitesini doğrudan yükseltirken, ön gerilme uygulaması sürtünmeyi artırdığı ve yerel burkulmayı minimize ettiğinden dolayı bağlantının taşıma kapasitesinde dolaylı bir artış sağlamaktadır. Elde edilen bulgular, özellikle yerel hasar modlarına duyarlı ince cidarlı sistemlerin tasarımında ön gerilme etkisinin dikkate alınmasının önemini açıkça ortaya koymaktadır. Ön gerilmenin artırılmasıyla birlikte levhada gerçekleşecek hasar türünün gelişimi ve taşıma kapasitesini değişimi incelenecektir.

Ayrıca tasarlanan özel deney düzeneğinin gerçek bulon-somun sistemini temsil etme yeterliliği doğrulanacaktır.

Tesekkür

Bu çalışma Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: 2024/154

KAYNAKLAR

- Bickford, JH (2007) Introduction to the design and behavior of bolted joints: non-gasketed joints, CRC press
- Kulak GL, Fisher JW, and Struik JHA (2001) Guide to design criteria for bolted and riveted joint, 2nd Ed., John Wiley & Sons.
- Lin XM, Yam MC, Song Y, Chung KF, Ho HC and Han Y (2024) “Net section tension capacity of high strength steel single shear bolted connections” *Thin-Walled Structures*, 195, 111371.
- Packer JA and Henderson JE, (1997) Hollow structural section connections and trusses: A design guide Canadian Institute of Steel Construction, Ontario, Canada
- Rogers CA and Hancock GJ (2000) “Failure modes of bolted-sheet-steel connections loaded in shear” *Journal of Structural Engineering*, 126(3), 288-296.
- Teh LH and Gilbert BP (2012) “Net section tension capacity of bolted connections in cold-reduced steel sheets” *Journal of Structural Engineering*, 138(3), 337-344.
- TS EN 10025-2, (2006) Sıcak Haddelenmiş Yapı Çelikleri - Bölüm 2: Alaşsız Yapı Çeliklerinin Genel Teknik Teslim Şartları Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- Yu WW, LaBoube RA and Chen H (2019) Cold-formed steel design John Wiley & Sons, Hoboken, USA
- Zadanfarrokh F and Bryan ER (1992) “Testing and design of bolted connections in cold-formed steel sections” *Proceedings of the 11th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, St. Louis, MO, USA, 20-21 Oct., 625-662

PREKAST BETONARME SANAYİ YAPILARININ ENERJİ SÖNÜMLEYİCİLERLE GÜÇLENDİRİLMESİ

Ahmet GÜLLÜ¹, Furkan ÇALIM², Cihan SOYDAN³, Hasan ÖZKAYNAK⁴, Ercan YÜKSEL⁵

ÖZET

Türkiye'nin yüksek deprem riski ve özellikle 2023 Kahramanmaraş depremlerinde yaşanan büyük ekonomik ve yapısal kayıplar dikkate alındığında, sanayi yapılarının kesintisiz kullanımını sağlayacak etkin güçlendirme çözümlerine ihtiyaç duyulmaktadır; bu proje, ithal ve maliyetli sistemlere alternatif olarak yerli kurşun ekstrüzyon ve çelik yastık sönmüleyicilerin hibrit kullanımına dayalı yenilikçi bir yaklaşım önermekte, farklı doğrultularda değişen yapısal davranışları dikkate alarak optimum sönmüleyici yerleşimini sayısal modelleme, deneysel çalışmalar, parametrik analizler ve yapay zekâ destekli optimizasyon ile belirlemeyi hedeflemektedir; böylece üretimi aksatmayan, pratik ve etkili bir güçlendirme yöntemi geliştirilirken, proje aynı zamanda disiplinler arası iş birliği, eğitim katkıları ve yeni tasarım standartlarının oluşumuna destek sağlayarak hem can güvenliği hem de ekonomik sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sunacaktır.

Anahtar Kelimeler: Sanayi Yapıları, Güçlendirme, Enerji Sönümleyiciler, Yapay Zeka

ABSTRACT

Considering Türkiye's high seismic risk and the severe economic and structural losses observed during the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, there is a critical need for efficient retrofit solutions that maintain uninterrupted industrial operations; this project proposes an innovative hybrid use of locally developed lead extrusion and steel cushion dampers as a cost-effective alternative to imported systems, aiming to optimize damper placement by accounting for directional structural differences through numerical modeling, experimental validation, parametric analyses, and AI-based optimization; the outcome is a practical, non-intrusive strengthening methodology that preserves functionality while enhancing seismic performance, alongside broader impacts including interdisciplinary collaboration, academic training, advancement of design standards, and contributions to both life safety and economic resilience

Keywords: Industrial Buildings, Retrofitting, Energy Dissipators, Artificial Intelligence

GİRİŞ

Bu çalışma kabul edilmiş ve çalışmalarını başlamak üzere olan 225M618 no'lu Tübitak 1001 projesini özetlemektedir.

Ülkemiz, coğrafi konumu nedeniyle yüksek sismik aktiviteye sahip bir bölgededir ve tarih boyunca yıkıcı sonuçları olan büyük depremlere maruz kalmıştır. Özellikle 2023 yılında yaşanan Kahramanmaraş merkezli depremler, prefabrikte sanayi yapılarında büyük ölçüde maddi kayıplara ve üretimin aksamasına yol açmıştır. Bu durum, sanayi yapılarının depreme karşı dirençliliğinin

¹ Dr. Ö.Ü., İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, ahmetgullu@itu.edu.tr

² Araş. Gör., İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, calimf@itu.edu.tr

³ Dr. Ö. Ü., Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, csoydan@nku.edu.tr

⁴ Prof. Dr., İstanbul Beykent Üniversitesi, İstanbul, hasanozkaynak@beykent.edu.tr

⁵ Prof. Dr., İTÜ Afet Yönetim Enstitüsü, İstanbul, yukselerc@itu.edu.tr

artırılması gerektiğini bir kez daha ortaya koymaktadır. Nitekim prefabrike sanayi yapılarında, özellikle kolon-kiriş bağlantıları gibi yapısal unsurların sismik dayanım açısından zayıflığı önemli bir risk unsuru olarak öne çıkmaktadır (Batalha vd., 2018; Dal Lago vd., 2021). Geleneksel güçlendirme yöntemleri yapı içindeki faaliyetlerin sürdürülmesini zorlaştırmakta ve üretim süreçlerini aksatmaktadır. Bu durum, sanayi yapılarının güçlendirilmesinde işlevsellik açısından daha esnek ve pratik çözümlere duyulan gereksinimi ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, enerji sönümleyici sistemler, küçük boyutları, hızlı uygulanabilirlikleri ve yapısal elemanlarda oluşabilecek hasarları minimize etme özellikleri açısından ideal bir çözüm olarak görülmektedir (Rodgers vd., 2006; Çalım vd., 2023a).

Enerji sönümleyici sistemler, yapısal elemanlarda oluşabilecek kalıcı hasarların önlenmesi, deprem enerjisinin harici elemanlarla tüketilmesi ve kolay yenilenebilir avantajları sağlamaktadır. Bu nedenle enerji sönümleyiciler son yıllarda akademik ve uygulama alanında yoğun bir ilgiyle karşılanmış ve çeşitli sönümleyici tipleri geliştirilmiştir. Bunlardan biri olan Kurşun Ekstrüzyon Sönümleyici (KES), kurşunun plastik şekil değiştirme kapasitesini kullanarak enerji tüketmektedir. Proje ekibi tarafından yerli imkânlarla geliştirilen KES, daha önceki çalışmalarda laboratuvar ortamında etkinliğini kanıtlamış ve yüksek sismik performans göstermiştir (Soydan vd., 2024; Çalım vd., 2023b). Çelik Yastık Sönümleyiciler (ÇYS) ise çeliğin plastik deformasyon kapasitesinden yararlanarak deprem enerjisini etkili bir şekilde tüketmektedir (Yüksel vd. 2018, Özkaynak vd. 2018, Güllü vd. 2021). ÇYS'ler araştırma grubu tarafından yerli olarak üretilmiş ve etkinliği laboratuvar ortamında deneysel olarak kanıtlanmıştır. Mevcut literatürde ÇYS'lerin, sismik talepleri karşılamada etkin oldukları ve yapıların performans seviyelerini önemli ölçüde artırabildikleri vurgulanmaktadır (Özkaynak 2017). Bu sönümleyiciler yüksek enerji sönümleme kapasiteleri, düşük bakım maliyetleri ve kolay uygulanabilirlikleri nedeniyle ön plana çıkmaktadır. Her ne kadar araştırma grubu KES ve ÇYS üzerinde yoğun çalışmalar gerçekleştirmiş olsa da, bu iki sönümleyicinin hibrit kullanımı durumunda birbirleriyle olan etkileşimi ve mevcut prefabrike sanayi yapılarındaki yerleşim optimizasyonu konuları henüz literatürde çalışılmamıştır.

Önerilen bu çalışma, ülkemizin önemli bir ihtiyacına çözüm üretmek amacıyla literatürde mevcut olan bu önemli boşluğu kapatmak üzere tasarlanmıştır. Önerilen proje, sanayi yapılarının üretim faaliyetlerini aksatmadan deprem güvenliklerinin artırılmasına yönelik hibrit sönümleme sistemleri geliştirilmesini hedeflemektedir. Mevcut çalışmalardan farklı olarak; prefabrike sanayi yapılarının farklı taşıyıcı sistem ve dinamik özelliklere sahip yönlerinde, iki farklı tip sönümleyici hibrit olarak kullanılacaktır. KES'ler, geniş açıklıklı kısa doğrultularda moment aktarmayan birleşimlere etkin bir şekilde uygulanabilecekken, ÇYS'ler ise çerçeveler arasındaki bağlantılarda daha verimli enerji tüketimini sağlayacaktır. Böylece farklı karakteristiklere sahip doğrultularda farklı sönümleme özellikleri kazandıran yeni bir hibrit tasarım paradigması ortaya konulmaktadır.

METODOLOJİ

Bu çalışmanın metodolojik çerçevesi, birbirini tamamlayan ve kademeli olarak ilerleyen beş ana aşamadan oluşmaktadır. Bu yapı, sayısal modelleme, deneysel doğrulama, ileri analiz teknikleri ve yapay zekâ destekli optimizasyon süreçlerinin bütünlük bir yaklaşımla ele alınmasını sağlayarak, hibrit sönümleyici sistemlerin sanayi yapılarındaki etkinliğini hem bilimsel hem de uygulamaya yönelik olarak ortaya koymayı hedeflemektedir. İlk aşamada, prefabrike moment aktarmayan sanayi yapılarının sismik davranışını temsil edecek şekilde iki boyutlu sayısal modeller oluşturulacaktır. Bu modeller, yapının kısa ve uzun doğrultudaki davranış farklılıklarını ayrı ayrı temsil edecek şekilde kurgulanacak ve sönümleyici elemanlar doğrusal olmayan yay modelleri ile tanımlanacaktır. Kurşun ekstrüzyon sönümleyiciler çevrimsel davranış gösteren iki doğru modeler ile temsil edilirken, çelik yastık sönümleyiciler için uygun malzeme modelleri kullanılacaktır. Bu aşamada farklı deprem kayıtları altında zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilerek, sönümleyicilerin yerleşim düzeni, rijitlikleri, bağlantı detayları ve yapı geometrisine bağlı etkileri parametrik olarak incelenecektir. Böylece, hibrit sistemin farklı doğrultularda sağladığı katkılar değerlendirilerek en uygun yerleşim senaryoları belirlenecektir. Ayrıca, bu analizler yalnızca enerji sönümleme kapasitesini değil, aynı zamanda iç kuvvet dağılımı, göreceli kat ötelenmeleri ve hasar mekanizmalarının kontrolü gibi performans kriterlerini de kapsayacaktır. Elde edilen bulgular

doğrultusunda, üç boyutlu modeller oluşturularak sistemin bütüncül davranışı daha gerçekçi biçimde analiz edilecektir.

İkinci aşamada, sayısal analizler ile belirlenen optimum sönümleyici yerleşim düzenleri esas alınarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilecektir. Bu kapsamda, laboratuvar olanakları ve ekonomik kısıtlar dikkate alınarak ölçekli ve yarı gerçek boyutlu çerçeve numuneleri tasarlanacaktır. Numunelerin geometrik boyutları belirli bir ölçek katsayısına göre küçültülürken, malzeme özellikleri ve davranış karakteristikleri gerçek yapıları temsil edecek şekilde korunacaktır. Öncelikle sönümleyici elemanların çevrimsel davranışı standartlara uygun olarak test edilecek, ardından referans (yalın) çerçeveler ile sönümleyici içeren çerçeveler karşılaştırmalı olarak statik benzeri çevrimsel yükleme deneylerine tabi tutulacaktır. Bu deneylerde yük-deplasman ilişkileri, enerji tüketimi, rijitlik değişimi ve hasar gelişimi gibi parametreler detaylı olarak ölçülecektir. Deneysel programın önemli bir bileşeni olarak, hibrit sistemin üç boyutlu davranışını değerlendirmek amacıyla sarsma masası deneyleri de gerçekleştirilecektir. Bu deneyler sayesinde sönümleyicilerin birlikte çalışma mekanizması, enerji paylaşımı ve doğrultular arası etkileşimleri doğrudan gözlemlenecektir. Deneyler sırasında gelişmiş ölçüm sistemleri kullanılarak ivme, yerdeğiştirme ve şekil değiştirme verileri yüksek doğrulukla kaydedilecektir.

Üçüncü aşamada, deneysel çalışmalardan elde edilen veriler kullanılarak sayısal modeller güncellenecek ve doğrulanacaktır. Bu süreçte malzeme modelleri, sönümleyici karakteristikleri ve birleşim davranışları deneysel bulgulara göre revize edilerek model doğruluğu artırılacaktır. Doğrulanmış modeller kullanılarak, Türkiye’de yaygın olarak kullanılan farklı tipte prefabrikte sanayi yapıları için kapsamlı parametrik analizler gerçekleştirilecektir. Bu analizlerde, sönümleyici sayısı, yerleşimi, rijitliği ve bağlantı detaylarının yapı performansı üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenecektir. Ayrıca mevcut yapıların sismik performansı değerlendirilerek, hibrit sönümleyici sistemlerin sağladığı iyileştirme nicel olarak ortaya konacaktır. Bu aşama, hem deneysel hem de sayısal verilerin bütünleştirildiği ve genellenebilir tasarım çıkarımlarının elde edildiği kritik bir süreçtir.

Dördüncü aşamada, elde edilen kapsamlı veri tabanı kullanılarak yapay zekâ destekli optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilecektir. Bu kapsamda sönümleyici sayısı, yerleşim düzeni, geometrik özellikler ve bağlantı detayları gibi tasarım değişkenleri optimizasyon problemine dahil edilecektir. Amaç fonksiyonu, yapı performansını temsil eden görelî kat ötelenmesi, enerji sönümlenme kapasitesi ve iç kuvvet dağılımı gibi kriterlere dayalı olarak tanımlanacaktır. Optimizasyon süreci, Markov Karar Süreci çerçevesinde modellenerek derin pekiştirmeli öğrenme yaklaşımı ile çözülecektir. Bu kapsamda Derin Q-Ağı (DQN) kullanılarak farklı sönümleyici konfigürasyonlarının performansı değerlendirilerek en uygun yerleşim düzeni belirlenecektir. Ayrıca genetik algoritmalar ve parçacık sürü optimizasyonu gibi alternatif yöntemlerle karşılaştırmalar yapılarak önerilen yaklaşımın etkinliği değerlendirilecektir. Bu aşama, geleneksel mühendislik sezgisine dayalı tasarım yaklaşımlarının ötesine geçerek, veri temelli ve otomatik karar verebilen bir sistem geliştirilmesini hedeflemektedir.

Beşinci ve son aşamada ise, tüm analiz, deney ve optimizasyon sonuçları bir araya getirilerek sanayi yapıları için uygulanabilir bir güçlendirme ve tasarım yöntemi geliştirilecektir. Bu yöntem, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) ve uluslararası standartlar dikkate alınarak yapı güvenliği, kullanım sürekliliği ve ekonomik uygulanabilirlik kriterlerini sağlayacak şekilde yapılandırılacaktır. Bu kapsamda, farklı deprem tehlike düzeylerine sahip bölgeler için tipik sanayi yapılarının performansı değerlendirilecek ve hibrit sönümleyici sistemlerin sağladığı iyileştirmeler ortaya konacaktır. Ayrıca, güçlendirme sürecinde izlenecek adımlar, tasarım kabulleri ve uygulama detaylarını içeren bir rehber hazırlanacaktır. Son olarak, önerilen yöntemin maliyet etkinliği analiz bilimsel katkı sunmakla kalmayıp, aynı zamanda sanayi yapılarının deprem güvenliğini artırmaya yönelik pratik ve uygulanabilir bir çözüm ortaya koyacaktır.

SONUÇ

Bu çalışma tamamlandığında aşağıda belirtilen konulara katkı sunması beklenmektedir.

- Prefabrikte sanayi yapıları için, üretimi aksatmayan yenilikçi ve uygulanabilir bir hibrit güçlendirme yöntemi geliştirilecektir.
- Kurşun ekstrüzyon ve çelik yastık sönümleyicilerin sanayi yapılarının farklı özelliklerine karşılık gelecek şekilde hibrit kullanımının etkinliği tartışılacaktır.
- Hibrit sistemin görelî kat ötelenmelerini azaltarak ve birleşim hasarlarını sınırlandırarak yapı davranışını iyileştirme potansiyeli irdelenecektir.
- Yapay zekâ destekli optimizasyon ile sönümleyici yerleşimi ve tasarımının daha hızlı, doğru ve ekonomik şekilde belirlenebilirliği irdelenecektir.

KAYNAKLAR

- Batalha N, Rodrigues H, Varum H (2019) “Seismic performance of RC precast industrial buildings – learning with the past earthquakes,” *Innovative Infrastructure Solutions*, 4, 4. <https://doi.org/10.1007/s41062-018-0191-y>
- Çalım F, Güllü A, Soydan C, Yüksel E (2023a) “State-of-the-art review for lead extrusion dampers: Development, improvement, characteristics, application areas, and research needs,” *Structures*, 58, 105477.
- Çalım F, Soydan C, Güllü A, Yüksel E (2023b) “Performance improvement of an RC moment-resisting frame by a novel lead extrusion damper: A numerical investigation”. In: Ilki A, Çavunt D, Çavunt YS (eds.) *Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient. Proceedings of the fib Symposium 2023. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 349, (pp. 1722-1731), Springer, Cham.
- Dal Lago B, Naveed M, Tornaghi ML (2021) “Tension-only ideal dissipative bracing for the seismic retrofit of precast industrial buildings,” *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19, 4503-4532.
- Güllü A, Körpeoğlu SG, Selek Kılıçarslan ES (2021) “Multi-objective optimal sizing of energy dissipative steel cushions for longitudinal loading,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 63(6), 2955-2967.
- Özkaynak H (2017) “The effects of special metallic dampers on the seismic behavior of a vulnerable RC frame,” *Structural Engineering and Mechanics, An International Journal*, 61(4), 483-496.
- Özkaynak H, Khajehdehi A, Gullu A, Azizisales F, Yüksel E, Karadogan F (2018) “Uni-axial behavior of energy dissipative steel cushions,” *Steel and Composite Structures*, 27(6), 661-674.
- Rodgers GW, Chase JG, Mander JB, Leach NC, Denmead CS, Cleeve D, Heaton D (2006) “High Force-to-Volume Extrusion Dampers and Shock Absorbers for Civil Infrastructure,” *Proceedings of the 19th Australasian Conference on Mechanics of Structures and Materials*, Christchurch, New Zealand.
- Soydan C, Güllü A, Yüksel E (2024) “Kurşun Ekstrüzyon Sönümleyicilerin Boyutsal Optimizasyonu ve Bina Mimari ve İşletme Fonksiyonlarıyla Barışık Bir Güçlendirme Yaklaşımı,” TÜBİTAK 1001, Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı Projesi.
- Yüksel E, Karadogan F, Ozkaynak H, Khajehdehi A, Gullu A, Smyrou E, Bal IE (2018) “Behaviour of steel cushions subjected to combined actions,” *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(2), 707-729.

ŞAFT BOŞLUĞU OLAN-OLMAYAN HASARLI-HASARSIZ KİRİŞSİZ PLAK DÖŞEMELERİN EQM-PUNCH KAMALARI İLE ZİMBALAMAYA KARŞI GÜÇLENDİRİLMESİ

PUNCHING SHEAR STRENGTHENING OF ORIGINAL AND DAMAGED FLAT SLABS WITH AND WITHOUT OPENINGS USING THE EQM-PUNCH RODS

Kerem ÇAVUR¹, Erkan AKPINAR², Onur ERTAŞ³, Şevket ÖZDEN⁴

ÖZET

Kirişsiz plak döşemelerde kolon çevresinde meydana gelen zımbalama göçmesi, ani ve gevrek karakteri nedeniyle taşıyıcı sistem güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu durum, kolon yakınında şaft veya benzeri boşlukların bulunması halinde daha da önem kazanmaktadır. Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Laboratuvarında yürütülmekte olan konu ile ilgili çalışma programında, şaft boşluğu bulunan ve bulunmayan hasarlı/hasarsız kirişsiz plak döşemelerin, sonradan monte edilen özel geometri EQM-PUNCH kama elemanları ile zımbalamaya karşı güçlendirilmesi deneysel olarak incelenmektedir. Çalışma programında, referans deneyler ve ilk standart güçlendirme serisi deneyleri tamamlanmış olup, FAZ-II olarak adlandırılan aşama sürdürülmektedir. Faz II serisinde daha önce zımbalama hasarı görmüş boşluklu ve boşluksuz referans numuneler onararak EQM-PUNCH ile güçlendirilmiş; ayrıca yeni üretilen boşluklu numunelerde farklı EQM-PUNCH yerleşim düzenleri uygulanmıştır. Numuneler yük-orta nokta deplasmanı ilişkileri, maksimum yük kapasiteleri ve göçme biçimleri bakımından karşılaştırılacaktır. İlk sonuçlar, hasarlı numunelerin uygun onarım ve güçlendirme sonrasında referans davranış seviyesine yaklaşabildiğini, bazı konfigürasyonlarda ise referans kapasitenin üzerine çıkılabildiği yönündedir. Ayrıca çalışma programında boşluksuz yeni numuneler de üretilmiş olup bunlara ait deneyler FAZ-III kapsamında devam etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kirişsiz plak döşeme, zımbalama, güçlendirme, şaft boşluğu, EQM-PUNCH, kayma kamasi

ABSTRACT

Punching shear failure in the vicinity of column-to-slab connections, in flat slabs, is a critical structural problem due to its sudden and brittle nature. This problem becomes more significant when slab openings are located near the column-to-slab connection region. In this ongoing extensive experimental research study conducted at the Structures Laboratory of the Department of Civil Engineering at Kocaeli University, the punching shear strengthening of damaged/ non-damaged flat slabs with or without shaft openings using post-installed EQM-PUNCH shear dowel elements is investigated. The study is under progress as the second phase of a broader experimental research campaign and it is referred as Phase II, following the reference and first strengthened group in initial series. Within this phase, previously loaded-to-failure reference specimens with and without openings will be repaired and strengthened using EQM-PUNCH, while non damaged specimens with openings will be tested with different EQM-PUNCH rod configurations. The specimens will be compared in terms of load-central point displacement

¹ OTS Proje Müşavirlik Ltd.Şti., İstanbul, kerem.cavur@otsproje.com.tr

² Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, erkan.akpinar@kocaeli.edu.tr

³ OTS Proje Müşavirlik Ltd.Şti., İstanbul, onur.ertas@otsproje.com.tr

⁴ Erzincan B.Y. Univ. Deprem Teknolojileri Enstitüsü, Erzincan, sevket.ozden@erzincan.edu.tr

response, peak load capacity and failure mode. The initial results showed the trend that the damaged slab-to-column connections may well be restored to their original performance level after repair and strengthening, and in some cases strengthened specimens exceeded the reference specimen capacity. In addition, non-damaged specimens without openings have also been produced and the testing campaign is currently at the Structures Laboratory's floor of the Department of Civil Engineering at Kocaeli University within the scope of Phase III.

Keywords: Flat slab, punching shear, strengthening, slab opening, EQM-PUNCH, shear rod

GİRİŞ

Kirişsiz plak döşeme sistemleri, mimari esneklik ve uygulama kolaylığı nedeniyle özellikle son 20 yılda yaygın biçimde tercih edilmektedir. Bununla birlikte bu sistemlerde kolon-döşeme birleşim bölgesi, zımbalama göçmesi olarak adlandırılan göçme tipi açısından en kritik bölgelerden biridir. Zımbalama göçmesi çoğu zaman sınırlı deformasyon uyarısı ile gelişen, ani dayanım kaybına yol açabilen ve göçme güvenliği bakımından özel olarak dikkate alınması gereken bir davranış türüdür. Kolon yakınında mekanik veya havalandırma şaftı gibi döşeme boşluklarının bulunması halinde ise yük aktarım mekanizması olumsuz etkilenmekte ve zımbalama davranışı daha karmaşık hale gelmektedir.

Bu çalışma, daha önce gerçekleştirilen ve bu metin kapsamında FAZ-I olarak adlandırılan çalışmayla birlikte, geniş bir deneysel araştırma programının parçasıdır. FAZ-I'de boşluklu ve boşluksuz referans numuneler ile sonradan eklenen kayma kamalarının etkisi incelenmiştir. Bu FAZ-II aşamasında, OTS Proje Müşavirlik Ltd. Şti. tarafından geliştirilen EQM-PUNCH kayma kaması elemanları kullanılmaktadır. Böylece, hem zımbalama hasarı görmüş numunelerin onarım sonrası tekrar güçlendirilerek performanslarının geri kazanılıp kazanılamayacağı, hem de yeni üretilen numunelerde farklı EQM-PUNCH konfigürasyonlarının etkisi araştırılmaktadır.

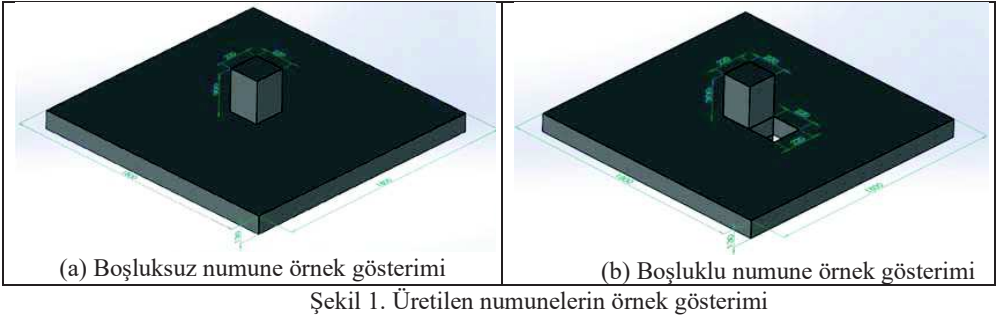
AMAÇ

Çalışmanın temel amacı, şaft boşluğu bulunan ve bulunmayan kirişsiz plak döşemelerde sonradan monte edilen EQM-PUNCH elemanlarının zımbalama dayanımı ve davranışı üzerindeki etkisini deneysel olarak ortaya koymaktır. Bu kapsamda iki alt hedef belirlenmiştir. Birincisi, daha önce zımbalama hasarı görmüş referans numunelerin onarım ve EQM-PUNCH uygulaması sonrasında başlangıç performans düzeylerine ulaşip ulaşmadığının incelenmesidir. İkincisi ise yeni üretilen boşluklu numunelerde farklı EQM-PUNCH planda yerleşim detaylarının karşılaştırılması ve en etkili konfigürasyonun belirlenmesidir.

Buna ek olarak, çalışma kapsamında boşluksuz yeni numuneler de üretilmiş ve FAZ-III ismiyle deney serisine dahil edilmiştir.

DENEYSEL ÇALIŞMA

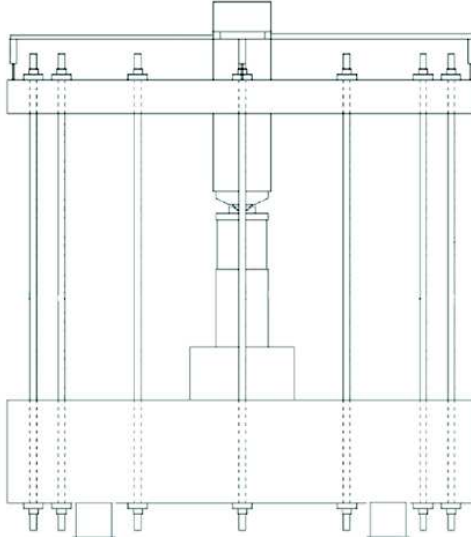
Deney programında, biri boşluksuz referans sistemden üretilmiş, diğerleri boşluk etkisini içeren toplam dört adet FAZ-II numunesi üretilmiştir. Bu numunelerin ikisi, daha önce test edilerek hasar görmüş referans numunelerin onarılıp EQM-PUNCH ile güçlendirilmiş halleri, diğer ikisi ise yeni üretilmiş ve farklı EQM-PUNCH düzenleriyle güçlendirilmiş numunelerdir. Numunelerin tümünde kolon çevresinde döşeme düzlemine dik doğrultuda yerleştirilen M8 sınıfı EQM-PUNCH elemanları kullanılmıştır. Yerleşim, kolon merkezi esas alınarak dört yönde ve ikişer hat halinde düzenlenmiştir.



Şekil 1. Üretilen numunelerin örnek gösterimi

Tüm numuneler karşılaştırma adına FAZ I numuneleriyle benzer özellikte olup, 1800x1800 mm plan boyutlarına ve 130 mm döşeme kalınlığına sahiptir. Kolon kesiti 220x220 mm olup boşluklu numunelerde kolonun hemen yanında kolon boyutlarına eşdeğer boşluk oluşturulmuştur. Döşeme üst donatısı $\phi 16/130$ mm, alt donatısı $\phi 12/130$ mm'dir ve faydalı derinlik 105 mm'dir. Numunelerde kullanılan hedef beton sınıfı C30 olup FAZ-II döneminde ölçülen ortalama basınç dayanımı 34.5 MPa'dır. Eğilme donatısı B420C sınıfındadır. EQM-PUNCH elemanlarının akma dayanımı ise yapılan çekme deneyleri sonucunda yaklaşık 500 MPa olarak belirlenmiştir.

Hasarlı referans numunelerde güçlendirme öncesinde pas payları kaldırılmış, çatlak bölgeleri açığa çıkarılmış ve epoksi enjeksiyon pakeleri yerleştirilmiştir. Çatlaklara epoksi enjeksiyonu yapıldıktan sonra yapısal tamir harcı uygulanmış, ardından EQM-PUNCH montajı için açılan delikler temizlenmiş ve epoksi ile doldurulmuştur. Sonrasında EQM-PUNCH elemanları yerleştirilmiş, özel pullar ve somunlar ile el sıkısı seviyesinde sabitlenmiştir. Bu şekilde beton dökümünden sonra eklenen düşey yönlü bir zımbalama güçlendirme sistemi oluşturulmuştur.



Şekil 2. Test düzeneği

Deneyler, rijit yükleme döşemesi, hidrolik piston, yük hücresi, mafsals ve numuneden oluşan bir yükleme düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Döşeme kenarlarının dönmesi serbest bırakılmış, düşey deplasmanları ise sınırlandırılmıştır. Orta nokta deplasmanı ve kenar davranışı deplasman ölçerlerle izlenmiş, ayrıca bazı çelik rodlar üzerine yerleştirilen gerinim ölçerler yardımıyla olası dışmerkezlilikler kontrol edilmiştir. Deney sonuçları yük-orta nokta deplasmanı davranışı, maksimum yükler ve gözlenen göçme biçimleri üzerinden değerlendirilmiştir.

ÖNCÜ SONUÇLAR VE İLERLEME

Yapılan ilk deneylerde, sınırlı zımbalama hasarı sonrası onarılan ve EQM-PUNCH kayma kamaları ile güçlendirilen numunelerin, ilk dayanımlarına ulaştığı ve arttığı yönünde olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Güçlendirme konfigürasyonlarına ilişkin varyasyonlar değerlendirilmekte ve üretilen numunelerin testleri devam etmektedir.

İlerleyen süreçte elde edilen sonuçlar, analitik çalışma ile tamamlanacaktır.

KAYNAKLAR

Tuzcu T (2021)

Betonarme boşluklu kirişsiz plak döşemelerin zımbalama davranışının kayma kamalarıyla iyileştirilmesi. Kocaeli Üniversitesi.

Şaft boşluğu olan kirişsiz plak döşemelerin sonradan eklenen kayma kamaları ile zımbalamaya karşı güçlendirilmesine ilişkin FAZ-I çalışması

ÖNGERİLME MİKTARININ KURŞUN EKSTRÜZYON SÖNÜMLEYİCİ DAVRANIŞINA ETKİSİ

EFFECT OF PRESTRESSING LEVEL ON THE LEAD EXTRUSION DAMPER BEHAVIOR

Furkan ÇALIM¹, Cihan SOYDAN², Ahmet GÜLLÜ³ ve Ercan YÜKSEL⁴

ÖZET

Bu çalışma, kurşun ekstrüzyon sönümleyicilerde (KES) öngerilme miktarının (kurşunun sıkıştırılması) cihaz davranışı üzerindeki etkilerini deneysel olarak kapsamlı şekilde incelemektedir. Bu çalışmada farklı öngerilme seviyelerine sahip bir sönümleyici numunesi üretilmiş ve çevrimsel yüklemeye altınada test edilmiştir. Deneyler, farklı yerdeğiştirme genlikleri ve yüklemeye hızlarında gerçekleştirilmiş, kuvvet-yerdeğiştirme ilişkileri, maksimum sönümleyici kuvvetleri ve davranışın kararlılığı gibi parametreler detaylı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, öngerilme miktarının artmasıyla birlikte sönümleyici kuvvetinin önemli ölçüde yükseldiğini, histeretik eğrilerin daha düzenli ve dikdörtgene yakın bir forma dönüştüğünü ve buna bağlı olarak enerji sönümleme kapasitesinin belirgin şekilde arttığını göstermektedir. Düşük öngerilme seviyelerinde cihaz daha sınırlı kuvvet üretirken ve akma sonrası davranış dalgalı bir karakter sergilerken, yüksek öngerilme seviyelerinde hem kuvvet kapasitesi hem de davranış kararlılığı önemli ölçüde iyileşmektedir. Özellikle 3 mm ve 4 mm gibi yüksek sıkıştırma seviyelerinde kuvvet değerlerinde dramatik artışlar gözlenmiş ve cihazın daha etkin bir sönümleyici olarak çalıştığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, öngerilme miktarının KES performansını doğrudan kontrol eden en kritik parametrelerden biri olduğu, uygun geometrik ve mekanik optimizasyon ile bu tür sönümleyicilerin deprem etkilerine karşı yapıların performansını önemli ölçüde artırabileceği ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Enerji sönümleyici, Sigorta elemanı, Deneysel çalışma, Çevrimsel yüklemeye.

ABSTRACT

This study presents a comprehensive experimental investigation on the effect of prestressing level (lead compression) on the behavior of lead extrusion dampers (LEDs). In this study, a damper specimen with different prestressing levels was manufactured and tested under cyclic loading conditions with varying displacement amplitudes and loading rates. Key response parameters, such as force-displacement relationships, maximum damper forces, and behavioral stability, were evaluated in detail. The results demonstrate that increasing the prestressing level significantly increases the damper force and transforms the hysteretic response into a more stable, rectangular shape, leading to a substantial improvement in energy dissipation capacity. While low prestressing levels result in limited force capacity and fluctuating post-yield behavior, higher prestressing levels provide greater force resistance and more stable cyclic performance. Particularly at higher compression levels (e.g., 3 mm and 4 mm), dramatic increases in force were observed, indicating a much more efficient damping mechanism. Overall, the findings reveal that prestressing level is one of the most critical parameters governing LED performance, and that proper geometric and mechanical optimization of this parameter can significantly enhance the seismic performance of structures.

Keywords: Energy dissipator, Fuse element, Experimental study, Cyclic loading.

¹ Araş. Gör., İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, calimf@itu.edu.tr

² Dr. Öğr. Üyesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, csoydan@nku.edu.tr

³ Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, ahmetgullu@itu.edu.tr

⁴ Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, yukselerc@itu.edu.tr

GİRİŞ

Deprem sonrasında oluşabilecek can ve mal kayıplarının en az seviyede tutulabilmesini, afet yönetiminin daha kontrollü ve verimli gerçekleştirilmesini sağlamak amacıyla depreme dayanıklı yapıların tasarlanması, mevcut yapıların ise depreme karşı güvenli hale getirilmesi büyük önem arz etmektedir. Depremler sırasında yapılara aktarılan sismik enerji, yapısal elemanların doğrusal olmayan şekildeğiştirmeleri ile tüketilmektedir. Modern tasarım yaklaşımlarında yapısal sisteme özel elemanlar dahil edilerek enerji tüketiminin bu elemanlarda yoğunlaşması sağlanarak yapısal elemanlar tarafından tüketilen enerji azaltılmaktadır.

Kurşun ekstrüzyon sönümleyici (KES) ise kurşunun yüksek plastik deformasyon kabiliyetinden yararlanarak önemli miktarda enerji sönümleyebilen özel elemanlardan biridir ve üç ana bileşenden oluşmaktadır: çelik shaft, çelik silindirik tüp ve bunların arasına doldurulmuş olan kurşun. Kurşunun kapalı bir hacimde bir daralıtım geçirilmeye zorlanmasıyla bir ekstrüzyon kuvveti ortaya çıkmaktadır. Daralıtımın oluşturulma biçimine göre iki farklı KES tasarımı yapılabilmektedir. Bu tasarımlar “çıkıntılı shaft tipi tasarım” (Robinson ve Greenbank, 1975) ve “girintili tüp tipi tasarım” (Robinson ve Greenbank, 1976) olarak anılmaktadır. Shaft hareket ettiğinde kurşun, shaft ile tüp arasında kalan daralıtılmış bölgeden geçmeye zorlanmakta ve bu yolla ciddi deformasyonlara maruz kalmaktadır. Kurşun, düşük akma dayanımı ve yüksek plastik deformasyon kapasitesine sahip çok yumuşak bir metal olduğundan, KES eşdeğer boyuttaki bir viskoz sönümleyiciden daha fazla enerji sönümleyebilmektedir. KES diğer enerji sönümleyici cihazlara göre de birçok avantaja sahiptir. Çevrimsel yüklemeye altında meydana gelen histeretik eğriler, yüklemeye çevrim sayısından bağımsız olarak sabit kalmaktadır. Ayrıca, yaşlanma etkilerinden ve çevresel faktörlerden etkilenmeye özelliklerinin yanı sıra, sönümleyici içerisinde bulunan kurşun deforme olmasının ardından orijinal durumuna dönebildiği için deprem sonrası cihazın yenisiyle değiştirilmesi gerekmemektedir (Çalım vd., 2023).

Bu çalışma kapsamında üretilen ve içerisinde bulunan kurşuna farklı miktarlarda sıkıştırma (öngerilme) uygulanan bir KES’in davranışı, laboratuvar ortamında çevrimsel yüklemeye altında test edilmiştir. Deneyleri gerçekleştirilen numunenin çıkıntısız bir shafta sahip olması nedeniyle sürtünme tipi bir sönümleyici mantığıyla çalışırken, bu durum kurşun ile çelik shaftın yüzeyi arasındaki sürtünme ilişkisinin belirlenmesi için tercih edilmiştir. Elde edilen sonuçlar en büyük sönümleyici kuvveti ve enerji sönüm kapasitesi gibi parametreler bakımından birbirleriyle karşılaştırılmış ve “kurşuna uygulanan sıkıştırma miktarı / tüp iç uzunluğu” oranının KES davranışına etkisi incelenmiştir.

DENEYSEL ÇALIŞMA

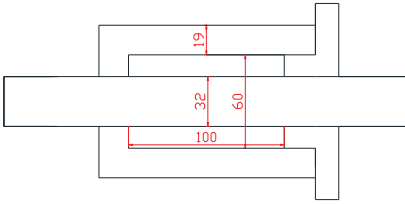
TÜBİTAK tarafından desteklenen “Kurşun Ekstrüzyon Sönümleyicilerin Boyutsal Optimizasyonu ve Bina Mimari ve İşletme Fonksiyonlarıyla Barışık Bir Güçlendirme Yaklaşımı” başlıklı araştırma projesi (1001-Proje kodu: 121M719) kapsamında, KES’i oluşturan bileşenlerin boyutlarının ve kurşun üzerine uygulanan öngerilmenin sönümleyici davranışı üzerindeki etkisi sayısal ve deneysel olarak analiz edilmiştir. Bu amaçla farklı “tüp et kalınlığı / tüp iç uzunluğu”, “çıkıntı çapı / shaft çapı”, “kurşuna uygulanan sıkıştırma miktarı / tüp iç uzunluğu” ve “tüp iç çapı / tüp iç uzunluğu” değerleri için analizler tekrarlanmıştır. Bu çalışmalar kapsamında cihazın performansı üzerinde en etkili parametrelerin kurşun üzerine uygulanan öngerilme miktarı (Soydan vd., 2024a) ve “çıkıntı çapı / shaft çapı” oranı olduğu gözlenmiştir (Soydan vd., 2024b). Farklı “kurşuna uygulanan sıkıştırma miktarı / tüp iç uzunluğu” oranlarına sahip dört adet KES üzerinde uygulanan çevrimsel deneyler ve elde edilen sonuçlar ise bu bölümde paylaşılmıştır.

Kurşun Ekstrüzyon Sönümleyici Numune

Üretimi gerçekleştirilen numune; shaft çapı (32 mm), tüp iç çapı (60 mm), tüp iç uzunluğu (100 mm), tüp et kalınlığı (19 mm) sabit kalmak üzere, shaft üzerinde çıkıntı olmaması ve kurşunda farklı seviyelerde öngerilme olması boyut ve özelliğine sahiptir (Şekil 1). Bu sönümleyicinin shaftında herhangi bir çıkıntı bulunmamaktadır. Sönümleyicide çıkıntısız shaft kullanımı, kurşun ile çelik shaftın

yüzeyi arasındaki sürtünme ilişkisinin belirlenmesi için tercih edilmiştir. Kapak tasarımı deneysel çalışmanın yürütüldüğü deney düzeneğine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Sönümleyiciyi oluşturan şaft, tüp, kapak ve pullar CK45 imalat çeliği malzemesi kullanılarak üretilmiştir. Kurşun metali laboratuvar ortamında KES içerisine yerleştirilmektedir. KES'te kullanılan kurşun 100 mm uzunluğa getirilmiştir.

Sönümleyicide sıkıştırma uygulaması, sönümleyicinin üretimi sırasında şaft üzerindeki kurşun uzunluğu sabit tutularak, sönümleyici kapağı ile kurşun arayüzüne farklı kalınlıkta pullar konularak gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla kurşuna uygulanan sıkıştırma miktarı ile sürtünme arasındaki ilişki farklı sönümleyicilerin üretimine gerek kalmadan belirlenebilecektir. 3 adet 0,5 mm ve 1'er adet 1,0, 1,5 ve 2,0 mm kalınlığında üretilen pullar kullanılarak kurşun üzerinde 6 farklı (0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 3,0 ve 4,0 mm) öngerilme seviyesi oluşturulmuştur. Diğer bir deyişle, tüp içerisindeki kurşun 100 mm uzunluğundan 99,5, 99,0, 98,5, 98,0, 97,0 ve 96,0 mm seviyelerine kadar sıkıştırılmıştır. Kurşun ile kapak arasına farklı kalınlıkta pullar tek tek veya bir arada yerleştirilmek suretiyle farklı öngerilme miktarları uygulanabilmektedir.



(a) Çıkıntısız şafta sahip KES boyutları
(ölçüler mm cinsindedir)

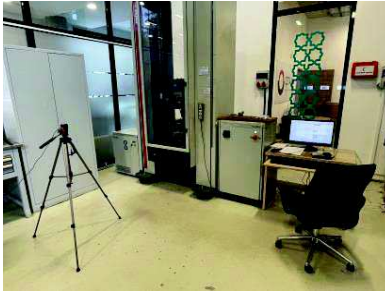


(a) KES bileşenleri
(sırasıyla çelik tüp, çıkıntısız şaft, pul, kapak)

Şekil 1. KES numune

Deney Düzeneği

Üretimi yapılmış KES numunesi, İTÜ Malzeme Test ve İnovasyon Laboratuvarları'nda (MATİL) test edilmiştir (Şekil 2). ± 600 kN yüklemeye kapasitesine sahip Zwick 600E model test cihazı kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler boyunca numunelere uygulanan kuvvet, şaft yer değiştirmesi ve çelik tüp üzerindeki sıcaklık değişimi kaydedilmiştir.

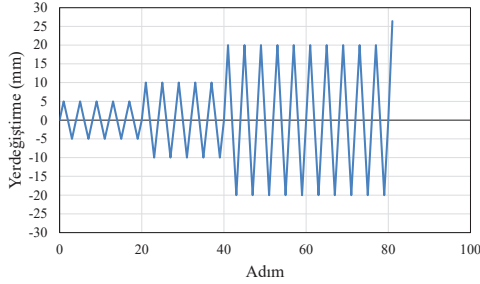


Şekil 2. Sönümleyici deney düzeneği

Yüklemeye Protokolü

Deneysel çalışmada TS EN 15129'da belirtilen protokolün kullanılması yoluna gidilmiştir. Bu aşamada, MATİL'de kullanılan deney düzeneğinde, deney süresince ulaşılan hız büyüklükleri, deney sistemi için oldukça büyük değerlere ulaştığından, sinüzoidal yer değiştirme fonksiyonu icra edilememiştir. Dolayısıyla, hız değerleri en fazla 2 mm/sn değerinde olacak şekilde, KES yer değiştirme kapasitesi de dikkate alınarak, yer değiştirme fonksiyonunun hedef değerleri ve hız

değerleri belirlenmiş ve testere dışı biçimli bir yerdeğiştirme protokolü kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar ± 5 mm, ± 10 mm ve ± 20 mm yerdeğiştirme hedefi ile sırasıyla 0,5 mm/sn, 1,0 mm/sn ve 2,0 mm/sn sabit hızları ile çevrimsel olarak gerçekleştirilmiştir. ± 5 mm ve ± 10 mm yerdeğiştirme hedeflerine sahip çevrimler 5 adet, ± 20 mm yerdeğiştirme hedefine sahip çevrimler ise 10 adet olarak uygulanmıştır. Bu çevrimler arasında yaklaşık 15 dakika bekleme süresi bırakılmıştır. Çevrimsel deneylerden sonra 26,4 mm yerdeğiştirme hedefine sadece çekme yönünde 0,05 mm/sn hızında etki uygulanarak deneysel çalışma tamamlanmıştır (Şekil 3).



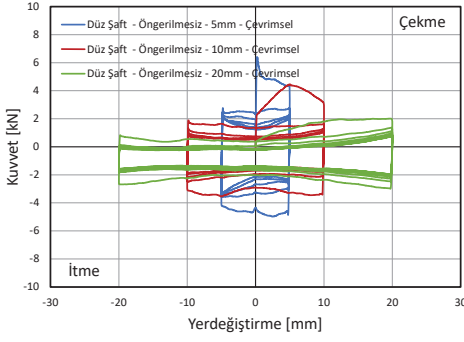
Şekil 3. Yükleme protokolü

Deney Sonuçları

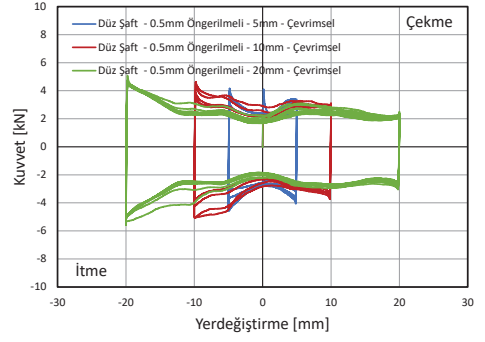
Bu aşamada üretilen bir adet KES kullanılarak öngerilmemiş durum için bir adet, altı farklı öngerilme seviyesi için birer adet deney olmak üzere toplam yedi adet deney gerçekleştirilmiştir ve kuvvet-yerdeğiştirme ilişkileri belirlenmiştir. 5 mm, 10 mm ve 20 mm yerdeğiştirme genişliğine sahip çevrimsel etki altında belirlenen kuvvet-yerdeğiştirme ilişkileri; farklı öngerilme (kurşun sıkıştırma) miktarları için Şekil 4'te karşılaştırılmıştır. Bunlara ek olarak, deneyler sırasında her bir yükleme adımında kaydedilen en büyük sönümleyici kuvveti değerleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Çıkıntısız şafta sahip KES'in çalışmasında sadece çelik şaft ile kurşun arasındaki sürtünme kuvveti etkin olmuş, böylelikle cihaz bir sürtünme sönümleyici gibi çalışmıştır. Kurşuna sıkıştırma uygulanmadığı ve sıkıştırmanın 0,5 mm, 1,0 mm ve 1,5 mm olduğu durumlarda ulaşılan en büyük kuvvet değerleri ortalama olarak yaklaşık $\pm 4,5$ kN iken, kurşuna 2,0 mm sıkıştırma uygulanması durumunda ulaşılan en büyük kuvvet değerleri ± 9 kN olarak belirlenmiştir. 3,0 mm ve 4,0 mm sıkıştırma uygulanması durumunda ulaşılan en büyük kuvvet değerleri ise sırasıyla ortalama olarak yaklaşık ± 45 kN ve ± 220 kN olarak hesap edilmiştir. Kurşuna uygulanan sıkıştırma miktarı sönümleyici kuvvetini ve kuvvet-yerdeğiştirme ilişkilerini etkilemektedir. Sıkıştırma miktarı arttıkça kuvvet artmakta ve kuvvet-yerdeğiştirme çevrimleri kararlı hale gelmektedir.

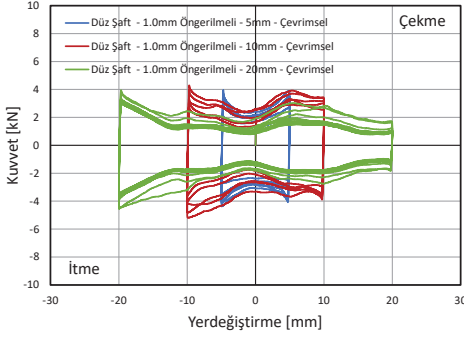
Deneysel çalışmada test edilen tüm numunelere 5 mm, 10 mm ve 20 mm çevrimsel yerdeğiştirme etkisi ve takiben 26,4 mm yerdeğiştirme hedefli statik benzeri çekme etkisi uygulanmıştır. Öngerilmenin bulunmadığı durumdan 2,0 mm sıkıştırma uygulanması ile oluşturulan öngerilmenin bulunduğu duruma kadar kuvvet 1-5 kN aralığında değişim göstermiştir. Kurşuna 3,0 mm sıkıştırma uygulandığında elde edilen kuvvet değeri yaklaşık 20 kN, 4,0 mm sıkıştırma uygulandığında ise elde edilen kuvvet değeri yaklaşık 130 kN mertebesindedir. 0,05 mm/s yükleme hızına sahip statik benzeri tek yönlü testlerde elde edilen kuvvet değerleri, 0,5 mm/s, 1,0 mm/s ve 2,0 mm/s hızlara ulaşılan çevrimsel yüklemelerin kullanıldığı testlerde elde edilen kuvvet değerlerine göre düşük kalmıştır. 0,0-2,0 mm sıkıştırma uygulanan durumda akma sonrası kuvvet değişim biçimi dalgalıdır ve yerdeğiştirme hedefine ulaşıldığında akma kuvvetinden daha büyük kuvvet değerlerine ulaşılmıştır. 3,0 mm ve 4,0 mm sıkıştırma uygulanan durumda oluşan akma sonrası kuvvet değişimi ise daha karardır ve yerdeğiştirme hedefine ulaşıldığında akma kuvvetinden daha küçük kuvvet değerleri elde edilmiştir. Bu durum çevrimsel testlerde de benzer şekilde ortaya çıkmıştır.



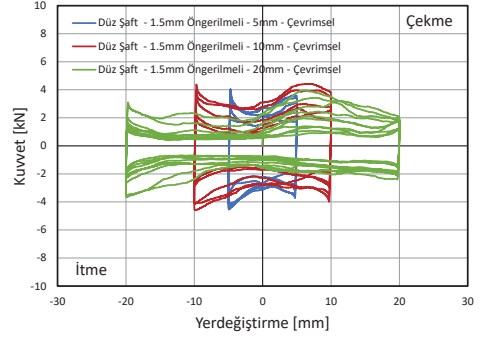
(a) uygulanan sıkıştırma miktarı = 0,0 mm



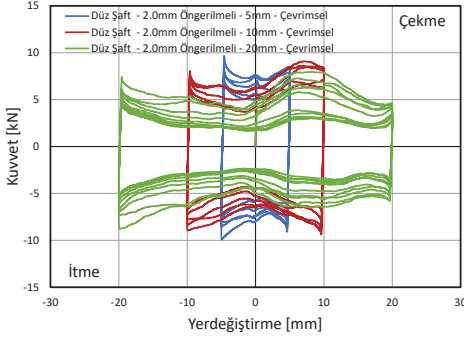
(b) uygulanan sıkıştırma miktarı = 0,5 mm



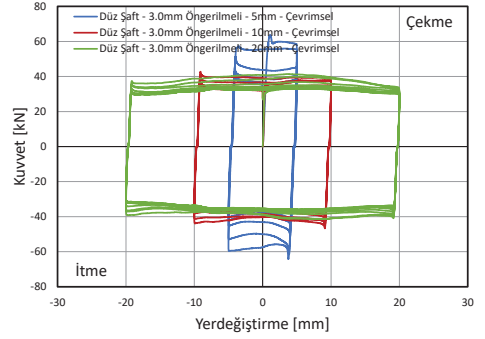
(c) uygulanan sıkıştırma miktarı = 1,0 mm



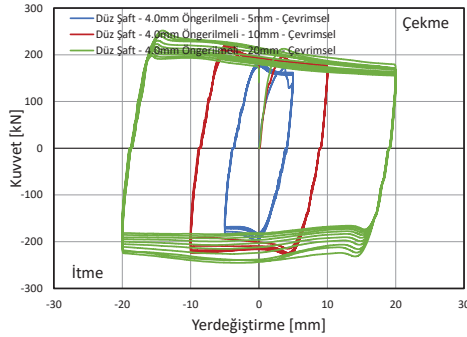
(d) uygulanan sıkıştırma miktarı = 1,5 mm



(e) uygulanan sıkıştırma miktarı = 2,0 mm



(f) uygulanan sıkıştırma miktarı = 3,0 mm



(g) uygulanan sıkıştırma miktarı = 4,0 mm

Şekil 4. Deneyler sonucunda elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri

Tablo 1. Çevrimsel yükleme sırasında kaydedilen en büyük sönümleyici kuvveti değerleri

Uygulanan sıkıştırma miktarı (mm)	Yerdeğiştirme genliği (mm)	Çekme yönünde en büyük kuvvet (kN)	İtme yönünde en büyük kuvvet (kN)
0,0	5,0	6,40	-4,98
	10,0	4,46	-3,55
	20,0	2,01	-3,00
0,5	5,0	4,16	-4,59
	10,0	4,63	-5,08
	20,0	5,08	-5,58
1,0	5,0	3,94	-4,38
	10,0	4,30	-5,19
	20,0	3,96	-4,56
1,5	5,0	4,05	-4,55
	10,0	4,43	-4,58
	20,0	3,96	-3,66
2,0	5,0	9,68	-9,92
	10,0	9,09	-9,36
	20,0	7,97	-8,78
3,0	5,0	63,57	-64,16
	10,0	42,73	-46,64
	20,0	41,39	-41,50
4,0	5,0	184,13	-196,11
	10,0	223,52	-229,70
	20,0	252,02	-245,32

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler, öngerilme (kurşunu sıkıştırma) miktarının kurşun ekstrüzyon sönümleyici (KES) davranışı üzerindeki önemli etkilerini ortaya koymuştur. Öngerilme miktarı arttıkça, cihazın kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi daha dikdörtgen bir şekle yaklaşmış, bu da enerji sönüm kapasitesinin artmasına yol açmıştır. Sonuç olarak, KES'in performansı, özellikle sönümleyici kuvvetleri ve enerji sönüm kapasitesi açısından, öngerilme miktarı ile doğru orantılı olarak gelişmiştir. Bu bulgular, KES geometrisinin optimize edilmesinin cihazın verimliliğini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir.

Teşekkür

Bu çalışmada yer alan deneyler TÜBİTAK tarafından desteklenerek (1001-Proje kodu: 121M719) İTÜ Malzeme Test ve İnovasyon Laboratuvarları'nda (MATİL) gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, bu desteklerden ötürü teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

- Çalım F, Güllü A, Soydan C, Yüksel, E (2023) "State-of-the-art review for lead extrusion dampers: Development, improvement, characteristics, application areas, and research needs," *Structures*, 58:105477.
- Robinson WH, Greenbank LR (1975) "Properties of an extrusion energy absorber," *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 8(3):187-191.
- Robinson WH, Greenbank LR (1976) "An extrusion energy absorber suitable for the protection of structures during an earthquake," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 4(3):251-259.
- Soydan C, Çalım F, Güllü A, Yüksel E (2024a) "Effect of prestressing level on a lead damper with straight shaft: An experimental investigation," *Proceedings of the 18th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation, and Active Vibration Control of Structures*.
- Soydan C, Çalım F, Güllü A, Yüksel E (2024b) "Experimental investigation of the effective parameters on the lead extrusion damper performance," *Engineering Structures*, 318:118714.
- TS EN 15129 (2018) Anti-Seismic Devices. CEN (European Committee for Standardization, Brüksel, Belçika.

BURKULMASI ÖNLENMİŞ ÇAPRAZLARIN SABİT GENLİKLİ DÜŞÜK ÇEVİRİMSSEL YORULMA PERFORMANSLARI

CONSTANT-AMPLITUDE LOW-CYCLE FATIGUE PERFORMANCE OF BUCKLING-RESTRAINED BRACES

Selin TAŞKIN ERKARSLAN¹, Barış SERİN² ve Mehmet Bakır BOZKURT³

ÖZET

Burkulması önlenmiş çaprazlar (BÖÇ'ler), geleneksel çelik çapraz elemanların basınç altında burkulma nedeniyle sahip olduğu sınırlı süneklik problemini ortadan kaldırarak, çekme ve basınç etkileri altında kararlı plastik deformasyon ile deprem enerjisinin sönmülmesini sağlar. Burkulması önlenmiş çelik çaprazlı sistemlerde (BÖÇÇ'lerde) tasarım yaklaşımı, deprem sonrası hasarın bu elemanlarda yoğunlaşması ve gerektiğinde kolaylıkla değiştirilebilmesi esasına dayanmaktadır. Bu bağlamda, elemanların değiştirilme kararı düşük çevrimsel yorulma kapasiteleri ile yakından ilişkilidir. Bu çalışmada, BÖÇ elemanlarının sabit genlikli düşük çevrimsel yorulma davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Toplam dört deney gerçekleştirilmiş; numuneler %1.0, %1.5, %2.0 ve %3.0 sabit eksenel birim şekildeğiştirme genlikleri altında test edilerek yorulma kapasiteleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, birim şekildeğiştirme genliğinin artmasıyla birlikte çevrim sayısının azaldığını ve yorulma hasarının daha hızlı biriktiğini göstermektedir. Ayrıca, düşük genlik seviyelerinde elemanların daha kararlı histeretik davranış sergilediği ve enerji sönmüleme kapasitelerinin arttığı belirlenmiştir. Anahtar Kelimeler: Burkulması önlenmiş çapraz, Düşük çevrimsel yüklemeye yorulması, sismik performans.

ABSTRACT

Buckling-restrained braces (BRBs) eliminate the limited ductility problem of conventional steel bracing members caused by buckling under compression, enabling stable plastic deformation under both tensile and compressive forces and thereby dissipating seismic energy effectively. In buckling-restrained braced frame (BRBF) systems, the design philosophy is based on concentrating damage in these braces and allowing their easy replacement after a seismic event. In this context, the decision to replace such members is closely related to their low-cycle fatigue capacity. In this study, the constant-amplitude low-cycle fatigue behavior of BRBs was experimentally investigated. A total of four tests were conducted, in which specimens were subjected to constant axial strain amplitudes of 1.0%, 1.5%, 2.0%, and 3.0 to determine their fatigue capacities. The results indicate that as the strain amplitude increases, the number of cycles to failure decreases and fatigue damage accumulates more rapidly. Furthermore, at lower strain amplitudes, the specimens exhibit more stable hysteretic behavior and higher energy dissipation capacity.

Keywords: Buckling-restrained braces, Low-cycle fatigue, Seismic performance.

¹ Doktora Öğrencisi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, selintaskin_1995@hotmail.com

² Doktora Sonrası Araştırmacı, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, baris.sern@gmail.com

³ Doç. Dr. Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, mehmet.bozkurt@cbu.edu.tr

GİRİŞ

Burkulması önlenmiş çaprazlar (BÖÇ'ler), yapısal sistemlerde deprem enerjisinin sönmülmesi ve yanal rijitliğin artırılması amacıyla yaygın olarak kullanılan gelişmiş histeretik sönmüleyicilerdir. Geleneksel çelik çapraz elemanların aksine, BÖÇ'ler basınç altında burkulmayı önleyen kılıf sistemi sayesinde çekme ve basınç yönlerinde benzer akma davranışı sergileyerek kararlı ve tekrarlanabilir bir enerji yutma kapasitesi sunar (Watanabe vd. (1988)). Bu özellikleri nedeniyle BÖÇ'ler, yüksek süneklik ve enerji sönmüleme kapasitesi gerektiren sismik tasarım uygulamalarında tercih edilmektedir.

Uluslararası tasarım yönetmelikleri tarafından yayımlanan AISC 341-22 ve Eurocode 8 kapsamında, BÖÇ elemanlarının belirli kümülatif inelastik deformasyon kapasitelerini sağlamasını şart koşmaktadır. Bununla birlikte, uzun süreli yer hareketleri ve artçı deprem dizileri, bu elemanların standart yüklemeye protokollerinin ötesinde karmaşık ve yüksek sayıda döngüsel yüklerle maruz kalmasına neden olabilmektedir. Bu tür etkiler, elemanlarda düşük çevrimsel yorulma kaynaklı hasar birikimine ve beklenmedik kırılmalara yol açabilmektedir (Uang ve Sabelli (2004); Tremblay vd. (2006)).

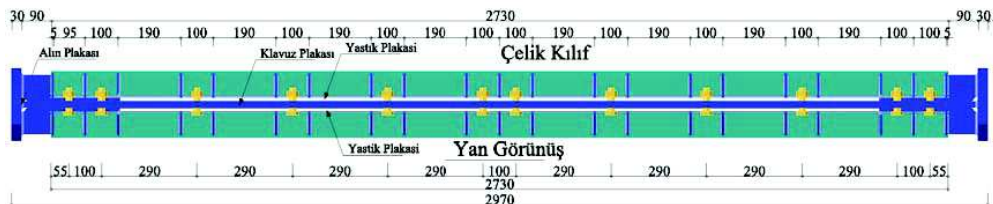
Literatürde BÖÇ davranışına yönelik çalışmalar büyük ölçüde maksimum yük taşıma kapasitesi, stabil histeretik davranış ve beton dolgulu kılıf sistemlerinin performansı üzerine yoğunlaşmıştır. Özellikle beton dolgulu BÖÇ sistemleri üzerine yapılan araştırmalar (Black vd. (2004); Takeuchi vd. (2010)), bu sistemlerin yüksek enerji sönmüleme kapasitesini ortaya koymuştur. Ancak bu tür sistemlerde meydana gelen hasarlar sonrasında çekirdek elemanın değiştirilmesi, uygulama açısından önemli zorluklar içermektedir.

Bu sınırlamaları aşmak amacıyla geliştirilen değiştirilebilir çekirdekli tamamı çelikten BÖÇ sistemleri, cıvatalı bağlantı detayları sayesinde hasar görmüş çekirdek elemanın hızlı ve ekonomik şekilde değiştirilmesine olanak tanımaktadır (Serin ve Bozkurt (2025)). Bu sistemler, özellikle performansa dayalı tasarım ve deprem sonrası hızlı onarım gereksinimleri açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Bu çalışmada, tamamı çelikten ve değiştirilebilir çekirdekli BÖÇ sistemlerinin düşük çevrimsel yorulma davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, S235JR çelik çekirdekli dört adet tam ölçekli numune, %1.0–%3.0 aralığında sabit genlikli yüklemeye protokolleri altında test edilmiş ve numunelerin sismik performansları sunulmuştur.

ÖNERİLEN BURKULMASI ÖNLENMİŞ ÇAPRAZ TASARIMI

Bu çalışmada kullanılan BÖÇ konsepti, Serin ve Bozkurt (2025) tarafından geliştirilen ve sismik performansı doğrulanan değiştirilebilir çekirdekli tamamı çelikten meydana gelen BÖÇ tasarımına dayanmaktadır. Toplam dört adet numunenin tamamında, çekirdek plakaları her deneyden sonra değiştirilmiş, ancak tek bir çelik kılıf sistemi tüm deney serisi boyunca tekrar tekrar kullanılmıştır. Önerilen tamamı çelikten kılıf mekanizması, ardışık ve şiddetli deprem yükleri altında dahi elastik davranışını koruduğu ve fonksiyonunu kaybetmeden defalarca kullanılabileceğini kanıtlamıştır.



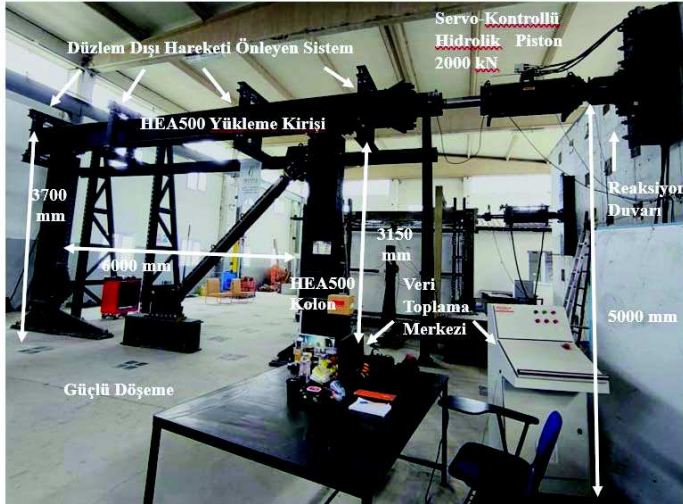
Şekil 1. BÖÇ Elemanı Detayı

DENEYSEL PROGRAM

Bu çalışma kapsamında, değiştirilebilir çekirdekli tamamı çelikten BÖÇ'lerin düşük çevrimsel yorulma davranışını belirlemek amacıyla kapsamlı bir deneysel program yürütülmüştür. Deneyler, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan çelik çerçeve sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Deney Düzeneği ve Ölçüm Ekipmanları

Numuneler, gerçekçi sınır koşullarını yansıtmak amacıyla, bir ucu çelik kolona, diğer ucu ise güçlü döşemeye ankraslanmış yüklemeye kirişine rijit bağlantılar ile monte edilmiştir. Önceki çalışmada (Serin ve Bozkurt (2025)) kullanılan düzenek ile aynı konfigürasyona sahip olan sistemde, numunelerin yatay düzlemle yaptığı açı 45° olarak sabitlenmiştir. Yanal yükler, 2000 kN yük ve ± 425 mm deplasman kapasitesine sahip servo-hidrolik aktüatör aracılığıyla uygulanmıştır. BÖÇ elemanının eksenel deformasyonlarını hassas bir şekilde ölçmek için numunenin her iki yüzeyine, lineer değişkenli deplasman ölçerler (LVDT'ler) yerleştirilmiştir. Veri toplama sistemi (Data Acquisition System), yük ve deplasman verilerini 4 Hz frekansında senkronize olarak kaydetmiştir.



Şekil 2. Manisa Celal Bayar Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Araştırma Laboratuvarı'nda yer alan deney düzeneği

Malzeme Özellikleri

Numunelerin imalatında kullanılan S235JR çeliğinin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, test edilen çekirdek plakalardan üç adet standart çekme numunesi alınmıştır. TS EN ISO 6892-1 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen malzeme testleri sonucunda elde edilen ortalama mekanik özellikler akma dayanımı (F_y): 289 MPa, çekme dayanımı (F_u): 432 MPa, kopma uzaması (A): %27 şeklindedir.

Yüklemeye Protokolleri

Bu çalışma kapsamında, burkulması önlenmiş çaprazlı çelik çerçevelerde kullanılan BÖÇ'lerin düşük çevrimsel yorulma performansları araştırılmıştır. Proje kapsamında toplamda dört adet numune üretilmiş ve bu numuneler %1.0 L_y , %1.5 L_y , %2.0 L_y , ve %3.0 L_y değerine karşılık gelecek deplasman değerleri altında çevrimsel yüklerle maruz bırakılmıştır.

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, dört adet değiştirilebilir çekirdekli BÖÇ numunesinin farklı yükleme protokolü altındaki histeretik davranışları, hasar modları ve enerji sönmüleme kapasiteleri sunulmuştur. Ayrıca, tüm deneylerde aynı kılıf sisteminin kullanılmasıyla sistemin yeniden kullanılabilirliği test edilmiştir.

Histeretik Davranış ve Çevrimsel Kararlılık

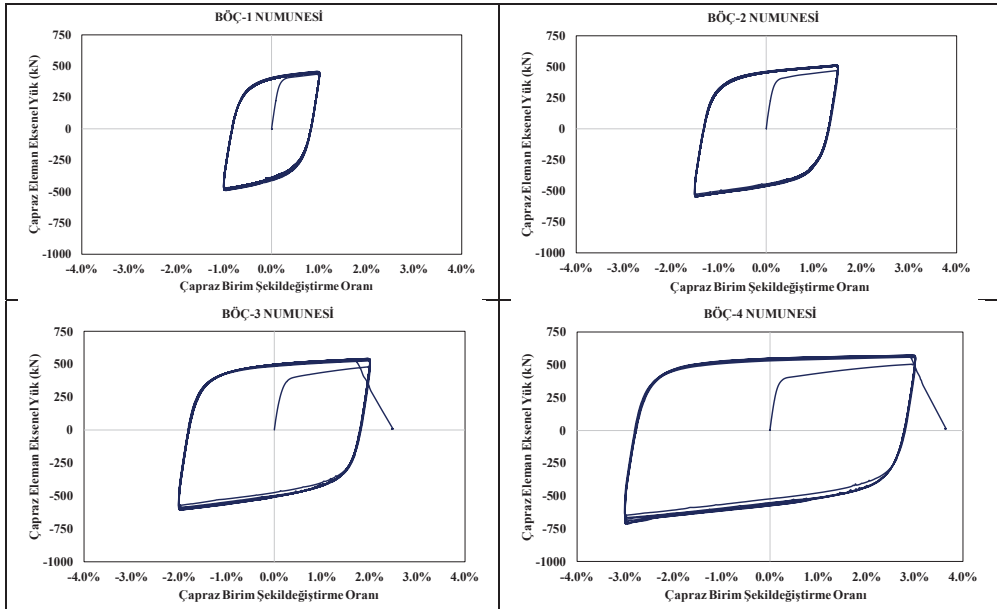
Tüm numuneler çekirdek plakasının kopmasına kadar kararlı ve dolgun histeretik döngüler sergilemiş; kinematik pekleşme davranışı tüm protokollerde gözlemlenmiştir. Ayrıca hiçbir numunede göçme gerçekleşene kadar herhangi bir rijitlik veya dayanım kaybı yaşanmamıştır. Beklendiği üzere, birim şekildeğiştirme genliği arttıkça yorulma ömrü azalmıştır.

Hasar Modları ve Kılıf Performansı

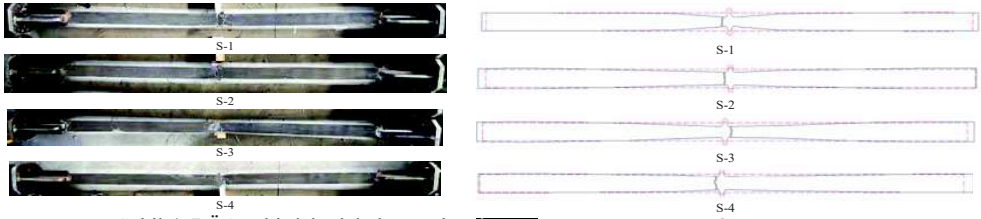
Deneilerin tamamında hasar, akma bölgesindeki metal yorulmasına bağlı kopma ile gerçekleşmiştir. Kopma öncesi kesit daralması gözlemlenmiş; bağlantı bölgelerinde veya elastik bölgelerde global burkulma ya da hasar meydana gelmemiştir. Tek bir kılıf sistemi, dört adet tam ölçekli yorulma testinde ardışık olarak kullanılmıştır. Yapılan incelemelerde kılıf elemanlarında kalıcı deformasyonlar tespit edilmemiştir. Bu durum, tamamı çelik elemanlardan oluşan kılıf tasarımının çoklu deprem senaryolarında dahi çelik çekirdek değişimiyle hizmet verebileceğini kanıtlamaktadır.

Enerji Sönmüleme Kapasitesi

Numuneler, AISC 341-22 standardında öngörülen minimum kümülatif plastik deformasyon kapasitesi ($200 \Delta_{by}$) sınırını tüm protokollerde büyük bir farkla aşmıştır.



Şekil 3. BÖÇ numunelerinin bazılarının histeretik eğrileri



Şekil 4. BÖÇ çekirdek plakalarının bazılarının deney sonrası deformasyon görselleri

SONUÇ

Bu çalışmada, sabit genlikli birim şekildeğiştirme deplasmanı altındaki BÖÇ'lerin sismik performansı sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, BÖÇ'lerin maruz kaldığı birim şekildeğiştirme genliği azaldıkça enerji sönmüleme kapasitelerinin arttığını göstermektedir. Ayrıca, artan şekildeğiştirme genlikleri altında numunelerde çevrim sayısının belirgin şekilde azaldığı ve düşük çevrimsel yorulma hasarının daha hızlı biriktiği gözlemlenmiştir.

Teşekkür

Bu proje Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2025/043 proje numarası ile desteklenmiştir. Bilimsel Araştırma Koordinasyon Birimi'ne desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- AISC 341-22 (2022) Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL
- Black CJ, Makris N, Aiken ID (2004) "Component testing, stability analysis and characterization of buckling-restrained braces," *Journal of Structural Engineering*, 130(6):880–894
- Eurocode 8 (2004) Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, European Committee for Standardization, Brussels
- Sabelli R, Mahin S, Chang C (2003) "Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling-restrained braces," *Engineering Structures*, 25(5):655–666
- Serin, B., Bozkurt, M. B. (2025). Development of replaceable core all-steel buckling-restrained braces. *Journal of Constructional Steel Research*, 225, 109247.
- Takeuchi T, Hajjar JF, Matsui R, Nishimoto K (2010) "Local buckling restraint condition for core plates in buckling restrained braces," *Journal of Structural Engineering*, 136(2):139–149
- Tremblay R, Bolduc P, Neville R, DeVall R (2006) "Seismic testing and performance of buckling-restrained bracing systems," *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(2):183–198
- Uang CM and Nakashima M (2004) "Steel Buckling-Restrained Braced Frames," *Steel Tips Report*, Structural Steel Educational Council, Moraga, CA
- Watanabe A, Hitomi Y, Saeki E, Wada A, Fujimoto M (1988) "Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube," *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, 719–724

TARİHİ TAŞ YIĞMA DUVARLARIN DÜZLEMDİŞİ DEPREM DAVRANIŞININ İYİLEŞTİRİLMESİ: LABORATUVAR TESTLERİ VE YAPI ÖRNEĞİ ÜZERİNDE DEĞERLENDİRME

STRENGTHENING OF THE OUT-OF-PLANE SEISMIC BEHAVIOR OF HISTORIC STONE MASONRY WALLS: LABORATORY TESTS AND ASSESSMENT OF A REFERENCE STRUCTURE

İbrahim Serkan MISIR¹, Gökhan YÜCEL², Fikret KURAN³, Cansu Beril ESER⁴ ve Ali Cihan DEMİR⁵

ÖZET

Tarihi yığma yapılarda deprem etkisi altında gözlenen en kritik hasar biçimlerinden biri düzlemdışı hasardır. Bu çalışma, tarihi yığma duvarların düzlemdışı deprem davranışının gömülü çelik halatlarla iyileştirilmesini deneysel ve sayısal olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Önerilen güçlendirme yöntemi, taşıyıcı sistemin yapısal davranışına katkı sağlarken duvarların özgün mimari görünümüne müdahaleyi sınırlayan bir yöntemdir. Bu kapsamda, referans alınan tarihi bir yığma yapının geometri, mekanik ve dinamik özelliklerini temsil edecek biçimde tasarlanan büyük ölçekli taş yığma duvar numunesinin yalın ve güçlendirilmiş durumları ele alınmıştır. Numune üzerinde dinamik ölçümler ve yarı çevrimsel düzlemdışı yüklemeye deneyleri gerçekleştirilmiştir; elde edilen taşıma gücü, yerdeğiştirme kapasitesi, rijitlik değişimi ve hasar gelişimi değerlendirilmiştir. Yalın ve hasar aldıktan sonra güçlendirilmiş durumlar için sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuş ve bu modeller deneysel bulgular kullanılarak doğrulanmıştır. Doğrulanmış modelleme yaklaşımı, referans tarihi yapının mevcut ve güçlendirilmiş durumlarının deprem davranışının incelenmesinde kullanılmıştır. Test sonuçları, gömülü çelik halat uygulamasının hasar görmüş duvarın düzlemdışı taşıma kapasitesini önemli ölçüde geri kazandırdığını, deformasyon kapasitesini ve yapısal bütünlüğünü artırdığını, buna karşılık başlangıç rijitliğini sınırlı oranda artırdığını göstermektedir. Sayısal modeller deneysel davranışı tamini edici doğrulukla temsil edebilmiş, yapı ölçeğinde gerçekleştirilen analizler düzlemdışı yapısal güvenliğin güçlendirme sonrasında iyileştigiğine işaret etmiştir. Bu yönüyle çalışma, deneysel bulgular ile yapı ölçeğindeki sayısal değerlendirmeyi birleştirerek koruma odaklı güçlendirme uygulamalarına katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tarihi yığma yapılar, Düzlemdışı deprem davranışı, Yarı-statik çevrimsel test, Gömülü çelik halat ile güçlendirme, Sayısal modelleme.

ABSTRACT

One of the most critical forms of damage observed in historic masonry structures under earthquake loading is out-of-plane damage. This study aims to experimentally and numerically investigate the strengthening of the out-of-plane seismic behavior of historic masonry walls by means of embedded steel cords. The proposed strengthening method contributes to the structural

¹ Prof. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, serkan.misir@deu.edu.tr

² Dr. Öğr. Üyesi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye, gokhanyucel@osmaniye.edu.tr

³ İnş. Yük. Müh., Promer Müşavirlik Mühendislik, Ankara, fkuran@promerglobal.com

⁴ Arş. Gör., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, cansu.eser@cbu.edu.tr

⁵ İnş. Yük. Müh., Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, alicihan.demir@ogr.deu.edu.tr

behavior of the load-bearing system while limiting intervention to the original architectural appearance of the walls. Within this scope, the unstrengthened and strengthened states of a large-scale stone masonry wall specimen, designed to represent the geometric, mechanical, and dynamic characteristics of a reference historic masonry structure, were considered. Dynamic measurements and semi-cyclic out-of-plane loading tests were carried out on the specimen; the resulting load-carrying capacity, displacement capacity, stiffness variation, and damage evolution were evaluated. Finite element models were developed for both the unstrengthened and strengthened-after-damage states, and these models were validated using the experimental findings. The validated modeling approach was then used to investigate the seismic behavior of the reference historic structure in its existing and strengthened conditions. The test results indicate that the embedded steel cord application significantly restored the out-of-plane load-carrying capacity of the damaged wall, improved its deformation capacity and structural integrity, while leading to only a limited increase in the initial stiffness. The numerical models were able to represent the experimental behavior with satisfactory accuracy, and the structural-scale analyses indicated that out-of-plane structural safety improved after strengthening. In this respect, the study contributes to conservation-oriented strengthening applications by combining experimental findings with structural-scale numerical assessment.

Keywords: Historical masonry structures, Out-of-plane seismic behavior, Quasi-static cyclic test, Strengthening with embedded steel cords, Numerical modeling.

GİRİŞ

Tarihi yığma yapılarda deprem etkisi altında en sık gözlemlenen hasar türlerinden biri, diyafram etkisinin yetersiz olduğu duvarlarda gelişen düzlemdışı davranıştır. Özellikle uzun serbest açıklığa sahip yığma duvarlarda düzlem içi taşıma gücüne ulaşılmadan önce düzlemdışı çatlama, devrilme ve duvar parçalarının ayrışması meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, tarihi yapılarda düzlemdışı davranışın deneysel olarak incelenmesi ve koruma ilkeleriyle uyumlu güçlendirme yöntemlerinin geliştirilmesi önem taşımaktadır.

Son yıllarda lifli polimerler (Demir vd., 2023), tekstil donatılı harç (Murano et al., 2025), çelik ağ (Biolzi et al. 2023) ve derz içi donatı (Corradi et al. 2020) gibi çeşitli güçlendirme yöntemleri önerilmiş olmakla birlikte, tarihi duvarın özgün yüzeyini kapatmayan, geri döndürülebilirliği yüksek ve duvarlar arası yük aktarımını iyileştiren müdahalelere ihtiyaç sürmektedir. Bu çalışma bu gereksinime, yatay ve düşey doğrultuda derzlere gömülen çelik halatlardan oluşan bir güçlendirme konfigürasyonu ile yanıt vermektedir. Araştırma projesi kapsamında geliştirilen konfigürasyon, bir yandan cephe duvarının eğilme ve devrilme davranışını sınırlamayı, diğer yandan cephe ve kanat duvarları arasında daha bütüncül bir yapısal davranış geliştirmeyi hedeflemektedir (Misir vd., 2020).

Bu bildiride, önce referans tarihi yapıyı temsil eden büyük ölçekli taş yığma duvar numunesinin yalın ve güçlendirilmiş durumlarına ait deneysel bulgular özetlenmekte, ardından laboratuvar numunesi için geliştirilen sonlu eleman modelinin doğrulaması sunulmakta ve son olarak doğrulanmış modelleme yaklaşımı referans tarihi yapının mevcut ve güçlendirilmiş durumlarının karşılaştırmalı değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Böylece deneysel ve numune ölçeğinde sayısal modellerle incelenen güçlendirme yöntemi yapısal ölçekte de sayısal olarak değerlendirilmektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Referans Tarihi Yapı ve Laboratuvar Numunesi

Çalışmada referans yapı olarak İzmir’de yer alan ve 1375 yılında inşa edilen İsa Bey Camii seçilmiştir (Şekil 1). Yapının avlu duvarları yaklaşık 1,80 m kalınlığında çok cidarlı taş yığma duvarlardan oluşmaktadır. İncelenen batı avlu duvarı yaklaşık 15 m serbest yüksekliğe ve yaklaşık 33 m düzlemdışı doğrultuda desteksiz uzunluğa sahiptir. Endoskopik incelemeler, duvarın alt yarısında çift cidarlı, üst yarısında ise moloz dolgulu üç cidarlı bir morfolojiye sahip olduğunu

göstermiştir (Binda vd., 2005). Düzlemdışı davranış bakımından en elverişsiz alt sistem bu batı duvarı olduğundan deneysel ve sayısal çalışmalar bu alt sistem üzerine odaklanmıştır. Yerinde basınç (flat-jack) deneylerinde ortalama basınç dayanımı 2.3 MPa ve elastisite modülü 4535 MPa olarak belirlenmiştir (Misir vd., 2022). Dinamik ölçümlerde ise birinci doğal frekans 3.91 Hz olarak bulunmuştur (Ozcelik vd., 2022).

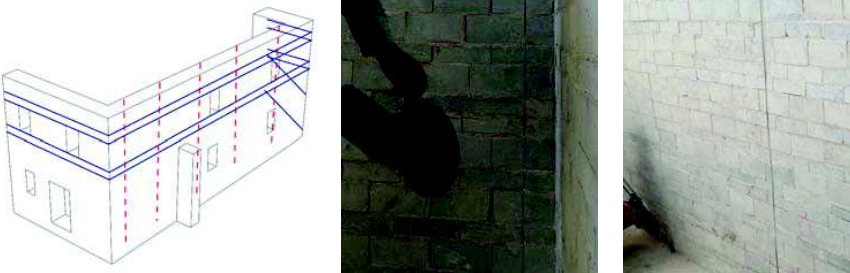
Laboratuvar numunesi, referans duvarın geometrik ve dinamik özelliklerini temsil edecek şekilde 1/6 ölçekli tasarlanmıştır (Şekil 1). Numune yaklaşık U biçimli planda düzenlenmiş; ön duvar, sol enine duvar ve sağ tarafta kütle bloğu ile referans yapıdaki sınır koşulları temsil edilmiştir. Numunenin alt yarısında çift cidarlı, üst yarısında ise moloz dolgulu üç cidarlı bir kesit düzeni kullanılmıştır. Böylece hem referans duvarın morfolojisi hem de düzlemdışı davranışı etkileyen sınır koşulları laboratuvar ölçeğinde yeniden üretilmiştir. Numunede kullanılan mermer taş birimlerin ortalama basınç ve çekme dayanımları sırasıyla 94.21 MPa ve 14.60 MPa'dır. Harç için doğal hidrolik kireç esaslı bir karışım seçilmiş; basınç dayanımı 2.40 MPa, çekme dayanımı 0.41 MPa, başlangıç kayma dayanımı 0.35 MPa olarak belirlenmiştir. Üst kısımdaki moloz dolgunun ortalama basınç dayanımı 3.53 MPa'dır (Yucel vd., 2026).



Şekil 1. Referans tarihi yapı ve laboratuvar numunesi

Gömülü Çelik Halatla Güçlendirme

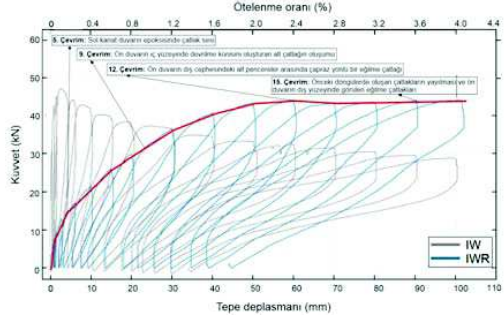
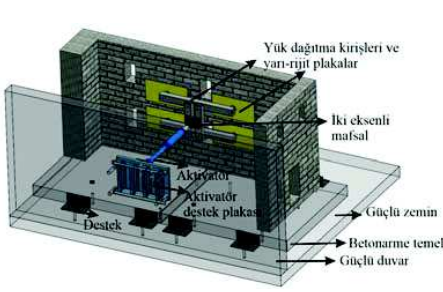
Güçlendirme, hasar görmüş laboratuvar numunesine yatay ve düşey doğrultuda derz içine gömülen çelik halatların uygulanması ile gerçekleştirilmiştir (Yucel vd., 2026). Yatay halatlar, ön ve enine duvarları köşelerden dolaşarak birbirine bağlamakta ve düzlemdışı yüklerin enine duvarlara güvenli biçimde aktarılmasını amaçlamaktadır. Düşey halatlar ise ön duvarın iç yüzünde yer almakta, düşey derzlerden ve yer yer taş blok içinden geçerek temele ankrajlanmakta ve tabandaki çekme gerilmelerine karşı çalışmaktadır. Güçlendirme şeması (Şekil 2), beş adet düşey ve dört adet yatay halattan oluşmaktadır; ayrıca numunenin sağ enine duvarında burulma etkilerini sınırlamak amacıyla çapraz halatlar da kullanılmıştır. Halatlar 4 mm çapındadır; akma yükü 8.17 kN, kopma yükü 10.06 kN ve elastisite modülü 88.51 GPa'dır. Uygulamada yaklaşık 20 mm derinliğinde derz açılmış, test takvimi dikkate alınarak hızlı priz alan polyester esaslı ankraj reçinesi tercih edilmiştir. Ancak tarihi yapılarda aynı düzenin, yüksek dayanımlı ve geri döndürülebilir inorganik bağlayıcılarla uygulanması daha uygundur.



Şekil 2. Güçlendirme şeması ve halatların duvar içerisine yerleştirilme aşamaları

Deneyel Program

Numunenin yalın ve güçlendirilmiş durumları için önce ortamsal titreşim testleri, ardından yarı çevrimsel düzlemdışı yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Dinamik tanımlama için sensörler numunenin ön ve enine duvarlarında ve düzlemdışı doğrultularda yerleştirilmiştir; kayıtlar 1000 Hz örnekleme frekansında yaklaşık 15 dakika süreyle alınmış ve geliştirilmiş frekans alanı ayrıştırma yöntemi (EFDD) yöntemiyle değerlendirilmiştir. Yalın numunenin birinci doğal frekansı 26.37 Hz (Cauchy ölçeği göz önüne alındığında referans yapıyla uyumludur) ve hasarlı durumdaki karşılığı 13.76 Hz olarak belirlenmiştir. Güçlendirme sonrası bu değer 14.87 Hz'ye yükselmiş, böylece hasarlı duruma göre yalnızca sınırlı bir başlangıç rijitliği geri kazanımı gözlenmiştir.



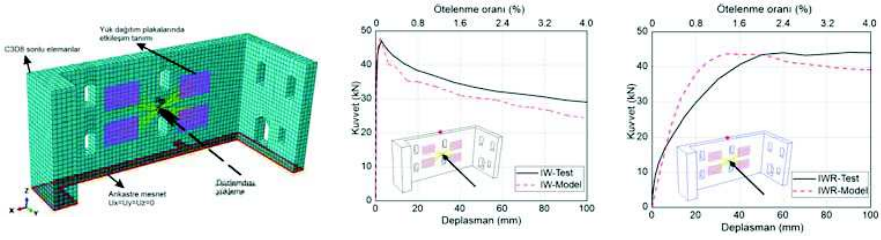
Şekil 3. Test ortamı, yalın (IW) ve güçlendirilmiş (IWR) numuneler için çevrimsel yükleme grafiği

Düzlemdışı yarı çevrimsel yükleme testlerinde yatay yük hidrolik aktüatör ile ön duvarın iç yüzünden ve dört noktadan uygulanmıştır. Yükleme noktalarında gerilme yığılmalarını önlemek için yarı rijit ahşap plakalar kullanılmıştır. Yalın numune testinde baskın davranış birleşik devrilme mekanizması şeklinde gelişmiş; ön duvarın iç yüzünde devrilme konisi çatlağı, dış yüzünde eğilme kaynaklı diyagonal çatlaklar, sol enine duvarda ayrılma ve sağ enine duvarda burulma çatlağı gözlenmiştir. Güçlendirme sonrasında davranış daha kompakt bir eğilme biçimine dönüşmüş, köşe ayrılmaları belirgin biçimde sınırlandırılmış ve kutu davranışı iyileşmiştir. Deneylerde yalın numune için en büyük düzlemdışı yük 47.50 kN, artık taşıma gücü 28.75 kN ve süneklik indisi 26 mm; güçlendirilmiş numune içinse sırasıyla 44.25 kN, 42.74 kN ve 44 mm olarak elde edilmiştir. Hasar durumları ve performans limitleriyle ilişkilendirilen ötelenme oranları yalın durumda 0.4/1.2/3.2, güçlendirilmiş durumda ise 0.8/2.2/4.0 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, gömülü çelik halat uygulamasının özellikle hasarlı numunenin artık taşıma gücü ve deformasyon kapasitesini belirgin şekilde artırdığını göstermektedir.

SAYISAL MODELLEME

Laboratuvar Numunesinin Sayısal Modeli

Yalın ve güçlendirilmiş numuneler için üç boyutlu makro ölçekte sonlu eleman modelleri Abaqus yazılımında geliştirilmiştir (Şekil 4). Modellerde sekiz düğüm noktalı katı elemanlar kullanılmış, ağ boyutu 100 mm olarak seçilmiştir. Yükleme, deney düzeneğine benzer biçimde dört yükleme yüzeyini bağlayan bir referans nokta üzerinden, yapısal dağıtıcı bağ kuralı ile uygulanmıştır. Taban sınır koşulu ankastre kabul edilmiştir. Taş ve harcın bileşik davranışı benzer yapılar için literatürde benimsenen (Valente ve Milani, 2019; Mısı ve Yucel, 2023) *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) modeli ile temsil edilmiştir (Abaqus, 2017). Güçlendirilmiş modelde çelik halatlar iki düğüm noktalı çubuk elemanlar ile tanımlanmış ve deneylerde halat ile yığma arasında ayrılma gözlenmediğinden gömülü bölge kısıtı kullanılarak çubuklar katı gövdeye bağlanmıştır. Modelin doğrusal kalibrasyonu ortamsal titreşim test verileriyle, doğrusal olmayan kalibrasyonu ise malzeme deneyleri ve yük-deplasman eğrileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

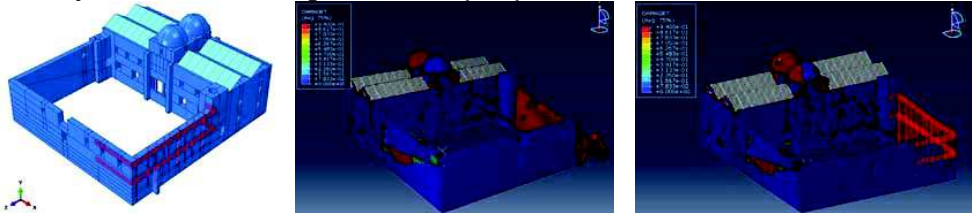


Şekil 4. Numunenin sayısal modeli ve yük-deplasman eğrisinin deneysel sonuçlar ile kıyaslanması

Sayısal sonuçlar hem yalın hem de güçlendirilmiş numuneler için deneysel yük-deplasman eğrilerini ve çatlak dağılımlarını tutarlı bir şekilde temsil etmiştir. Yalın numunedeki tepe sonrası ani dayanım kaybı ile güçlendirilmiş numunedeki daha sünek davranış modellenebilmiştir. Bununla birlikte, yük boşalma eğrisinde kalıcı yer değiştirmelerin sayısal modelde tam olarak yakalanamadığı görülmüştür. Bu farkın temel nedeni, deneylerde oluşan büyük çatlakların ve yeniden oturma davranışının süreksizlik tabanlı bir mekanizma içermesi, makro süreklilik yaklaşımının ise bu etkiyi sınırlı düzeyde temsil edebilmesidir. Buna rağmen model, önerilen güçlendirme yönteminin taşıma mekanizmasına etkisini güvenilir biçimde ortaya koyabilmiştir.

Referans Tarihi Yapının Mevcut ve Güçlendirilmiş Durumlarının Değerlendirilmesi

Doğrulan modelleme yaklaşımı, referans tarihi yapının mevcut ve güçlendirilmiş durumlarının sayısal modellenmesinde ve karşılaştırmalı incelenmesinde kullanılmıştır. Yapı ölçeğindeki modellemede Şekil 5'te verilen güçlendirme şeması uygulanmış ve yapı ölçeğine uygun olacak şekilde 32 mm çapında halatlar eklenmiştir. 2020 Samos depreminin ivme kayıtları DD1 seviyesinde ölçeklenerek sayısal modeller üzerinde zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, yapının mevcut durumunda batı avlu duvarında göçme durumuna ulaşılmış fakat güçlendirilmiş senaryoda yüksek ötelenmeler ve ileri hasar gelişimine karşın duvarın stabilitesini koruduğu görülmüştür. Böylece laboratuvar ölçeğinde doğrulanmış düzlemsiz yönde davranış gelişiminin yapı ölçeğinde de gösterilebileceği ve güçlendirme sonrasında düzlemsiz güvenliğin önerilen yöntemle artırılabilceği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 5. Yapının mevcut ve güçlendirilmiş durumlarının karşılaştırılması

SONUÇLAR

Bu çalışmada, tarihi taş yığma bir yapıya ait bir duvarın düzlemsiz deprem davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiş, gömülü çelik halatlar kullanılarak yapılan güçlendirmenin etkinliği değerlendirilmiştir. Referans yapının saha testleri ile belirlenen geometri, malzeme ve dinamik özellikleri laboratuvar numunesine başarılı şekilde aktarılmış, yalın numunenin birinci modu ile referans duvar arasında benzeşim kuralları açısından yakın benzerlik olduğu gösterilmiştir.

Yarı çevrimsel testler, gömülü çelik halatların hasarlı duvarın düzlemsiz taşıma gücünü geri kazandırdığını, artık taşıma gücünü önemli ölçüde artırdığını ve süneklik sağlayarak yapısal bütünlüğü iyileştirdiğini göstermiştir. Güçlendirme sonrasında yapısal davranışın birleşik devrilmeden daha kontrollü bir eğilme davranışına yöneldiği, köşe ayrılmalarının ve ani dayanım kayıplarının sınırlanabileceği gösterilmiştir. Ortamsal titreşim testleri başlangıç rijitliğinde yalnızca sınırlı bir toparlanmaya işaret etse de bu durumun, öngerihsiz gömülü çelik halatla güçlendirme

yönteminin etkisinin küçük genlikli titreşim bölgesinde fark edilemeyeceği gerçeği ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Yapıda deformasyonların oluşmaya ve çatlakların açılmaya başladığı ötelemeli davranış bölgesinde ise önerilen güçlendirme yönteminin olumlu etkisinin daha belirgin hale geldiği testlerle gösterilmiştir.

Geliştirilen duvar sonlu eleman modellerinin, hem yük-deplasman eğrilerini hem de hasar dağılımlarını deneysel bulgularla uyumlu biçimde temsil ettiği doğrulanmıştır. Aynı yaklaşım referans tarihi yapının seçilen duvarına uygulanmış, gömülü çelik halatların yapı ölçeğinde de düzlemdışı güvenliği iyileştirdiği ve bütüncül bir yük aktarımı sağladığı gösterilmiştir. Koruma ilkeleriyle uyumlu bir müdahale seçeneği sunan önerilen yöntem, tarihi yığma duvarların düzlemdışı davranışının iyileştirilmesinde uygulanabilir ve umut verici bir çözüm olarak değerlendirilmiştir.

Teşekkür

Sunulan araştırma AFAD Ulusal Deprem Araştırma Programı tarafından desteklenmiş [Proje No: UDAP-C-16-05] ve Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Mühendisliği Laboratuvarında yürütülmüştür. Yapı malzemelerinin önemli kısmının tedariki ve numunelerin yapımı Kordon Restorasyon A.Ş. tarafından üstlenilmiştir. Yazarlar testler sırasındaki yardımları için İbrahim Gündoğan, Umut Yücel, Erkan Durmazgezer, Çağdaş Gürbüz, Ege Yeşilbaş, Ercan Tuna, Emine Daş, Alperen Gülen, Cemerk Arar, Baran Selimoğlu ve Cem Göksoy'a teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

- Abaqus. (2017) Dassault Systemes Simulia Corp.: Johnston, RI, USA.
- Biolzi L, Cattaneo S, Crespi P, vd (2023) Diagonal compression cyclic testing of unreinforced and reinforced masonry walls. *Constr Build Mater* 363: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129839>
- Binda, L., Cardani, G., Saisi, A., & Groot, C. (2005, January). A classification of structures and masonries for the adequate choice of repair. In International RILEM Workshop on Repair Mortars for Historic Masonry (pp. 20-34). Delft, The Netherlands: RILEM, International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures.
- Corradi M, Speranzini E, Bisciotti G (2020) Out-of-plane reinforcement of masonry walls using joint-embedded steel cables. *Bulletin of Earthquake Engineering* 18:4755–4782. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00875-3>
- Demir C, Comert M, İnci P, vd (2023) Seismic Retrofitting Of the 19TH Century Hirka-i Serif Mosque Using Textile Reinforced Mortar. *International Journal of Architectural Heritage* 17:1364–1387. <https://doi.org/10.1080/15583058.2022.2038305>
- Misir, I. S., Özcelik, O., Durmazgezer, E., Yücel, U., Amaddeo, C., Kuran, F., Tuna, E., Yücel, G., & Youssouf, I. B. (2020). Türkiye'deki mevcut tarihi ve yakın dönem yığma binalarda düzlemdışı doğrultudaki deprem etkileri için hasar limitlerinin tespiti (AFAD-UDAP Proje No. UDAP-C-16-05) [Araştırma raporu]. AFAD-UDAP.
- Misir IS, Yücel G (2023) Numerical Model Calibration and a Parametric Study Based on the Out-Of-Plane Drift Capacity of Stone Masonry Walls. *Buildings* 13: <https://doi.org/10.3390/buildings13020437>
- Misir IS, Yücel G, Kuran F, et al (2022) Experimental out-of-plane damage limits of historical stone masonry walls. *Constr Build Mater* 333:127098. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127098>
- Murano A, Barontini A, Ortega J, vd (2025) Experimental study of the out-of-plane behaviour of two-leaf brick masonry walls in different condition: Unstrengthened, strengthened and repaired. *Eng Struct* 343: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.121118>
- Özcelik O, Misir IS, Yücel U, vd (2022) Model updating of Masonry courtyard walls of the historical Isabey mosque using ambient vibration measurements. *J Civ Struct Health Monit* 12:1157–1172. <https://doi.org/10.1007/s13349-022-00610-3>
- Valente, M., & Milani, G. (2019). Damage assessment and collapse investigation of three historical masonry palaces under seismic actions. *Engineering Failure Analysis*, 98, 10-37.
- Yücel, G., Misir, I. S., Kuran, F., & Eser, C. B. (2026). Experimental and numerical investigation of the out-of-plane behavior and strengthening of a historic stone masonry wall replica using embedded steel cords. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-33.

YAPISAL DİNAMİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİNDE VIDEO ÇÖZÜMLEME YÖNTEMİ UYGULAMALARI

APPLICATION OF VIDEO-BASED MEASUREMENT METHOD FOR IDENTIFYING STRUCTURAL DYNAMIC PROPERTIES

Furkan ÇALIM¹, Emre GÖNÜLCÜ², Mehmet Ali TOPRAK³ ve Ercan YÜKSEL⁴

ÖZET

Bu çalışma kapsamında, yapıların dinamik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla video çözümleme tabanlı bir ölçüm yöntemi geliştirilmiş ve yöntemin doğruluğu sarsma masası deneyleri ile test edilmiştir. Bu amaç doğrultusunda Python tabanlı bir yazılım oluşturulmuş, nesne takip algoritmaları ve şablon eşleme yöntemleri kullanılarak yapının yerdeğiştirme tepkileri kare bazında elde edilmiştir. Beş farklı kütle ve iki farklı plastisite durumuna sahip toplam 10 adet tek serbestlik dereceli sistem ile üç farklı kat sayısına ve iki farklı plastisite durumuna sahip toplam 6 adet çok serbestlik dereceli sistem deneysel olarak incelenmiştir. Video çözümleme yöntemi ile elde edilen sonuçlar ivmeölçer ve yerdeğiştirmeölçer gibi konvansiyonel ölçüm cihazlarından alınan verilerle karşılaştırılmış; yöntem doğruluğu hata oranları ile faz ve genlik uyumları açısından değerlendirilmiştir. İncelenen örneklerde, video ile ölçülen maksimum yerdeğiştirme değerlerinin sensör verilerine göre ortalama yaklaşık %10 sapma ile elde edildiği belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, video çözümleme yöntemlerinin hem laboratuvar deneyleri sırasında hem de saha uygulamalarında yapıların dinamik özelliklerinin belirlenmesi için uygulanabilir ve ekonomik bir yöntem olduğunu göstermektedir. Geliştirilen yöntemin yapı sağlığı izlemesi, hasar tespiti ve performans değerlendirmesi gibi birçok mühendislik uygulamasında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Video Çözümleme, Yapı Dinamiği, Temassız Ölçüm, Sarsma Masası, Nesne Takibi

ABSTRACT

Within the scope of this study, a video-based measurement method was developed to determine the dynamic characteristics of structures, and its accuracy was validated through a series of shaking table tests. For this purpose, a Python-based software tool was developed, and displacement responses were extracted frame-by-frame using object-tracking algorithms and template-matching techniques. A total of 10 single-degree-of-freedom systems with five different mass configurations and two different plasticity conditions, as well as six multi-degree-of-freedom systems with three different numbers of stories and two different plasticity conditions, were experimentally investigated. The results obtained from the video-based measurement method were compared with data acquired from conventional measurement devices (e.g., accelerometers and displacement transducers). The accuracy of the method was evaluated in terms of percentile differences in peak response values, as well as phase and amplitude compatibility. For the examined cases, the measured maximum displacement values showed an average deviation of approximately 10% relative to the sensor data. The findings indicate that video-based analysis methods constitute a practical and cost-effective approach for determining the dynamic characteristics of structures, both in laboratory experiments and field applications.

¹ Araş. Gör., İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, calimf@itu.edu.tr

² Araş. Gör. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, gonulcu@itu.edu.tr

³ Araş. Gör., İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, toprakmehm@itu.edu.tr

⁴ Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, yukselerc@itu.edu.tr

It was concluded that the proposed method can be utilized in various engineering applications, including structural health monitoring, damage detection, and performance assessment.

Keywords: Vision-Based Measurement, Structural Dynamics, Non-Contact Sensing, Shaking Table, Object Tracking

GİRİŞ

Günümüzde yapıların dinamik özelliklerinin belirlenmesi, deprem mühendisliği alanında (özellikle yapı sağlığı izleme ve onarım/güçlendirme süreçlerinde) kritik bir rol oynamaktadır. Geleneksel olarak, sahada yapıların dinamik özelliklerinin belirlenmesi çoğunlukla yapıya doğrudan temas eden sensörler (ivmeölçerler, yerdeğiştirmeölçerler, şekildeğiştirmeölçerler, vb.) ile gerçekleştirilmektedir. Ancak sensör tabanlı ölçüm sistemlerinin yüksek maliyetleri, kurulum zorlukları ve uygun sınırlı ölçüm noktalarının bulunması gibi dezavantajları, araştırmacıları daha esnek ve yapıya herhangi bir müdahale veya sensör kurulumu gerektirmeyen ölçüm yöntemlerine yönlendirmiştir (Yang vd., 2017; Xiao vd., 2020; Kim vd., 2025).

Son yıllarda, video tabanlı analiz yöntemleri, yapısal dinamik davranışın belirlenmesinde yenilikçi ve uygun maliyetli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Gelişen kamera teknolojileri ve bilgisayarla görme algoritmaları sayesinde, sıradan akıllı telefonlar veya kameralarla kaydedilen videolar üzerinden yapıların yerdeğiştirme, hız, ivme ve modal parametreleri yüksek doğrulukla elde edilebilmektedir (Karameşe vd., 2022; Yang vd., 2024; Liu vd., 2024). Video analizinin bir diğer avantajı ise, yapıya herhangi bir fiziksel müdahale gerektirmemesi ve geniş alanlarda çok sayıda ölçüm noktasının eşzamanlı olarak izlenebilmesidir (Silva vd., 2022).

Video çözümleme yöntemleri, özellikle çok serbestlik dereceli sistemlerde, yüksek çözünürlükte ve temassız olarak dinamik tepkilerin ölçülmesine olanak tanımaktadır (Bhowmick ve Nagarajaiah, 2020; Silva vd., 2020). Ayrıca, bu yöntemler sayesinde, geleneksel sensörlerle erişilmesi zor olan tam alan (full-field) titreşim modları ve hasar tespiti gibi ileri düzey analizler de mümkün hale gelmiştir. Düşük çözünürlüklü veya gürültülü videolarda dahi gelişmiş görüntü işleme ve derin öğrenme tabanlı algoritmalar ile anlamlı dinamik özellikler elde edilebilmektedir (Colombo vd., 2025; Luan vd., 2021). Ayrıca, video tabanlı ölçüm tekniklerinin doğruluğu ve güvenilirliği, laboratuvar ve saha uygulamalarında ivmeölçer veya lazer vibrometre gibi geleneksel yöntemlerle karşılaştırmalı olarak test edilmiş ve çoğu durumda yüksek uyum sağlandığı gösterilmiştir (Ghandil vd., 2021; Wang vd., 2022).

Bu çalışma kapsamında ise, özgün bir video çözümleme yöntemi geliştirilerek sarsma masası deneylerinde doğruluğunun ve uygulanabilirliğinin test edilmesi planlanmıştır. Bu amaçla, öncelikli olarak nesne takip algoritmalarını kullanarak dinamik hareketleri analiz edebilen Python tabanlı bir programın geliştirilmesi hedeflenmiştir.

YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında, görüntü temelli bir ölçüm ve video çözümleme yöntemi geliştirilmiş olup, bu yöntemin doğruluğu ve mühendislik uygulamalarında kullanılabilirliği birtakım sarsma masası deneyleri ile test edilmiştir. Bu amaç doğrultusunda, ölçüm yapılmak istenen sistem veya numune üzerine yerleştirilen referans işaretleyicisinin tespiti ve takibi için geliştirilen Python tabanlı programda şablon eşleme (template-matching) yöntemi kullanılmıştır. Ardişık karelerde tespit edilen işaretçi konumları analiz edilerek zamanla değişen yerdeğiştirmeler hesaplanmıştır. Bu piksel temelli yerdeğiştirmeler, video içerisinde yer alan bilinen bir referans uzunluğu yardımıyla gerçek ölçülere dönüştürülmüştür. Bu yöntem aşağıda özetlendiği şekilde uygulanmaktadır:

1- Video okuma ve karelere erişim: Seçilen video dosyası kare kare okunur.

```
cap = cv2.VideoCapture(file_path)
ret, frame = cap.read()
```

2- Şablon eşleme (Template-matching): Numune üzerine yapıştırılan belirgin bir işaretleyiciye ait görsel, her bir video karesinde aranır. Bunun için OpenCV'nin `cv2.matchTemplate()` fonksiyonu kullanılır.

$res = cv2.matchTemplate(img_gray, template, cv2.TM_CCOEFF_NORMED)$
 $loc = np.where(res \geq threshold)$

3- Piksel-metre dönüşümü: İlk karedeki şablon yüksekliği kullanılarak 1 pikselin metre karşılığı hesaplanır (gerçek yükseklik: 5 cm).

$pix_length = 0.05 / h1$ # $h1$: şablon yüksekliği (piksel cinsinden)

4- Yerdeğiştirme hesabı: Her karede tespit edilen konumlar (x, y) bileşenlerine ayrılır ve başlangıç karesine göre fark alınarak yerdeğiştirme hesaplanır.

$dispIx = (avg_PIx - point1_x[0]) * pix_length$
 $dispIy = (avg_PIy - point1_y[0]) * pix_length$

5- Sonuçların kaydedilmesi ve görselleştirilmesi

Geliştirilen görüntü temelli ölçüm ve video çözümleme yönteminin validasyonu için farklı dinamik özelliklere sahip temsili yapılar üzerinde birtakım sarsma masası deneyleri gerçekleştirilmiştir. Beş farklı kütle ve iki farklı plastisite durumunun çalışıldığı toplam 10 adet tek serbestlik dereceli (TSD) numune ile üç farklı kat sayısı ve iki farklı plastisite durumunun çalışıldığı toplam 6 adet çok serbestlik dereceli (ÇSD) numune bu çalışma kapsamında test edilmiştir. Alüminyum profiller kullanılarak üretilen tek ve çok serbestlik dereceli konsol kolonların kat hizalarına farklı özelliklere sahip çelik kütleler bağlanmış, böylelikle farklı periyotlu yapıları temsil eden sistemler elde edilmiştir. Seçilmiş gerçek deprem kayıt setleri kullanılarak sarsma masası üzerine bağlanan farklı numunelerin farklı deprem giriş enerjilerine maruz kalması sağlanmıştır.

Sarsma masası deneyleri, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda (YDMLab) bulunan sarsma masası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. YDMLab'da bulunan ve 2350×2350 mm plan boyutlarına sahip olan tek serbestlik dereceli ARI-1 sarsma masası; ±1 g ivme, ±1000 mm/s hız, ±325 mm yerdeğiştirme, 320 kNm devrilme momenti, 60 kN düşey yükleme ve 200 kN yatay yükleme kapasitelerine sahiptir.

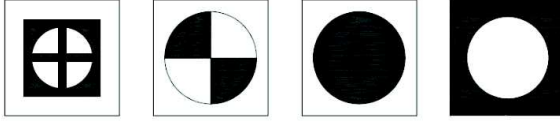
Sarsma masası deneylerinin (Şekil 1) ilk aşamasında, kolon profil ebatları 60×60 mm, yükseklikleri ise 1000 mm olan TSD sistemler test edilmiştir. Üzerine bağlanan farklı çelik kütleler yardımıyla da farklı titreşim periyotlarına sahip tek serbestlik dereceli sistemler çalıştırılmıştır. Bu deneyler kapsamında geniş bir periyot aralığındaki sistemler üzerinde incelemeler yapılmıştır. Bu gruptaki deneyler elastik ve inelastik bölgede olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Böylece on farklı kütle ve iki farklı plastisite durumu için toplam 10 adet TSD konsol kolon deneyi gerçekleştirilmiştir. Sarsma masası deneylerinin ikinci aşamasında ise iki, üç ve dört kata sahip olan üç farklı çok serbestlik dereceli konsol sistemleri çalıştırılmıştır. Kolon profil ebatları 60×60 mm, her bir kat yüksekliği ise 400 mm'dir. Üzerine bağlanan farklı çelik kütleler yardımıyla da farklı titreşim periyotlarına sahip ÇSD sistemler çalıştırılmıştır. Bu gruptaki deneyler elastik ve inelastik bölgede olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Böylece üç farklı kat sayısı ve iki farklı plastisite durumu için toplam 6 adet ÇSD konsol kolon deneyi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Sarsma masası deney düzeneği

Bu deneylerde sistem tepe yerdeğiştirmesi, birtakım matematiksel operasyonlarla ivmeölçerler tarafından kaydedilen ivme büyüklüklerinden türetilmiştir. Numunelerin taban kesitlerine yerleştirilen şekildeğiştirmeölçer vasıtasıyla alüminyum profillerde meydana gelen olası deformasyonlar, sarsma masası deneyleri sırasında takip edilebilmiştir. Deneyler sırasında numunelerin maruz kaldığı yerdeğiştirmeleri ölçmek amacıyla görüntü tabanlı ölçüm sistemi de kullanılmış, bu amaçla numuneler üzerine referans işaretleyiciler yerleştirilmiştir.

TSD sistem deneylerinde yalnızca bir adet referans işaretleyici kullanılırken, ÇSD deneylerinde her bir kat seviyesinde farklı işaretleyiciler kullanılmıştır. Boyutları özdeş olan bu işaretleyicilerin (50×50 mm) desenleri ise video kayıtlarından ayırt edilebilmeleri amacıyla birbirinden farklı seçilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Farklı kat seviyelerinde kullanılan referans işaretleyici desenleri

Deneyler sırasında bir cep telefonu kamerası ile yüksek çözünürlüklü video kayıtları alınmıştır (Şekil 3). Numunelerin hareketi 4K çözünürlükte ve saniyede 60 kare hızında kaydedilmiştir. Bu kayıtlar, yazılım aracılığıyla analiz edilerek video çözümleme yönteminin ürettiği veriler elde edilmiştir. Kaydedilen videolarda her bir kare ayrı ayrı işlenmiş, görüntüler gri tonlamaya çevrilmiş ve görüntüyü azaltmak amacıyla çeşitli filtreleme teknikleri uygulanmıştır.



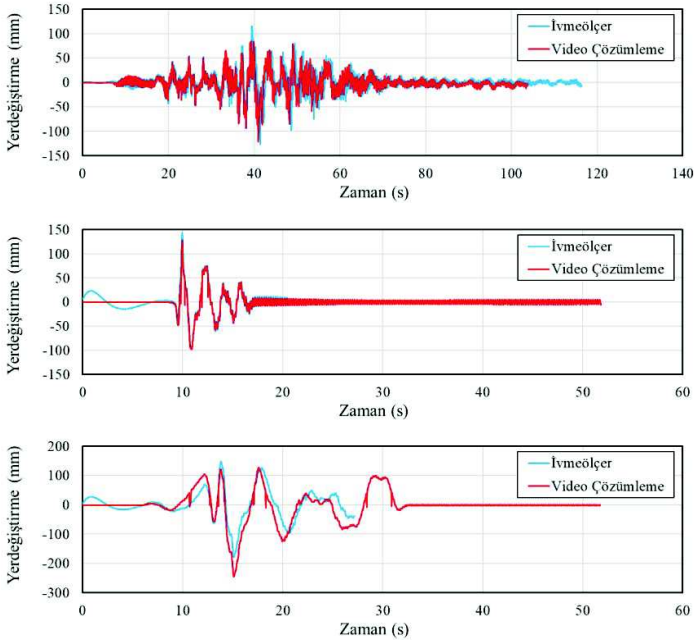
Şekil 3. Deneyler sırasında video kaydı alınması

BULGULAR

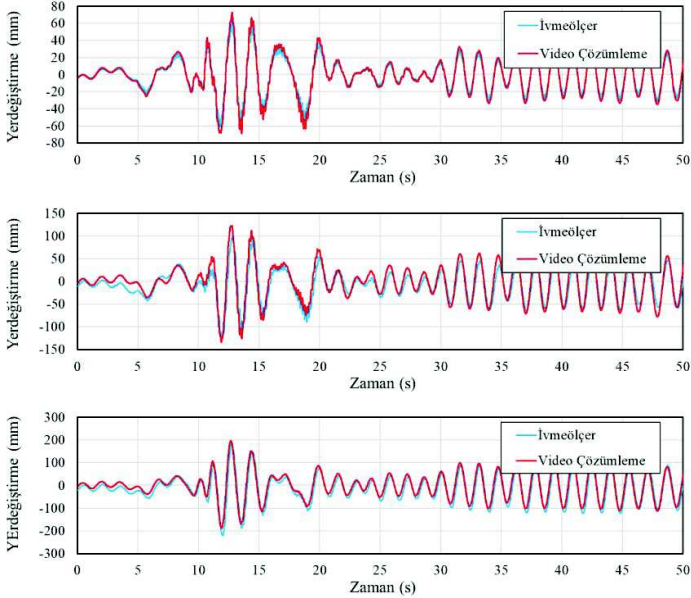
Video çözümleme yöntemi ile elde edilen yerdeğiştirme zaman tanım alanı sonuçları, aynı deneyler sırasında sensörlerle kaydedilen referans verilerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar hem genlik hem de faz uyumu üzerinden yapılmış; yerdeğiştirme, hız ve ivme büyüklükleri üzerinden sapma oranları ve doğruluk seviyeleri analiz edilmiştir. Video çözümleme yönteminin güvenilirliği ve performansı istatistiksel analizler ile değerlendirilmiştir. Yöntemin farklı dinamik hareket türlerine ve sistem titreşim frekanslarına olan duyarlılığı incelenmiştir.

Farklı numunelerin farklı deprem kayıtlarına tepkilerinden birkaç örnek TSD sistemler için Şekil 4'te, ÇSD sistemler için Şekil 5'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Sonuç olarak, video çözümleme yöntemi ile belirlenen yerdeğiştirme büyüklüklerinin ivmeölçer verilerinden elde edilen büyüklüklerle hem genlik hem de faz uyumu bakımından oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Video çözümleme çıktılarının sensör verileriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüş, özellikle düşük frekanslı modlarda genlik ve faz uyumu yüksek seviyede gerçekleşmiştir. İncelenen örneklerde, video ile ölçülen maksimum yerdeğiştirme değerlerinin sensör verilerine göre ortalama yaklaşık %10 sapma ile elde edildiği belirlenmiştir.



Şekil 4. TSD sistemlerde video çözümleme yönteminin sensör verileriyle karşılaştırılmasına birkaç örnek (sırasıyla 1985 Şili, 1986 San Salvador ve 1999 Gölcük depremleri)



Şekil 5. ÇSD sistemlerde video çözümleme yönteminin sensör verileriyle karşılaştırılmasına bir örnek (1999 Düzce depremi için sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü kat tepkileri)

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında geliştirilen video çözümleme yöntemi, yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik davranışlarının sıradan akıllı telefon kamerası kullanılarak dahi başarılı bir şekilde

elde edilebileceğini göstermiştir. Sarsma masası üzerinde farklı dinamik özelliklere sahip TSD ve ÇSD sistemler üzerinde yapılan doğrulama çalışmaları, video çözümleme yönteminin güvenilir sonuçlar verebildiğini ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen video çözümleme yönteminin mühendislik uygulamalarında sensör tabanlı sistemlere güçlü bir alternatif olduğunu göstermiştir. Yöntemin düşük maliyeti, kurulum kolaylığı ve çoklu nokta takibine olanak sağlaması önemli avantajlar olarak belirlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (İTÜ BAP) tarafından PMA-2025-46552 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı İTÜ BAP Birimi'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Bhowmick S, Nagarajaiah S (2020) "Identification of full-field dynamic modes using continuous displacement response estimated from vibrating edge video," *Journal of Sound and Vibration*, 489:115657. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115657>
- Colombo FT, da Silva S, Garrido H, Domizio M (2025) "Damage identification in structures using dynamic mode decomposition for vibration analysis of low-resolution videos," *Structural Health Monitoring*. <https://doi.org/10.1177/14759217251327555>
- Ghandil M, Dabanli Ö, Riahi HT (2021) "An enhanced indirect video-based measurement procedure for dynamic structural system identification applications," *Measurement*, 182:109759. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109759>
- Karameşe G, Yardımcı F, Güllü A, Yüksel E, Yalçın C, Büyüköztürk O (2022) "Vision-based dynamic response measurements of structures by using smartphone videos and alternative techniques," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 23(07). <https://doi.org/10.1142/s0219455423500694>
- Kim SY, Lee SJ, Choi KK (2025) "Dynamic characteristics of multi-degree-of-freedom frame systems derived from vision-based displacement measurement using consumer-grade camera video," *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 15(7):2661–2677. <https://doi.org/10.1007/s13349-025-00959-1>
- Liu Y, Cao R, Xu S, Deng L (2024) "A deep learning-based method for structural modal analysis using computer vision," *Engineering Structures*, 301:117285. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117285>
- Luan L, Zheng J, Wang ML, Yang Y, Rizzo P, Sun H (2021) "Extracting full-field subpixel structural displacements from videos via deep learning," *Journal of Sound and Vibration*, 505:116142. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116142>
- Silva MF, Martinez B, Figueiredo E, Costa JCWA, Yang Y, Mascareñas D (2020) "Nonnegative matrix factorization-based blind source separation for full-field and high-resolution modal identification from video," *Journal of Sound and Vibration*, 487:115586. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115586>
- Silva MF, Green A, Morales J, Meyerhofer P, Yang Y, Figueiredo E, Costa JCWA, Mascareñas D (2022) "3D structural vibration identification from dynamic point clouds," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 166:108352. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108352>
- Wang M, Kei Ao W, Bownjohn J, Xu F (2022) "Completely non-contact modal testing of full-scale bridge in challenging conditions using vision sensing systems," *Engineering Structures*, 272:114994. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114994>
- Xiao P, Wu ZY, Christenson R, Lobo-Aguilar S (2020) "Development of video analytics with template matching methods for using camera as sensor and application to highway bridge structural health monitoring," *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 10(3):405–424. <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00392-6>
- Yang K, Luo Y, Pan S, Li L (2024) "Non-contact measurement of structural dynamic displacement based on improved edge detection and video interpolation," *Advances in Structural Engineering*, 28(5):793–810. <https://doi.org/10.1177/13694332241289176>
- Yang Y, Dorn C, Mancini T, Talken Z, Kenyon G, Farrar C, Mascareñas D (2017) "Blind identification of full-field vibration modes from video measurements with phase-based video motion magnification," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 85:567–590. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.08.041>

YAPISAL DENEYLER İÇİN KAPALI ÇEVİRİM HİDROLİK AKTÜATÖR SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

DEVELOPMENT OF A CLOSED-LOOP HYDRAULIC ACTUATOR FOR STRUCTURAL TESTS

Hüseyin ÇİLSALAR¹ ve Oğuz DÜĞENCI²

ÖZET

Hidrolik sistemler hem dairesel hem de lineer olarak hareket gerektiren elemanların tahrik sistemi olarak kullanılmaktadır. Yüksek kuvvet kapasitelerine sahip olabilmeleri ve hidrolik sıvının kolay bir şekilde kontrol edilebilmesinden ve göreceli olarak çok az sıkışabilir olmasından yararlanarak yapısal elemanların da test edilmesinde bu sistemler kullanılabilir. Ancak, yapılacak olan testlerin bazı şartname veya düzenlemelere bağlı olarak belli bir prosedür içerisinde gerçekleştirilmesi hidrolik sistemlerden elde edilen hareketin kontrolünü zorunlu kılmaktadır. Bu çalışma kapsamında bir hidrolik sisteminin kontrol mekanizması detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. Kontrol sistemi, elemanları ve algoritması hakkında bilgiler verilmiştir. Mikrokontrolcü olarak Arduino Uno kullanılan kontrol sisteminde PID algoritması ile hidrolik pistonun çıkışında oluşan yer değiştirme zamana bağlı olarak kontrol edilmiştir. Kullanıcı tarafından belirlenen yer değiştirme zaman ilişkisi ve hidrolik pistonun ucunda meydana gelen yer değiştirme değerlerine bağlı olarak hesaplanan hata değerine göre oransal valfe gönderilecek olan voltaj değeri hesaplanmaktadır. PID algoritması için belirlenen katsayılar hata oranına bağlı olarak belirli eşik değerlerine göre güncellenerek adaptif olarak katsayıların belirlenmesi sağlanmıştır. Geliştirilen sistem ile doğruluğu yüksek olan yer değiştirme kontrollü olarak yapı elemanlarının testleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: PID kontrol, Hidrolik kontrol, Yapısal test

ABSTRACT

Hydraulic systems are used as actuator systems for elements requiring both rotary and linear motion. Taking advantage of high force capacities, ease in the controllability of hydraulic fluid, and its relatively very low compressibility, these systems can also be used in the testing of structural elements. However, the fact that the tests to be performed must be carried out within a certain procedure depending on certain specifications or regulations makes the control of the motion obtained from hydraulic systems mandatory. Within the scope of this study, the control mechanism of a hydraulic system is explained in detail. Information is given about the control system, its components, and its algorithm. In the control system where Arduino Uno is used as the microcontroller, the displacement obtained from the output of the hydraulic piston was controlled in a time-dependent manner with a PID algorithm. The voltage value to be sent to the proportional valve is calculated according to the error value, which is determined based on the displacement-time relationship determined by the user and the displacement values occurring at the tip of the hydraulic piston. The coefficients determined for the PID algorithm are updated according to certain threshold values depending on the error rate, ensuring the adaptive determination of the coefficients. With the developed system, tests of structural elements were carried out under high-accuracy displacement control.

Keywords: PID control, Hydraulic control, Structural test

¹ Doç. Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, Yozgat, huseyin.cilsalar@bozok.edu.tr

² Doç. Dr. Erciyes Üniversitesi, Kayseri, dugenci@erciyes.edu.tr

GİRİŞ

Hidrolik sistemler günümüzde hareketin gerekli olduğu birçok makine, eleman veya sistemde tahrik kaynağı olarak kullanılmaktadır. Genellikle bir elektrik motoruna bağlı olan hidrolik pompanın kullanılan sıvıya debi sağlaması ile sıvının iletiildiği noktada hareket sağlanmaktadır. İletilen sıvının debisi ve basınç değeri harekete geçirilecek sistem için önem arz etmektedir. Basınç değeri uygulanabilecek kuvveti belirlerken debi ise hareket eden sistemin hızını belirlemektedir. Bu özelliklerinden yararlanarak hidrolik sistemler yapı elemanlarının deneylerinde kullanılmaktadır. Bu tür deneyler belli prosedürlere bağlıdır ve genellikle yükleme hızının kontrol edilmesi gerekir. Bu nedenle hidrolik sistemlerden silindirlere aktarılan sıvının debisi ve hatta bazı durumlarda basınç değeri istenildiği şekilde ayarlanmalıdır. Yer değiştirme tabanlı deneylerde valften hidrolik silindire gönderilen sıvının, valfin özelliklerine bağlı olarak debisi ayarlanarak sistemin hızı kontrol edilebilmektedir. Bu amaçla sistemlerde oransal valflerin kullanılması zorunludur. Bu valfler genel olarak iki adet solenoid bobinden oluşur ve bunların üzerine etki eden voltaj veya akım miktarına göre valfin açılma miktarı ve doğal olarak içerisinden geçecek olan birim zamandaki sıvı hacmi belirlenmiş olur. Burada önemli olan valfe gönderilecek voltaj veya akım değeridir. Bunun belirlenmesi için ise farklı kontrol algoritmaları kullanılmaktadır. Algoritmanın seçimi sistemin özelliklerine, kapasitesine ve yapılacak olan deneye bağlı olarak değişebilir. En bilinen algoritmalarından biri ise PID kontrol algoritmasıdır (Aström ve Hägglund, 1995; Ogata, 2010). Bu algoritmada herhangi bir zamanda elde edilen gerçek değer ve elde edilmesi gereken referans değeri karşılaştırılarak girdinin belirlenmesi gerekmektedir. Herhangi bir andaki hata, gerçek değer ve elde edilmesi gereken değer farkı olarak belirlenir ve bu değer PID algoritmasında bir sonraki adım için gerekli girdinin hesabında kullanılmaktadır. PID kontrol algoritması temel olarak hatanın herhangi bir andaki değerine, hata teriminin türevine ve hatanın geçmişini dikkate alarak hesaplanan integral değerine bağlı olarak üç adet parametreden oluşmaktadır.

Bu çalışma kapsamında yapısal elemanların deneylerinde kullanılan bir hidrolik güç sisteminin kontrol yöntemi hakkında bilgiler verilmiştir. Kontrol için kullanılan PID algoritması, yazılım ve otomasyon ünitesi detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Ayrıca deneylerden elde edilen referans yörünge ile gerçek zamanlı yörünge eğrileri karşılaştırılarak sistemin ihmal edilebilir düzeyde hata ile referans yörüngesini takip ettiği gösterilmiştir.

PID KONTROL ALGORİTMASI

Kontrol için gerekli olan input değerleri zamana bağlı olarak kullanıcılar tarafından sağlanmaktadır. İnşaat Mühendisliği deneylerinde bu genellikle deney numunesine uygulanacak olan yer değiştirmenin zamana bağlı değerleridir. Kullanıcılar geliştirilen bir program ile gerek bazı fonksiyon formlarına sahip dalgaları doğrudan program dahilinde üretip sisteme gönderebilmekte gerek ise bir dosya içerisine kaydedilmiş zaman ve deplasman çiftlerini içeren dosyayı doğrudan yükleyebilmektedir. Test başladığı andan itibaren yazılım, zamanı hafızada tutmakta ve gerçek zaman değerine bağlı olarak sistemin olması gereken yer değiştirme değerini kullanıcının girmiş olduğu fonksiyona bağlı olarak belirlemektedir. Aynı anda pistonun ucunda yer alan ve piston ile birlikte hareket eden lineer potansiyometreye bağlı olarak okunan değer de belirlenmektedir. Bu belirlenen değer ile sistemin olması gereken yer değiştirme değeri karşılaştırılarak hata değerine göre sisteme gönderilecek sinyale karar verilmektedir. Bu hata değerinin anlık değeri, türevi ve geçmiş değerlerine bağlı olarak bulunan integralin sonucu farklı katsayılar ile çarpılarak sisteme gönderilecek sinyal hesaplanmaktadır. Buna ek olarak sistemin gelecekteki durumunun da denkleme dahil edilmesi amacı ile bir ileri besleme terimi de hesaplarda kullanılmıştır. Aşağıda yer alan Denklem 1, sinyal değeri olan $P(t)$ 'nin hata değeri olan $e(t)$ 'ye bağlı olarak hesabını göstermektedir. Bu denklemde yer alan K_P katsayısı doğrudan hata değeri ile çarpılmaktadır ve sistemin hataya ne oranda hızlı tepki göstereceğinin bir ölçüsüdür. K_I değeri ise geçmişte meydana gelen kümülatif hatanın düzeltilmesi ile ilgili terimdir ve kalıcı hatanın azaltılması amacı ile sisteme dahil edilmektedir. K_D ise hatanın anlık türevi ile çarpılmaktadır ve

gelecekte oluşabilecek hataya ilişkin düzeltme bu katsayı ile yapılmaktadır. Bu katsayı ayrıca çıktı sinyalinde oluşabilecek salınımları sönmüleyecek olan katsayıdır. K_{ff} ise hedeflenen deplasman değerinin (x_{ref}) zamana göre türevinin çarpıldığı katsayıdır ve sisteme ulaşması gereken hız hakkında bilgi vermektedir. Bu terim ile referans yörünge takip edilirken oluşabilecek gecikmeler en aza indirilmektedir ve hesaplara sonraki adım hakkında bir ön bilgi sağlamaktadır (Visioli, 2006).

$$P(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} + K_{ff} \frac{d(x_{ref})}{dt} \quad (1)$$

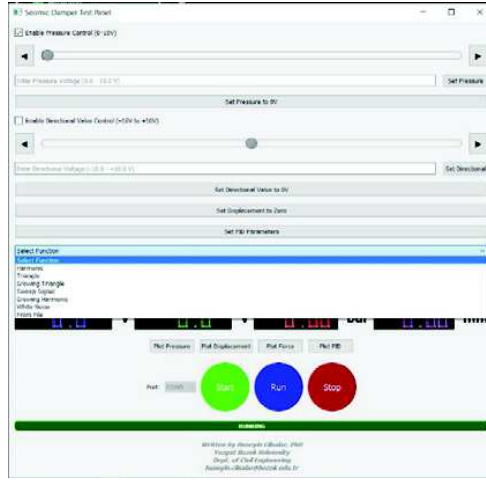
Türev alma işlemi, sinyal içerisindeki gürültüyü güçlendirme eğiliminde olduğundan bu terime yazılım dahilinde bir filtre uygulanmıştır. Böylece keskin değişiklikler yumuşatılarak hesaplarda oluşabilecek hataların önüne geçilmeye çalışılmıştır.

Belirlenen PID katsayıları hata/referans değer oranının yüzdesine bağlı olarak güncellenmektedir. Böylece adaptif olarak kazanç değerleri yazılıma entegre edilmiştir. PID algoritması lineer girdi-çıkışı ilişkisi bulunan sistemlerde çok iyi sonuçlar vermektedir. Ancak solenoid valflerdeki açılma miktarı ile içerisinde geçen yağın debisi arasındaki ilişki nonlineerdir. Bu nedenle valfin üreticisi tarafından verilen akım ve debi ilişkisi (Diplomatic, 2023) temel alınarak kod içerisinde Denklem 1'den elde edilen sinyal değeri bu eğriye bağlı olarak bir fonksiyon içerisinde dahil edilerek çıktı debi ilişkisi doğrusal yakın bir hale getirilmektedir.

SİSTEM YAZILIMI

Sistem için geliştirilen yazılım iki kademelidir. İlk kademe Şekil 1'de verilen ve Python programında hazırlanmış kullanıcı arayüzünü içermektedir. Bu programın görevi sadece mikrokontrolcüye veri göndermek ve mikrokontrolcü tarafından porta gönderilen bilgileri olarak görselleştirmektir. Python'da hazırlanan program ile kullanıcı gerektiğinde sistemi manuel olarak kontrol edebilmektedir. Bunun yanı sıra PID katsayılarını ve referans yörüngesini sisteme aktarabilmektedir. Referans yörüngesi için program dahilinde hazır fonksiyonlar yer almaktadır. Ancak, kullanıcı bu fonksiyonlar dışında belirlenen bir zaman ve referans yer değiştirme değerlerini barındıran bir dosya aracılığı ile sisteme yüklediği fonksiyonu da oluşturabilmektedir. Lineer potansiyometreden gelen yer değiştirme değeri ile referans yörüngesi anlık olarak program ekranına aktarılmaktadır. Böylece kullanıcı deney ilerlerken aynı zamanda algoritmanın çıktılarını karşılaştırabilmekte ve deneyin ilerleyişi hakkında bilgi sahibi olmaktadır.

Kontrol algoritması tamamen mikrokontrolcü içerisinde çalışmaktadır ve Python tarafından sadece her bir ana ait referans yer değiştirme değeri ve PID katsayıları analiz sırasında kullanıcı tarafından değiştirilmiş ise yeni katsayılar gönderilmektedir. Kontrol algoritmasının sadece mikrokontrolcü içerisinde çalışması ile her veri gönderme ve alma aşamalarında oluşabilecek gecikmeler en aza indirilmiştir.



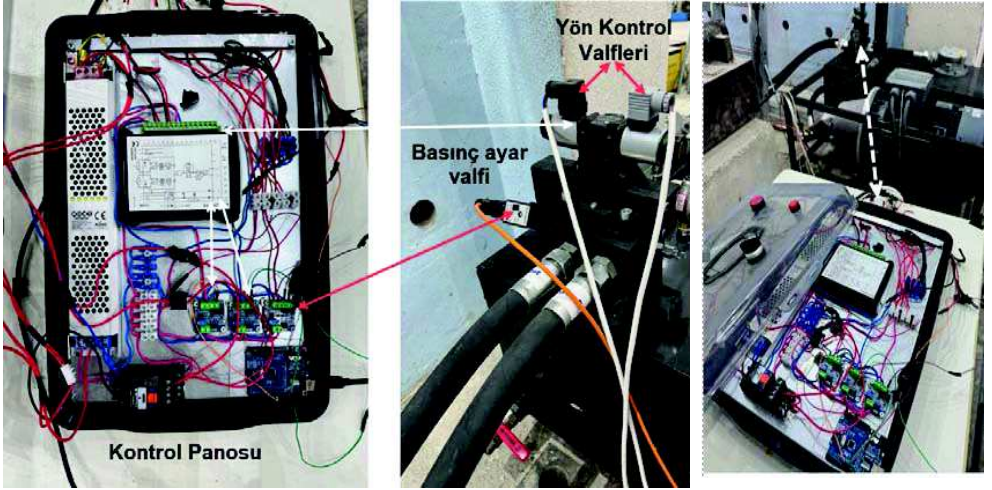
Şekil 1. Geliştirilen programın kullanıcı arayüzü

OTOMASYON SİSTEMİ

Sistemin otomasyon panelinde mikrokontrolcü olarak Arduino Uno kullanılmaktadır. Bu bileşen, sistemde yer değiştirmenin elde edilmesi, gerekli hesaplamaların yapılması ile birlikte görselleştirme amacı ile Python'a gönderilecek veriler ve valfe gönderilecek voltaj değerinden sorumludur. PID algoritması sonucunda elde edilen çıktıya bağlı olarak valfe PWM (Pulse Width Modulation) sinyali gönderilmektedir. Ancak mikrokontrolcünden çıkan değer doğrudan valfi hareket ettirmeye yeterli olmaz ve valfin bir kart ile hareket geçirilmesi amacı ile bir voltaj yükseltme elemanı kullanılmaktadır. Bu kart ise -10V ile +10V arasında gelen voltaj değerini valfi harekete geçirecek enerjiye çevirmektedir (Duplomatic, 2025). Dolayısı ile Arduino'dan çıkan sinyal yükseltilmekte ve karta aktarılmaktadır. Kullanılan valf Duplomatic marka ve DSPE7 modelidir (Duplomatic, 2023). Bu pilot operasyonlu bir valftir ve bu valfin kontrolü için kullanılan kart ise EDM-212 modeli karttır. Bu kart dışarıdan 24V bir güç kaynağına bağlıdır ve Arduino'dan sonra yükseltilerek aktarılan voltaj değerine bağlı olarak valfin açılma miktarını kontrol etmektedir.

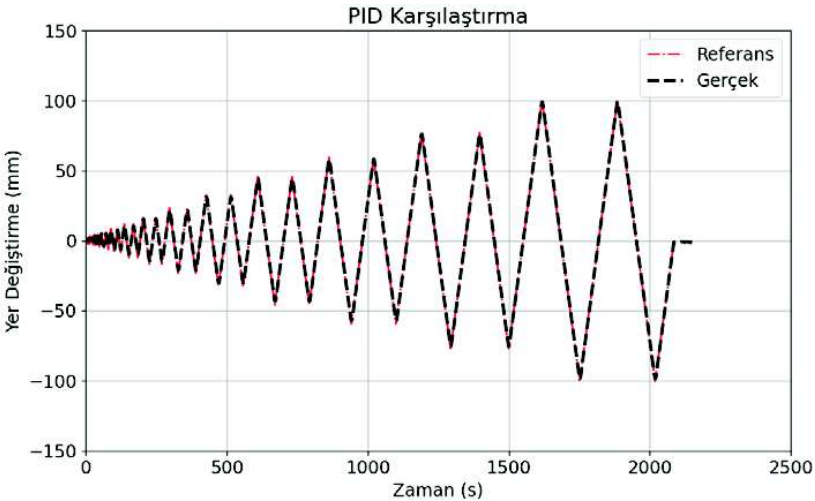
Hata hesabında kullanılacak olan gerçek yer değiştirme değeri ise yine Arduino ile piston ucuna yerleştirilen bir lineer potansiyometre ile elde edilmektedir. Bu mikrokontrolcünden sağlanan 5V ile potansiyometrik cetvele enerji verilmektedir ve cetvelden alınan voltaj miktarına bağlı olarak belirlenen bir katsayı ile yer değiştirme değeri hesap edilmektedir. Gelen sinyalin barındırdığı gürültü ise Arduino'ya girmeden önce bir direnç ve kapasitör ile oluşturulan bir devre kullanılarak filtrelenmiştir. Böylece PID algoritması çalışmadan önce gürültüden arındırılmış bir sinyal sağlanmıştır.

Sistemde bulunan bir basınç ayar valfi ile de sistemin sahip olabileceği maksimum basınç değeri ayarlanmaktadır. Bu sistemin güvenliği açısından çok önemlidir. Bu ayar valfi de yine Duplomatic marka bir kart ile kontrol edilmektedir. Kartın modeli EDC-112'dir ve 0-10V arasında gönderilen sinyal ile çalışmaktadır (Duplomatic, 2020). Arduino'dan elde edilen 0-5V arası sinyal yükseltilerek doğrudan bu elemana gönderilmektedir. Gönderilen voltaj değerine bağlı olarak sistemde bulunabilecek maksimum basınç değeri ayarlanmaktadır. Deney başlangıcında ilk olarak bu basınç değerinin ayarlanması gerekmektedir. Eğer sistemin ihtiyacı olan basınç değerinden daha az bir değer ayarlanır ise test sırasında hidrolik pistonun gerekli kuvveti uygulayamayacağına dikkat edilmelidir. Aşağıda verilen Şekil 2. otomasyon sisteminin elemanlarını göstermektedir.



Şekil 2. Geliştirilen otomasyon sisteminin görünümü

Geliştirilen kontrol sisteminin en doğru sonucu vermesi amacı ile farklı yüklenme hızları altında yüksüz olarak test edilmiştir ve PID katsayıları buna göre belirlenmiştir. Ancak önemli olan sistemin yük altında da belirlenen davranışı göstermesidir. Bu nedenle sistem basınç altında iken elde edilen çıktının hedeflenen referans değerleri ile karşılaştırılması gerekmektedir. Bu yaklaşım ile yüksüz koşullarda geliştirilen sistemin yük altında da davranışı ve beklenen performansı gösterip göstermediği ortaya konabilir. Şekil 3, test protokolü amacı ile sistemden elde edilmesi beklenen yer değiştirme değeri ile bir çelik damper eleman deneyinden elde edilen gerçek yer değiştirme değerini göstermektedir. Grafik, elde edilen her iki eğrinin uyum içerisinde olduğunu göstermektedir. Deney başlangıç aşamasında belli bir sapma değeri olsa da sonraki aşamalarda yüksek doğruluk sağlanmıştır. Başlangıç aşamasındaki farklılık 5 mm deplasman değerine kadar gözlenmektedir. Bu yer değiştirme değerlerinde elde edilen sinyal değerinin barındırdığı gürültü oranının fazla olması nedeni ile bu farklılığın ortaya çıktığı söylenebilir. Ayrıca bu evrede oluşacak olan yer değiştirme değerlerine bağlı olarak sistemde bulunan sürtünmeler de çok etkilidir. Özellikle hidrolik silindirin keçe sürtünmesi birkaç mm gibi düşük yer değiştirme değerlerinde elde edilen deplasman değerini önemli ölçüde etkilemektedir.



Şekil 3. Referans yer değiştirme ile gerçek yer değiştirme değerlerinin karşılaştırılması

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında Erciyes Üniversitesi Deprem Araştırma Laboratuvarında kullanılmak üzere geliştirilen yer değiştirme kontrollü bir hidrolik sistemin tasarım ve yazılım aşamaları açıklanmıştır. Sistem farklı deneylerde kullanılabilir niteliktedir ve kullanıcıya kontrol açısından esneklik sağlamaktadır. Kullanıcılar, geliştirilen arayüz ile hidrolik sistemi gerek manuel gerek ise otomasyon ile birlikte kullanabilmektedir. Elde edilen referans ve gerçek yer değiştirme değerleri karşılaştırılarak hem otomasyon sisteminin hem de kontrol algoritmasının geçerliliği araştırılmıştır. Bu karşılaştırma bir çelik sönümleyicinin testi sistem tarafından gerçekleştirildiği esnada elde edilen yer değiştirme değerleri ile yapılmıştır. Böylece sistemin ideal yüksüz durumda değil, basınç altında sürekli değişen koşullarda sergilediği performans irdelenmiştir. Elde edilen sonuç sistemin güvenilir bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Geliştirilen bu sistem şu an yürütülmekte olan TÜBİTAK 1001-UDAP projesinin deneylerinde kullanılmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamında hidrolik sistem elemanları 124M604 numaralı TÜBİTAK 1001-UDAP programı kapsamında edinilmiştir. Yazarlar bu destek için TÜBİTAK'a teşekkür etmektedir.

KAYNAKLAR

- Aström KJ, ve Hägglund T. (1995). *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning* (2nd ed.). Instrument Society of America.
- Duplomatic (2020). Digital electronic control unit for open-loop proportional valves, EDC-1 (Katalog No. 89 120 ED). https://duplomaticmotionsolutions.com/docs/2020/89120-ed_46b4efb5ef.pdf
- Duplomatic (2023). *Proportional Directional Valves, Pilot Operated, Electro-Hydraulic or Hydraulic (Dsce*) Actuated* (Katalog No: 83 310/123 ED). Erişim adresi: https://duplomaticmotionsolutions.com/docs/2023/83310-ed-123_5b1d3d55a4.pdf
- Duplomatic (2025). Digital Amplifier for Open Loop Proportional Valves (Katalog No. 89 252/125 ED). https://duplomaticmotionsolutions.com/docs/2025/89252-ed_125_0294c20b64.pdf
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering* (5th ed.). Prentice Hall.
- Visioli, A. (2006). *Practical PID Control*. Springer.

DEPREM SONRASI BETONARME BİNALARDA ONARIM VE GÜÇLENDİRMEDE SIK GÖRÜLEN HATALAR: SAHA BULGULARI

FREQUENT DEFICIENCIES IN POST-EARTHQUAKE REPAIR AND STRENGTHENING OF RC BUILDINGS: FIELD EVIDENCE

Gökhan FIRINCIOĞULLARI¹ ve Murat BİKÇE²

ÖZET

Deprem sonrası betonarme (BA) binalarda gerçekleştirilen onarım ve güçlendirme müdahaleleri, yapının yeniden kullanılabilirliğini ve deprem güvenliğini belirleyen kritik bir aşamadır. Bununla birlikte, saha gözlemleri; müdahalenin yalnızca varlığının değil, hasar mekanizmasıyla uyumlu mühendislik tasarımı, detaylandırma ve uygulama kalitesinin belirleyici olduğunu göstermektedir. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri sonrasında farklı bölgelerde incelenen BA binalarda, özellikle çatlakların neden analizi yapılmadan yüzeysel kapatılması, betonarme sargı (manto) uygulamalarında eski-yeni beton aderansının ve temel bağlantısının sağlanmaması, katlar arasında süreksiz sargı detayları ile lifli polimer (FRP) uygulamalarında köşe pahı, reçine doygunluğu ve ankraj/bindirme şartlarının ihmal edilmesi gibi tekrar eden hatalar tespit edilmiştir. Bu bildiride, söz konusu hatalar tipik saha örnekleri üzerinden sınıflandırılmış; olası yapısal sonuçları, güncel deprem mühendisliği ilkeleri ve Türkiye’de yürürlüğe giren hasar tespit çerçevesi ile ilişkilendirilerek tartışılmıştır. Bulgular, doğru hasar tespiti-uygun müdahale seçimi-denetimli uygulama zincirinin kurulmadığı durumlarda, güçlendirme adı altında yapılan işlemlerin beklenen performans artışını sağlamayabileceğini, hatta yerel kırılma noktaları üretebileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Güçlendirme, Betonarme manto, FRP, Saha gözlemi

ABSTRACT

Post-earthquake repair and strengthening interventions are essential to restore the safety and usability of reinforced concrete (RC) buildings. Field evidence, however, indicates that the effectiveness of an intervention depends not only on its selection but also on the compatibility with the governing damage mechanisms, proper detailing, and execution quality. Following the 6 February 2023 Kahramanmaraş Earthquakes, recurring deficiencies were identified in RC buildings, including superficial crack treatments without cause diagnosis, reinforced-concrete jacketing with inadequate old-new concrete bond and insufficient foundation continuity, discontinuous jacketing across storeys, and fiber-reinforced polymer (FRP) applications lacking corner rounding, resin saturation, and anchorage/overlap details. This paper classifies these frequent mistakes based on representative field observations and discusses their likely structural implications in light of current engineering principles and Türkiye’s updated damage-assessment framework. The findings emphasize that without a coherent chain of accurate damage evaluation, appropriate retrofit design, and effective supervision, interventions may fail to deliver the intended performance gains and may even introduce new local vulnerabilities.

Keywords: Strengthening, RC jacketing, FRP, Field observations

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay; gokhanfirinciogullari.lee24@iste.edu.tr

² Profesör Doktor, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay; murat.bikce@iste.edu.tr.

GİRİŞ

Türkiye’de büyük depremler sonrası kısa sürede çok sayıda yapının değerlendirilmesi ve yeniden kullanılabilirliğinin sağlanması amacıyla onarım ve güçlendirme uygulamaları yaygınlaşmaktadır. Ancak geçmiş depremlerden edinilen deneyimler, standartlaştırılmış veya hızlı kararlarla seçilen müdahalelerin, detaylandırma ve uygulama kalitesi yetersiz olduğunda beklenen güvenlik düzeyini sağlayamayabileceğini göstermektedir (Bousias vd., 2007; İlki ve Kumbasar, 2003). 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri sonrasında yapılan saha incelemeleri, benzer hata tiplerinin farklı bölgelerde tekrarladığını ortaya koymuştur. Ayrıca, afet sonrası bina hasar tespitine ilişkin güncel yönetmelik çerçevesi, hasar sınıflandırmasının mühendislik değerlendirmesiyle desteklenmesi gerektiğini açık biçimde vurgulamaktadır (Resmî Gazete, 2025). Bu bildiri, deprem sonrası müdahalelerde sahada sık gözlenen uygulama hatalarını sınıflandırarak, mühendislik açısından olası sonuçlarını tartışmayı amaçlamaktadır.

YÖNTEM: SAHA GÖZLEMİ VE DEĞERLENDİRME YAKLAŞIMI

Çalışma, depremden sonra onarım ve/veya güçlendirme müdahalesi görmüş BA binalarda yapılan görsel saha gözlemlerine dayanmaktadır. İncelemelerde taşıyıcı elemanlarda (kolon, kiriş, perde ve birleşim bölgeleri) mevcut hasar türleri ile uygulanan müdahalenin sürekliliği, detaylandırması ve mevcut elemanlarla bütünleşmesi nitel olarak değerlendirilmiştir. Uygulamalar; (i) yüzeysel onarımlar, (ii) betonarme sargı (manto) uygulamaları ve (iii) FRP uygulamaları başlıkları altında sınıflandırılmış, bulgular ilgili mühendislik ilkeleri ve güncel kılavuz/yönetmelik çerçevesi ile ilişkilendirilmiştir (TBDY, 2018; Resmî Gazete, 2025).

BULGULAR: SAHADA SIK GÖZLENEN HATA TİPLERİ

Yüzeysel Onarım ve Çatlak Kapatma Uygulamaları

En yaygın hatalardan biri, taşıyıcı elemanlardaki çatlakların oluşum mekanizması (kesme, eğilme, aksenal zorlanma, oturma vb.) değerlendirilmeden sıva/kaplama ile gizlenmesidir (Şekil 1). Bu yaklaşım, hasarın kök nedenini ortadan kaldırmadığı gibi, yapının gerçek performansının olduğundan iyi algılanmasına yol açabilmekte ve yanlış güçlendirme kararlarını tetikleyebilmektedir (Koçak, 2003).



Şekil 1. Deprem sonrası sahada gözlenen tipik uygulama hataları

Betonarme Sargı (Manto) Uygulamalarında Kritik Detay Eksiklikleri

Saha örneklerinde, mevcut eleman yüzeyi yeterince pürüzlendirilmeden ve gerekli ankraj/bağlayıcı donatı düzeni kurulmadan yapılan manto uygulamaları gözlenmiştir (Şekil 2). Bu durumda eski ve yeni betonun birlikte çalışması sınırlanmakta; hedeflenen dayanım/rijitlik artışı sahada gerçekleşmeyebilmektedir (Bousias vd., 2007). Ayrıca mantonun katlar boyunca süreklilik göstermemesi ve/veya temele güvenli biçimde bağlanmaması, yük aktarım yolunda ani değişimlere ve yerel zayıflıklara neden olabilecek önemli bir risktir.



Şekil 2. a) Sıvası kaldırılmadan manto uygulaması, b)

FRP Uygulamalarında İşçilik ve Detaylandırma Hataları

FRP sargılarda köşe pahı yapılmaması, yetersiz reçine doygunluğu, uygun bindirme uzunluğu ve ankraj detaylarının ihmal edilmesi sık tekrarlanan problemlerdir (Şekil 3). Bu tür eksiklikler, FRP'nin beklenen sargı etkisini ve süneklik katkısını erken ayrılma (debonding) ile sınırlayabilmektedir (İlki ve Kumbasar, 2003). Ayrıca kritik elemanlar yerine ikincil elemanlarda lokal FRP kullanımı, müdahalenin sistem davranışına etkisini zayıflatmaktadır.



Şekil 3. a) Köşe Pahı yapılmamış CFRP, b) Reçinesi yedirilmemiş CFRP uygulaması

TARTIŞMA

Bulgular, deprem sonrası müdahalelerde “hızlı uygulama” baskısının, hasar tespiti ile güçlendirme tasarımı arasındaki sürekliliği zayıflattığını göstermektedir. Güncel hasar tespit yaklaşımı, kararların yalnızca hasar sınıfına değil, taşıyıcı sistemin bütünsel davranışına göre verilmesi gerektiğini vurgulasa da (Resmî Gazete, 2025), sahada standart çözümlerin ayrıntı kontrolü yapılmadan uygulanabildiği görülmektedir (Şekil 4). Bu nedenle, projelendirme ve uygulama aşamalarında bağımsız teknik denetim, malzeme ve işçilik kalite kontrolü ve detay çizimlerinin sahada doğrulanması kritik öneme sahiptir.



Şekil 4. Moment aktaramayan güçlendirme uygulaması

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bildiriye, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri sonrasında BA binalarda gözlenen yaygın onarım ve güçlendirme hataları özetlenmiştir. Saha bulguları ışığında aşağıdaki öneriler öne çıkmaktadır: (i) Çatlak ve kabuk atmalarında, yüzeysel kapatma yerine hasar mekanizması tanısı + uygun onarım yöntemi birlikte ele alınmalıdır. (ii) Betonarme manto uygulamalarında aderans, ankraj, katlar arası süreklilik ve temel bütünleşmesi proje ve sahada zorunlu kontrol başlıkları olarak tanımlanmalıdır. (iii) FRP uygulamalarında köşe pahı, reçine doygunluğu, bindirme/ankraj ve uygulama çevresel koşulları, performansı belirleyen kritik parametrelerdir; uygulama öncesi/sonrası denetim kayıt altına alınmalıdır. (iv) Hasar tespiti–müdahale seçimi–uygulama denetimi zincirinin kurulması, deprem sonrası müdahalelerin güvenilirliğini artıracaktır.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamında yapılan saha incelemelerinde katkı veren meslektaşlarımıza ve kurum desteği sağlayan İskenderun Teknik Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Bousias SN, Spathis A-L, Fardis MN (2007) “Seismic retrofitting of RC frames with concrete jacketing” *Engineering Structures* 29(12) 3003–3017
- Altunışık AC, Binici B, Canbay E, Yakut A (2023) “Field observations and damage evaluation in reinforced concrete buildings after the February 6, 2023 Kahramanmaraş–Türkiye earthquakes” *Journal of Earthquake and Tsunami* 17(6) 2350024
- İlki A, Kumbasar N (2003) “Behavior of damaged and strengthened reinforced concrete columns” *Journal of Structural Engineering (ASCE)* 129(1) 1–10
- Koçak A (2003) 17 Ağustos 1999 ve 12 Kasım 1999 depremleri sonrası BA binaların onarım ve güçlendirmelerinde yapılan hatalar, Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, Türkiye
- Özcebe G, Ersoy U, Tankut T (2004) “Seismic strengthening of reinforced concrete buildings in Turkey” *Engineering Structures* 26(13) 1919–1931
- Öztürk M, Arslan MH, Korkmaz HH (2023) “Effect on RC buildings of the 6 February 2023 Türkiye earthquake doublets” *Engineering Failure Analysis* 153 107521
- Resmî Gazete (2025) Afetler Sonrası Bina Hasar Tespiti Yapılmasına İlişkin Genel Kurullar Hakkında Yönetmelik 22.06.2025 Sayı 32934
- Sezen H, Moehle JP (2004) “Shear strength model for lightly reinforced concrete columns” *Journal of Structural Engineering (ASCE)* 130(11) 1692–1703
- TBDY (2018) _Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği_ Resmî Gazete 18.03.2018 Sayı 30364



DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
Cumhuriyet Bulvarı No: 144 35210 Alsancak / İZMİR / TÜRKİYE
Telefon:+90(232) 412 12 12 / Faks:+90 (232) 464 81 35
www.deu.edu.tr