



**ETRİYESİZ OLARAK İMAL EDİLEN
KOLON-TEMEL BİRLEŞİM BÖLGELERİNİN
GÜÇLENDİRİLMESİ VE YAPISAL
ONARIMININ DENEYSEL YÖNTEMLE
İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Mert COŞKUN

Eskişehir 2025

**ETRİYESİZ OLARAK İMAL EDİLEN KOLON-TEMEL BİRLEŞİM
BÖLGELERİNİN GÜÇLENDİRİLMESİ VE YAPISAL ONARIMININ
DENEYSEL YÖNTEMLE İNCELENMESİ**

Mert COŞKUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Onur TUNABOYU

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Haziran 2025

*Bu tez çalışması BAP Komisyonu tarafından kabul edilen 23ADP166 no.lu proje ve
TÜBİTAK 2209/A 1919B012307654 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.*

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Mert COŞKUN'un ETRİYESİZ OLARAK İMAL EDİLEN KOLON-TEMEL BİRLEŞİM BÖLGELERİNİN GÜÇLENDİRİLMESİ VE YAPISAL ONARIMININ DENEYSEL YÖNTEMLE İNCELENMESİ başlıklı çalışması 26/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Onur TUNABOYU

Üye

: Prof. Dr. Özgür AVŞAR

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Uğur ALBAYRAK

Prof. Dr. Harun BÖCÜK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

26/06/2025

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Mert COşKUN, ETRİYESİZ OLARAK İMAL EDİLEN KOLON-TEMEL BİRLEşİM BÖLGELERİNİN GÜÇLENDİRİLMESİ VE YAPISAL ONARIMININ DENEYSEL YÖNTEMLE İNCELENMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımda incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Dr. Öğr. Üyesi Onur TUNABOYU

ÖZET

ETRİYESİZ OLARAK İMAL EDİLEN KOLON-TEMEL BİRLEŞİM BÖLGELERİNİN GÜÇLENDİRİLMESİ VE YAPISAL ONARIMININ DENEYSEL YÖNTEMLE İNCELENMESİ

Mert COŞKUN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Haziran 2025

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Onur TUNABOYU

Aktif deprem kuşağında yer alan ülkemizde meydana gelen depremler sonrası yapılan saha gözlemleri, kolon-temel birleşim bölgesindeki yetersiz sıklaştırmamanın yaygın bir yapım hatası olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, enine donatısı bulunmayan kolon-temel birleşimlerinin çevrimsel yarı-statik yük altındaki performansını; hasar oluşumu, onarım ve güçlendirme yaklaşımları açısından incelemektedir. Bu amaçla, dört adet tam ölçekli test numunesi sabit eksenel ve çevrimsel yatay yük altında test edilmiştir. Referans numune, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e uygun detaylandırılmış; diğer numuneler ise birleşim bölgesinde etriye içermeyecek şekilde üretilmiştir. Bu numunelerden biri hasar sonrası karbon fiber katkılı polimer (CFRP) sargılamasıyla onarılmış, diğeri ise testten önce çelik köşebentlerle güçlendirilmiştir. Sonuçlar, CFRP ile onarılan TK-3 numunesinin en yüksek süneklik, deformasyon kapasitesi ve enerji sönümleme düzeyine ulaştığını ortaya koymuştur. Takviyesiz TK-2 en düşük performansı sergilerken, çelik köşebentle güçlendirilen TK-4 numunesi artan dayanım ve rijitlik göstermiş, ancak süneklik açısından sınırlı kalmıştır. Bulgular, CFRP'nin yapısal performansı geri kazandırmada ve iyileştirmede etkili olduğunu; çelik köşebentlerin ise yetersiz detaylandırılmış birleşim bölgeleri için pratik bir alternatif sunduğunu göstermektedir. Çalışma, kolon-temel birleşim bölgesinde uygun sıklaştırmamanın önemini vurgulamakta ve sismik etkilere maruz kalabilecek mevcut yapılar için uygulanabilir onarım ve güçlendirme stratejileri önermektedir.

Anahtar Sözcükler: Birleşim bölgesi, Kolon, Temel, Yapısal onarım, Güçlendirme

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF RETROFITTING AND STRUCTURAL REPAIRING OF FOUNDATION-COLUMN JOINTS WITHOUT TRANSVERSE REINFORCEMENT

Mert COŞKUN

Department of Civil Engineering

Programme in Structural Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, June 2025

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Onur TUNABOYU

Field investigations conducted after earthquakes in Türkiye, which is located within an active seismic zone, have revealed that insufficient confinement in the column–foundation joint region is a widespread construction defect. This study focuses on the performance of column–foundation joints without transverse reinforcement under cyclic quasi-static loading, with particular emphasis on damage mechanisms, repair strategies, and strengthening techniques. To simulate seismic effects, four full-scale test specimens were subjected to a constant axial load combined with quasi-static cyclic lateral loading. The reference specimen was detailed in accordance with the Turkish Building Earthquake Code (TBEC 2018), while the other specimens were intentionally constructed without transverse reinforcement in the column–foundation joint region. One of these specimens was repaired using carbon fiber reinforced polymer (CFRP) wrapping after initial damage, one of the undamaged specimen was strengthened with steel angle profiles. Experimental results indicated that the specimen TK-3, repaired with CFRP, exhibited the highest levels of ductility, deformation capacity, and energy dissipation. In contrast, the unreinforced specimen TK-2 demonstrated the poorest performance. The specimen TK-4, strengthened with steel angles, showed improved strength and stiffness but comparatively limited ductility. These findings demonstrate that CFRP wrapping is an effective technique for restoring and enhancing the structural performance of deficient joints, while steel angle strengthening offers a practical alternative for retrofitting poorly detailed regions. Overall, the study underscores the significance of adequate confinement in the column–foundation joint and provides applicable strategies for the repair and strengthening of existing structures that may be subjected to seismic loading.

Keywords: Joint region, Column, Foundation, Structural repair, Retrofitting

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında bilgi, tecrübesi ve rehberliği ile beni yönlendiren, akademik gelişimime büyük katkılar sağlayan değerli danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Onur TUNABOYU'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez konusunu bana öneren, her adımda desteğini esirgemeyen ve tecrübelerini benimle paylaşan Sayın Prof. Dr. Özgür AVŞAR'a sonsuz teşekkür ederim.

Deneyisel sürecin gerçekleştirilmesinde laboratuvar imkânlarını sonuna kadar sağlayan Sayın Erdoğan ÖZKAN'a ve özellikle laboratuvar çalışmalarında her konuda yardımcı olan meslektaşım Sadettin BAYRAM'a teşekkür ederim.

Tez süreci boyunca görüşleriyle ve verdikleri moral desteğiyle yanımda olan değerli meslektaşlarım ve dostlarım Oktay ÜNAL'a, Fevzi BEDİZ'e, Ömer BALİ'ye ve Aslı TEZOL ALTAŞ'a minnettarım.

Hayatım boyunca her koşulda yanımda olan, beni sabırla destekleyen sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim. Varlıkları ve bana olan inançları sayesinde bu süreci tamamlamak mümkün olmuştur.

Bu çalışmayı, zorlu bir akademik yolculuğun ürünü olarak tamamlamış olmaktan büyük mutluluk ve gurur duyuyorum.

MERT COŞKUN

26/06/2025

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Mert COŞKUN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI.....	III
ÖZET	IV
ABSTRACT	V
TEŞEKKÜR.....	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
GÖRSELLER DİZİNİ	XIII
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	6
3. DENEYSEL YÖNTEM.....	13
3.1. Numune Boyutları ve Detayları	13
3.1.1. TK-3 numunesi onarım aşamaları	16
3.1.2. TK-4 numunesi güçlendirme aşamaları	19
3.2. Malzeme Özellikleri	21
3.2.1. Beton	21
3.2.2. Donatı çeliği.....	24
3.2.3. Ø40 Transmisyon mili	26
3.3. Numunelerin Üretimi	27
3.3.1. Donatı imalatı.....	27
3.3.2. Kalıp imalatı.....	29
3.3.3. Beton dökümü	30

3.4. Deney Düzenegi.....	31
3.4.1. Eksenel yük sistemi.....	31
3.4.2. Deney düzeneginin kurulması	35
3.4.3. Veri okuma sistemi	37
3.4.4. Deney yöntemi.....	38
4. DENEY SONUÇLARI	40
4.1. TK-1 Test Numunesi.....	41
4.2. TK-2 Test Numunesi.....	44
4.3. TK-3 Test Numunesi.....	47
4.4. TK-4 Test Numunesi.....	50
4.5. TK-5 Test Numunesi.....	53
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	56
5.1. Dayanım	56
5.2. Rijitlik Azalımı.....	58
5.3. Süneklik.....	61
5.4. Enerji Sönümleme Kapasitesi	64
6. SONUÇLAR.....	66
KAYNAKÇA.....	68
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1. Beton basınç dayanım değerleri (MPa)	24
Tablo 3.2. Donatı akma dayanımları (MPa).....	26
Tablo 3.3. Numuneler için hesaplanan eksenel yük miktarları	36
Tablo 4.1. TK-1 çevrimsel yüklemelerin ilk çevrimlerinde elde edilen yük- deplasman değerleri	43
Tablo 4.2. TK-2 çevrimsel yüklemelerin ilk çevrimlerinde elde edilen yük- deplasman değerleri	46
Tablo 4.3. TK-3 çevrimsel yüklemelerin ilk çevrimlerinde elde edilen yük- deplasman değerleri	49
Tablo 4.4. TK-4 çevrimsel yüklemelerin ilk çevrimlerinde elde edilen yük- deplasman değerleri	52
Tablo 4.5. TK-5 çevrimsel yüklemelerin ilk çevrimlerinde elde edilen yük- deplasman değerleri	55
Tablo 5.1. Numunelerin sekant rijitlik değerleri	61

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1. Numunelerin donatı yerleşimi	14
Şekil 3.2. Numunelerin donatı planları.....	15
Şekil 3.3. 28 günlük beton basınç dayanım grafikleri	22
Şekil 3.4. Deney günü TK-1 beton testi sonuçları.....	22
Şekil 3.5. Deney günü TK-2 beton testi sonuçları.....	23
Şekil 3.6. Deney günü TK-4 beton testi sonuçları.....	23
Şekil 3.7. Deney günü TK-5 beton testi sonuçları.....	24
Şekil 3.8. Ø8 Donatı için gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri	25
Şekil 3.9. Ø14 Donatı için gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri	25
Şekil 3.10. Ø16 Donatı için gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri	26
Şekil 3.11. Ø40 Transmisyon mili gerilme – birim şekil değiştirme grafiği.....	27
Şekil 3.12. Eksenel yük sistemi genel görünümü	32
Şekil 3.13. Eksenel yük sistemi alt parçası.....	32
Şekil 3.14. Eksenel yük sistemi üst parçası	33
Şekil 3.15. Eksenel yük sistemi mafsallık detayı.....	33
Şekil 3.16. Numunelere ait yükleme protokolü	37
Şekil 3.17. Deney düzeneği yerleşim planı	37
Şekil 3.18. Veri toplama cihazı kanal ayarları.....	38
Şekil 3.19. Veri okuma cihazlarının yerleşimi	39
Şekil 4.1. Deney sırasında numuneye etkiyen yük bileşenleri	41
Şekil 4.2. TK-1 histerezis eğrisi	42
Şekil 4.3. TK-2 histerezis eğrisi	45
Şekil 4.4. TK-3 histerezis eğrisi	48
Şekil 4.5. TK-4 histerezis eğrisi	51
Şekil 4.6. TK-5 histerezis eğrisi	54

Şekil 5.1. Numunelerin zarf eğrileri	58
Şekil 5.2. Numunelerin rijitlik azalması	59
Şekil 5.3. Numunelerin rijitlik hesabı örneği (%0.1 GKÖ için)	60
Şekil 5.4. Sekant rijitliği hesaplama örneği	61
Şekil 5.5. Enerji eşitleme ilkesine göre hesap örneği	62
Şekil 5.6. İdealize edilmiş zarf eğrileri	63
Şekil 5.7. Enerji sönümlleme kapasitesi hesap örneği (%0.1 GKÖ için)	64
Şekil 5.8. Enerji sönümlleme kapasiteleri	64



GÖRSELLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Görsel 1.1. Marmara depremi sonucu meydana gelen hasarlar	2
Görsel 1.2. Kahramanmaraş depremi sonucu meydana gelen hasarlar (AFAD, 2023)	4
Görsel 2.1. Birleşim bölgesindeki enine donatı yetersizliği kaynaklı hasarlar (Avşar vd, 2023)	6
Görsel 3.1. TK-3 onarım aşamaları	17
Görsel 3.2. TK-4 güçlendirme yöntemi	20
Görsel 3.3. Beton silindir numuneleri	21
Görsel 3.4. Donatı kesim işlemi	27
Görsel 3.5. Bükümü yapılan donatılar	28
Görsel 3.6. Donatıları bağlanmış numuneler	29
Görsel 3.7. Kalıp imalatı	30
Görsel 3.8. Beton dökümü ve kalıp sökümü	30
Görsel 3.9. Eksenel yük sistemi mafsal kontrolü	34
Görsel 3.10. Eksenel yük sistemi kaynak işleri	34
Görsel 3.11. Mafsal takozuna ve millere dış açılma işlemi	35
Görsel 3.12. Deney sistemi	36
Görsel 4.1. TK-1 numunesi hasar tipleri	42
Görsel 4.2. TK-2 numunesi hasar tipleri	45
Görsel 4.3. TK-3 numunesi hasar tipleri	48
Görsel 4.4. TK-4 numunesi hasar tipleri	51
Görsel 4.5. TK-5 numunesi hasar tipleri	54

1. GİRİŞ

Dünyanın farklı bölgelerinde, çeşitli yapı malzemeleri kullanılarak inşa edilmiş çok sayıda yapı tipi bulunmaktadır. Bu yapılar genel olarak ahşap, çelik, prefabrik ve betonarme yapılar olarak sınıflandırılabilir. Türkiye’de ise ekonomik avantajları ve imalat kolaylıkları nedeniyle betonarme yapılar, diğer yapı türlerine kıyasla daha fazla tercih edilmektedir. Taşıyıcı sistem bileşenleri; temel, kolon, perde, kiriş ve döşeme gibi birçok elemandan oluşur. Bu yapısal elemanların, deprem etkileri altında sünek davranış sergilemeleri beklenmektedir. Yönetmelikler, sünek davranışın sağlanabilmesi için gerekli hesap yöntemlerini ve detay çizimlerini sunmaktadır. Zamanla, artan ihtiyaçlara yanıt verebilmek amacıyla bu yönetmelikler güncellenmiştir. Güncel deprem yönetmeliği olan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY2018), 1947 yılından bu yana yürürlüğe giren sekizinci deprem yönetmeliğidir ve sırasıyla 1953, 1961, 1968, 1975, 1998, 2007 ve son olarak 2018 yıllarında revize edilmiştir. 1999 yılında meydana gelen depremlerde yaşanan ağır can ve mal kayıpları, Türkiye açısından bir dönüm noktası olmuştur. Bu depremlerden sonra, 2000 yılında Türk Standartları Enstitüsü tarafından “Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları” (TS500) yayımlanmıştır. Ardından, 29 Haziran 2001 tarihinde 4708 sayılı Yapı Denetimi Hakkında Kanun yürürlüğe girmiş ve Adana, Ankara, Antalya, Aydın, Balıkesir, Bolu, Bursa, Çanakkale, Denizli, Düzce, Eskişehir, Gaziantep, Hatay, İstanbul, İzmir, Kocaeli, Sakarya, Tekirdağ ve Yalova gibi pilot illerde uygulanmaya başlanmıştır. Bu kanunun amacı, uygulama hatalarının önüne geçmek ve yapıların deprem performansını iyileştirmektir. Ancak, pilot illerden biri olan Hatay’da, Kahramanmaraş–Elbistan depremi sonrasında yapılan gözlemler, uygulama sırasında hâlâ hataların meydana gelebildiğini (Kazaz, Avşar ve Dilsiz, 2024) göstermiştir.

17 Ağustos 1999 Kocaeli ve 12 Kasım 1999 Düzce depremleri, 1939 Erzincan depreminden sonra Türkiye’de 20. yüzyılda meydana gelen en büyük depremler olmuştur. Resmî kayıtlara göre, Kocaeli depreminde 17.322, Düzce depreminde ise 950 kişi hayatını kaybetmiştir. Her iki depremde de Gölcük, Adapazarı, Derince, Değirmendere, Düzce, Gölyaka ve Kaynaşlı gibi yerleşim bölgeleri neredeyse tamamen yıkılmıştır. Toplamda 330.000 bağımsız birimin etkilendiği, bunlardan 118.000’inin hafif, 112.000’inin orta, 100.000’inin ise ağır hasar aldığı ya da tamamen yıkıldığı bildirilmiştir. Genel ekonomik kayıpların yaklaşık 10 milyar dolar civarında olduğu tahmin edilmekte

olup, bu durum 1999 yılında Türkiye'nin gayri safi yurt içi hasılasında %6'lık bir daralmaya yol açmıştır (Sucuoğlu, 2000). Yapısal hasarların büyük çoğunluğu, mühendislik hizmeti almadan inşa edilmiş betonarme yapılarda yoğunlaşmıştır. Özellikle temel göçmeleri, yumuşak kat düzensizlikleri, güçlü kiriş-zayıf kolon davranışı, kolon-kiriş birleşim bölgelerinde etriye sıklaştırmasının yetersiz olması ve kısa kolon davranışı, birçok yapının ani göçmesine neden olmuştur (Bruneau, 2002 ve Saatçioğlu vd., 2001). Marmara depremi sonrası meydana gelmiş olan bazı yapısal hasarlar hasarlar Görsel 1.1'deki gibidir.



(a) Yumuşak kat düzensizliği
(Bruneau vd., 2002)



(b) Temel göçmesi (Bruneau vd., 2002)



(c) Güçlü kolon-zayıf kiriş davranışı
(Bruneau vd., 2002)



(d) Güçlü kolon-zayıf kiriş davranışı
(Saatçioğlu vd., 2001)

Görsel 1.1. Marmara depremi sonucu meydana gelen hasarlar



(e) Etriye sıklaştırmalarının yetersiz olması
(Bruneau vd., 2002)



(f) Etriye sıklaştırmalarının yetersiz olması
(Saatçioğlu vd., 2001)



(g) Kısa kolon davranışı kaynaklı hasar (Saatçioğlu vd., 2001)

Görsel 1.1. (Devam) Marmara depremi sonucu meydana gelen hasarlar

6 Şubat 2023 tarihinde Türkiye, tarihinin en yıkıcı depremlerinden biriyle karşı karşıya kalmıştır. Aynı gün içerisinde meydana gelen iki büyük deprem; ilki saat 04:17'de Pazarcık merkezli Mw 7,7, ikincisi ise saat 13:24'te Elbistan merkezli Mw 7,6 büyüklüğünde gerçekleşmiştir. Bu depremler, Doğu Anadolu Fayı (DAF) ve ona bağlı fay parçaları boyunca yaklaşık 400 km'yi aşkın yüzey kırığı oluşturmuş; başta Kahramanmaraş olmak üzere, Hatay, Gaziantep, Adıyaman, Malatya, Elazığ, Diyarbakır, Adana, Osmaniye, Kilis ve Şanlıurfa olmak üzere 11 il doğrudan etkilenmiştir. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından hazırlanan resmi rapora göre, depremler sonucunda 50.783 kişi hayatını kaybetmiş, 107.204 kişi yaralanmış ve 227.027 bina ağır hasarlı, yıkık ya da acil yıkılacak durumda tespit edilmiştir. Depremler yaklaşık 14 milyon kişiyi doğrudan etkilemiş, toplam ekonomik kayıp ise 103 milyar dolar olarak

tahmin edilmiştir (AFAD, 2023). Yapılan saha gözlemleri ve mühendislik incelemeleri, yapı stoğunun önemli bir kısmında ciddi taşıyıcı sistem kusurlarının bulunduğunu ortaya koymuştur. Özellikle kısa kolon oluşumları, yumuşak kat düzensizlikleri ve zayıf zemin koşulları yıkımda belirleyici rol oynamıştır (Görsel 1.2). Özellikle kolon-temel birleşim bölgesinde etriyenin bulunmamasına bağlı hasarlar ön plana çıkmıştır (Görsel 2.1).



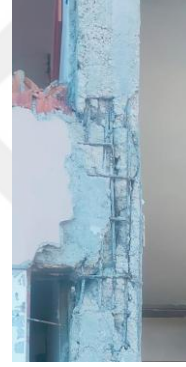
(a) Zemin sıvılaşması kaynaklı hasar



(b) Yumuşak kat düzensizliği kaynaklı hasarlar



(c) Güçlü giriş-zayıf kolon kaynaklı hasar



(d) Yetersiz sıkılaştırma kaynaklı hasar



(e) Kısa kolon kaynaklı hasar

Görsel 1.2. Kahramanmaraş depremi sonucu meydana gelen hasarlar (AFAD, 2023)

Deprem gibi doğal afetlerin ardından ağır hasar almış yapıların tamamen yıkılması ya da kullanılamaz hâle gelmesi, ulusal ekonomi üzerinde doğrudan ve ciddi olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu çalışmada, 2023 yılında meydana gelen Kahramanmaraş merkezli depremlerde, özellikle kolon-temel birleşim bölgelerinde gözlemlenen hasarlar

incelenmiştir. Çalışma kapsamında, söz konusu hasarların temel nedenlerinden biri olarak değerlendirilen kolon-temel birleşim bölgelerinde etriye bulunmaması durumu detaylı biçimde araştırılmıştır.

İncelemeler, yalnızca hasarın nedenlerine odaklanmakla kalmamış; aynı zamanda bu tür yapı elemanlarının deprem sonrası onarımı ve deprem öncesi güçlendirilmesine yönelik uygulamaları da kapsamıştır. Tezin ana temasını, bu onarım ve güçlendirme yöntemlerinin değerlendirilmesi oluşturmaktadır. Çalışmanın nihai amacı ise, deprem sonrasında hasar görmüş yapıların etkin biçimde onarılmasının yanı sıra, henüz deprem yaşamamış ancak dış kenar kolonlarının kolon-temel birleşim bölgelerinde enine donatı eksikliği bulunan ve bu nedenle potansiyel risk taşıyan yapıların önceden güçlendirilmesini sağlamaktır. Böylece hem can güvenliği artırılmakta hem de olası yapısal hasarların önüne geçilerek ülke ekonomisine katkı sunulması hedeflenmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Türkiye'de betonarme yapılar, depreme dayanıklı tasarım ilkeleri doğrultusunda TS500-2000 ve TBDY2018 yönetmeliklerine uygun olarak projelendirilmektedir. Ancak yapı denetim sistemi ve şantiye şefliği gibi kontrol mekanizmalarına rağmen, 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş–Elbistan depreminin ardından yapılan saha gözlemleri, pek çok yapının inşaat aşamasında yapılan hatalar nedeniyle hasar gördüğünü ortaya koymuştur (Avşar vd., 2023). Bu hatalardan biri, bu tezin konusu olan kolon–temel birleşim bölgelerinde enine donatıların yer almamasından kaynaklı hasarlardır (Görsel 2.1).



Görsel 2.1. Birleşim bölgesindeki enine donatı yetersizliği kaynaklı hasarlar (Avşar vd, 2023)

Kolon alt uçlarında meydana gelen yüksek kesme kuvvetleri ve olası plastik şekil değiştirmeler, bu bölgelerde enine donatının etkin bir şekilde düzenlenmesini gerekli kılmaktadır. Bu kapsamda, enine donatının kolon alt uçlarında sadece kolon yüksekliği boyunca değil, aynı zamanda temel içerisine de belirli bir mesafede devam ettirilmesi, yapısal bütünlük ve süneklik açısından büyük önem taşımaktadır. Türk Deprem Yönetmelikleri, bu gerekliliğe farklı dönemlerde farklı derecelerde vurgu yapmıştır. 1975 tarihli Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, kolonlardaki enine donatı aralıklarını kolon sarılma bölgesi, orta bölgesi ve kolon-kiriş bağlantı bölgesi olarak üç kısımda incelemiştir. Fakat temel içerisine uzatılacak enine donatıya ilişkin açık ve doğrudan bir düzenleme içermemektedir. Yönetmelikte kolon ve kirişlerde minimum etriye oranları belirtilmiş olsa da kolon alt uçlarında plastik mafsallara bağlı olarak temel içerisine uzatma gerekliliği tanımlanmamıştır. 1998 tarihli Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelikte, temel içerisine uzatılacak enine donatıya ilişkin açık bir madde bulunmaktadır. Yönetmeliğin 7.3.4.1 maddesinde, sarılma

bölgelerinde kullanılacak enine donatıların temel içerisinde de en az kolonun dar kenar boyutunun iki katı kadar bir yükseklik boyunca devam ettirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. 2007 tarihli Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Esaslar incelendiğinde ise, sarılma bölgelerinde kullanılacak enine donatıların temel içinde de 300 mm'den ve en büyük donatı çapının 25 katından az olmayan bir yükseklik boyunca devam ettirileceği vurgulanmıştır. Son olarak bu madde TBDY 2018'de, kolon sarılma bölgelerinde kullanılan enine donatıların, temel içinde kolonun en küçük boyutundan az olmayan bir yükseklik boyunca devam ettirilmesi şeklinde vurgulanarak son halini almıştır. Kolon-temel birleşimlerindeki etriyelerin nasıl imal edileceği Eurocode 8 ve ACI-318 yönetmeliklerinde de incelenmiştir. Eurocode 8'e göre, kolon-temel birleşimlerindeki etriye aralıklarının, kolon-kiriş bağlantı noktalarında tanımlanmış olan sarılma bölgelerindeki şartlara uygun olacak şekilde imal edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. ACI-318 yönetmeliğinde ise, kolonların temelin kenarından itibaren yarım temel derinliği mesafesi içinde bir kenara sahip olduklarında, temel üst kotunun altında enine donatı şartlarının belirtildiği maddelere uygun donatı ile imalatın gerçekleştirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Görsel 2.1'de görüldüğü üzere, yönetmeliğe aykırı şekilde yapılan bu uygulamalar sonucunda hem kolon tabanında hem de temel seviyesinde boyuna donatılarda burkulmalar meydana gelmiş ve taşıyıcı sistemde hasar oluşmuştur. Bu durum, özellikle kenar ve köşe kolonlarının alt uçlarında daha belirgin şekilde tespit edilmiştir. Kolon altındaki temel betonu veya temel kirişi örtü betonunun ezilerek yerinden oynaması durumunda, boyuna donatıları yerinde tutacak enine donatıların bulunmaması, köşe ve kenar kolonlarını kritik hâle getirmektedir (Avşar vd., 2023). Saatçioğlu vd., (2001), 1999 Kocaeli depremi sırasında çok katlı betonarme çerçeve yapıların, özellikle zayıf zemin koşullarında ve yetersiz detaylandırma nedeniyle ağır hasar aldığını rapor etmiştir. Hasarlı yapılarda sık rastlanan uygulama hataları kolonlarda yetersiz enine donatı kullanımı, enine donatı kancalarının 90 derece ile sonlandırılması ve kolon-kiriş birleşim bölgelerinde enine donatı kullanılmaması olarak raporlanmıştır. Enine donatı uygulamalarının eksik ve hatalı olması sonucunda ise kesme hasarı sonucunda gevrek kırılma gözlenmiştir.

Yapılan çeşitli çalışmalarda kolon-kiriş birleşim bölgelerinin güçlendirilmesinde çelik elemanların, çelik lif takviyeli kompozit sistemlerin ve karbon fiber katkılı polimerlerin (CFRP) kullanımı araştırılmıştır. Özellikle dıştan uygulanan çelik profil

takviyeleri, enine donatı eksikliğini telafi etmeyi hedeflemektedir. Bu yöntemde, çelik L profilleri (açılı çelik elemanlar) ve çelik plakalar birleşim bölgesine dıştan monte edilmekte ve çelik çubuklarla sıkılarak sabitlenmektedir. Bu uygulama, pratik ve etkili bir güçlendirme tekniği olarak değerlendirilmektedir. Fukuyama, Higashibata ve Miyauchi (2000), kolonların çelik levha ile güçlendirilerek süneklik ve taşıma kapasitelerinin artırılabilceğini deneysel olarak göstermiştir. 2.3 mm kalınlıkta çelik levha ile mantolama yapılan numune, sabit eksenel yük ve çevrimsel yatay yükleme altında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, çelik levha ile sarılmış kolonlar, referans numunesine göre %17 daha yüksek dayanım performansı göstermiştir. Tarabia ve Albakry (2014), çelik köşebent ve şeritlerle oluşturulan çelik kafes sistemlerinin betonarme kolonların taşıma kapasitesini ve sünekliğini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Toplam 10 adet kolon numunesi eksenel yük altında test edilmiştir. Güçlendirilmiş kolonların, referans numunesine kıyasla %35 ila %108 arasında daha yüksek taşıma kapasitesine ulaştığı raporlanmıştır. En düşük dayanım artışı, çelik köşebentlerin aralıklarının fazla olduğu ve çimento kullanılarak ankre edilmiş numunelerde gözlenirken, en yüksek dayanım artışının ise aralıkların az olduğu ve epoksi bazlı kimyasal harç ile ankre edilen numunelerde olduğu gözlenmiştir. Böylelikle epoksi bazlı kimyasal harcın, çimentoya göre daha iyi çalıştığı söylenmiştir. Li, Gong ve Wang (2009), yaptıkları deneylerde üç farklı türde güçlendirme yöntemi uygulamışlardır. Bunlar sırasıyla sadece CFRP ile güçlendirme, çelik köşebent ve çelik levha ile güçlendirme ve CFRP ile çelik elemanların beraber kullanıldığı durum olarak raporlanmıştır. Sadece CFRP uygulandığı durumda sünekliğin %108 oranında arttığı ancak taşıma kapasitesinin sınırlı kaldığı, çelik elemanların kullanıldığı durumda taşıma kapasitesinin %60 arttığı, her ikisinin kullanıldığı durumda ise dayanımın ve sünekliğin sırası ile %93 ve %122 oranında arttığı rapor edilmiştir. Kolonların CFRP ve çelik korniyer kombinasyonu ile güçlendirilmesinin hem taşıma kapasitesini hem de sünekliği önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Chong vd., (2024), yaptıkları çalışmada 1/2 ölçekli tek açıklıklı iki katlı bir betonarme çerçeveyi önce eksenel ve çevrimsel yatay yükleme altında ileri hasar seviyesine getirmişlerdir. Ardından numune, çelik elemanlar kullanılarak epoksi bazlı kimyasal harç ile güçlendirilmiş ve aynı yükleme ile deney tekrarlanmıştır. Deneyler sonunda taşıma kapasitesinin %72 arttığı, sünekliğin ise %14 azaldığı gözlenmiştir. Depremde ileri seviyede hasar görmüş betonarme çerçeve sistemlerinin çelik köşebent ve şeritlerle güçlendirilmesi sonucu taşıma kapasitesi ve

rijitliğin belirgin şekilde arttığını ortaya koymuştur. Dang ve Dinh (2017), deprem etkilerine karşı yetersiz donatı detaylarına sahip mevcut betonarme dış kiriş-kolon birleşimlerinin sismik performansını iyileştirmeye yönelik iki farklı güçlendirme yönteminin etkinliğini deneysel olarak incelemişlerdir. Numunelerden biri referans olarak bırakılmış, diğer üçü ise çelik manto ve guse elemanı yöntemleri ile güçlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, güçlendirme uygulanmamış birleşim bölgesinin erken kesme kırılmasıyla düşük deformasyon kapasitesine ulaştığını; buna karşın çelik manto yöntemiyle güçlendirilen numunelerin yaklaşık %25, guse elemanları ile güçlendirilen numunenin ise %76 oranında daha yüksek yanal yük taşıma kapasitesi elde ettiğini göstermiştir. Le-Trung vd., (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, sismik detaylandırması yetersiz olan dış betonarme kiriş-kolon birleşimlerinin karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitlerle güçlendirilmesinin etkilerini deneysel olarak incelemektedir. Bu amaçla, toplam sekiz adet 1/3 ölçekli birleşim numunesi hazırlanmış ve altı tanesi farklı CFRP sarım konfigürasyonları ile güçlendirilmiştir. Uygulanan CFRP düzenleri arasında T-şekli, L-şekli, X-şekli ve çeşitli şerit kombinasyonları yer almaktadır. Güçlendirilmiş numuneler arasında en başarılı performansı X-şekilli CFRP sarımıyla güçlendirilmiş numuneler göstermiştir. Bu sarım şekli, birleşim bölgesindeki ana gerilme doğrultularına daha uygun düşmesi nedeniyle hem taşıma gücü hem de süneklik açısından belirgin iyileşmelere yol açmıştır. L-şekilli CFRP sarımlarının ve özellikle kiriş uçlarına uygulanan U-şekilli şeritlerin, birleşim davranışını iyileştirme açısından sınırlı etkiler gösterdiği, hatta bazı durumlarda erken soyulma (debonding) nedeniyle olumsuz etkiler yarattığı belirlenmiştir. Del Vecchio vd., (2014) tarafından yürütülen çalışmada, yetersiz detaylandırılmış dış betonarme kiriş-kolon birleşimlerinin lifli polimer (FRP) sistemleriyle güçlendirilmesi konusundaki deneysel bulguları sunmaktadır. Bu kapsamda, iki adet referans numunesi (güçlendirilmemiş) ve dört adet FRP ile güçlendirilmiş olmak üzere toplam altı dış birleşim numunesi hazırlanmıştır. Numuneler, 2/3 ölçekli ve dış birleşim detaylarını temsil edecek şekilde tasarlanmıştır. Deney sonuçlarına göre, FRP ile güçlendirilmiş edilmiş birleşimler, göreceli yatay yer değiştirme kapasitelerinde ortalama %100'e varan artış sağlamış; göçme mekanizmalarının birleşim kesmesinden kiriş eğilmesine kayması sayesinde, yapı davranışında ciddi bir süneklik iyileşmesi elde edilmiştir. Özellikle çapraz sargı şeklinde yerleştirilen CFRP kumaşlar, birleşim bölgesindeki ana çekme gerilmelerine karşı direnç

oluşturarak, hasar oluşumunu geciktirmiş ve kiriş eğilme göçmesine yönelen daha sünek bir davranış biçimi sağlamıştır.

Deprem etkisi altındaki yapıların güvenliğinin değerlendirilmesinde kritik rol oynayan kolon-temel birleşim bölgesi için yapılan deneysel ve teorik araştırmalar incelenmiştir. Fan vd., (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, prefabrik betonarme kolon-temel bağlantılarında yaygın olarak kullanılan iki farklı bağlantı yöntemi olan grout dolgulu manşon (PC-S) ve grout dolgulu burulmalı kılıf (PC-C) kullanılarak hazırlanan tam ölçekli numunelerin sismik performansları, bir yerinde dökme (CIP) referans numunesi ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Üç numune (PC-S, PC-C ve CIP), yer değiştirme kontrollü, çift yönlü, artan çevrimli yükleme altında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre her iki prefabrik bağlantı tipi de taşıma kapasitesi açısından CIP numunesi ile benzer performans göstermiştir. Ancak, PC-S numunesinde grout manşon bölgesinin üst kısmında donatı burkulması ve etriye kopması meydana gelmiş, bu durum sünekliği azaltmıştır. PC-C numunesinde ise özellikle %2 yatay ötelenme oranından sonra belirgin bir daralma (pinching) davranışı gözlemlenmiş ve bu durum, burulmalı kılıf içinde meydana gelen önemli aderans kayıplarına bağlanmıştır. Zhang vd., (2021) yaptıkları çalışmada, prefabrike betonarme köprü kolonlarının sismik performansını artırmak amacıyla geliştirilen ultra yüksek performanslı beton (UHPC) ile doldurulmuş soket bağlantılı kolon-temel bağlantı sisteminin davranışı araştırılmıştır. Üç adet 1/3 ölçekli prefabrike kolon-temel birleşimi ile bir adet yerinde dökme kolon referans numunesi, sabit eksenel yük altında yatay tersinir çevrimsel yüklere maruz bırakılmıştır. Deneysel sonuçlar, UHPC doldurulmalı soketli bağlantıların hasar yayılımı, enerji tüketimi ve süneklik bakımından yerinde dökme örneklerle benzer performans sergilediğini göstermiştir. Nascimbene ve Bianco (2021) yaptıkları çalışmada, kolon-temel bağlantısında kullanılan çelik pabuç sistemi (steel shoe) ve ankraj cıvatalarının sismik performansı hem deneysel hem sayısal yöntemlerle değerlendirilmiştir. Tam ölçekli üç örnek, değişen eksenel yük seviyelerinde tersinir çevrimsel yatay deplasmanlara maruz bırakılmıştır. Deneylerde, bağlantı sisteminin temel çökme mekanizmasının ankraj cıvatalarının akmasıyla geliştiği ve diğer birleşim bileşenlerinde hasar gözlenmediği raporlanmıştır. Elde edilen histerik davranışlar, %4.8'e kadar göreceli kat öteleme oranlarında belirgin bir dayanım azalması olmaksızın yüksek süneklik ve enerji tüketimi sergilemiştir. Pul vd., (2021) yaptıkları çalışmada demonte edilebilir, montajı kolay ve sismik performansı yüksek bir prefabrike

kolon-temel bağlantı sistemi geliştirilmiş ve değerlendirilmiştir. Dört adet tam ölçekli numune (iki adet tek parça, iki adet prefabrike) sabit eksenel yük altında tersinir çevrimsel yatay yüke maruz bırakılmıştır. Deneysel bulgular, önerilen prefabrike sistemin rijitlik, taşıma kapasitesi, süneklik ve enerji tüketimi açısından tek parça olarak imal edilen örneklerle benzer performans sergilediğini göstermiştir.

Bir yapısal elemanın "kolon" olarak nitelendirilebilmesi için, üzerine belirli bir düzeyde eksenel yük etkimesi gerekir. Kolonlar, taşıyıcı sistem içerisinde düşey yükleri karşılayan kritik elemanlardır. Bu nedenle, gerçekçi bir mekanik davranışın elde edilebilmesi için, deneysel çalışmalarda da bu eksenel yükün uygun şekilde uygulanması büyük önem taşır. Literatürde, kolon davranışını doğru temsil edebilmek amacıyla bu yükün sağlanması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında sabit ağırlık sistemleri, hidrolik yük uygulama mekanizmaları ve önerilmeli çubuklarla yük aktarımı gibi farklı teknikler yer almaktadır. Grgić vd., (2017), yaptıkları çalışmada farklı etriye aralıklarına sahip betonarme kolonların sarsma tablası üzerinde testlerini gerçekleştirerek deprem etkisi altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Kolon üzerine 2 tonluk beton kütleler yerleştirilerek kolonlara sabit eksenel yükleme yapılmıştır. Bu sistem, laboratuvar koşullarımıza uygun olmadığı için kullanılamamıştır. Tao vd., (2024), yaptıkları çalışmada kiriş-kolon birleşim numunelerini sabit eksenel yükleme ve çevrimsel yatay yükleme altında yapmışlardır. Kullanılan eksenel yük sisteminde, çelik profil ile hazırlanmış olan üst yük plakası kolon üzerine yerleştirilmiştir. Bu plaka, güçlü zemine sabitlenen iki çelik profil ile desteklenmiştir. Kolon üst yüzeyinde bulunan piston ile, eksenel yükleme gerçekleştirilmiştir. Xu, Han ve Li (2016) yaptıkları çalışmada eksenel yükü, her test numunesine düşey bir hidrolik krik o vasıtasıyla uygulamışlardır. Üst kısımda bulunan bir mafsal yardımı ile, yatay yükleme sırasında eksenel yük sisteminin yatayda hareket edebilmesi sağlanmıştır. Kriko, kolonun üst kısmına yerleştirilen çelik yük plakası üzerinden basınç iletmiştir. Numuneler yere sabitlenmiş temellere ankrajlanmış ve yatay desteklerle yana kaymaları engellenmiştir. Böylece düşey yük sadece kolon boyunca etkili olacak şekilde izole edilmiştir. Latour ve Rizzano (2019) yaptıkları çalışmada, eksenel yüklemeyi kolonun tepe noktasına yerleştirilen bir piston ile sağlamışlardır. Bu piston, üzerinde bulunan çelik kirişe sabitlenmiştir. Bu çelik kiriş, betonarme temelin altına uzanan yüksek dayanımlı iki çelik çubuk ile sabitlenmiştir. Göksu ve İlki (2016), yaptıkları çalışmada, eksenel yüklemeyi kolon üstünde bulunan

elik plakayı, gl zeminde bulunan elik plakalara sabitlenen güçlü elik çubuklar yardımı ile sabitlemişlerdir. Bu şekilde, sklp takılabilen bir sistem oluşturmuşlardır.

Yapılan literatür taraması sonucunda kolon-temel birleşim bölgesinde prekast birleşimler haricinde bir çalışma olmadığı görülmektedir. Yapılan bu çalışma ile birlikte, yerinde döküm betonarme binaların kolon-temel birleşim bölgesindeki etriye yetersizliği kaynaklı meydana gelebilecek olan hasarlar ile ilgili bilgi eksikliği kapatılmaya çalışılacaktır ve bu bölgelerin onarımı ve güçlendirilmesi için yöntemler geliştirilecektir.



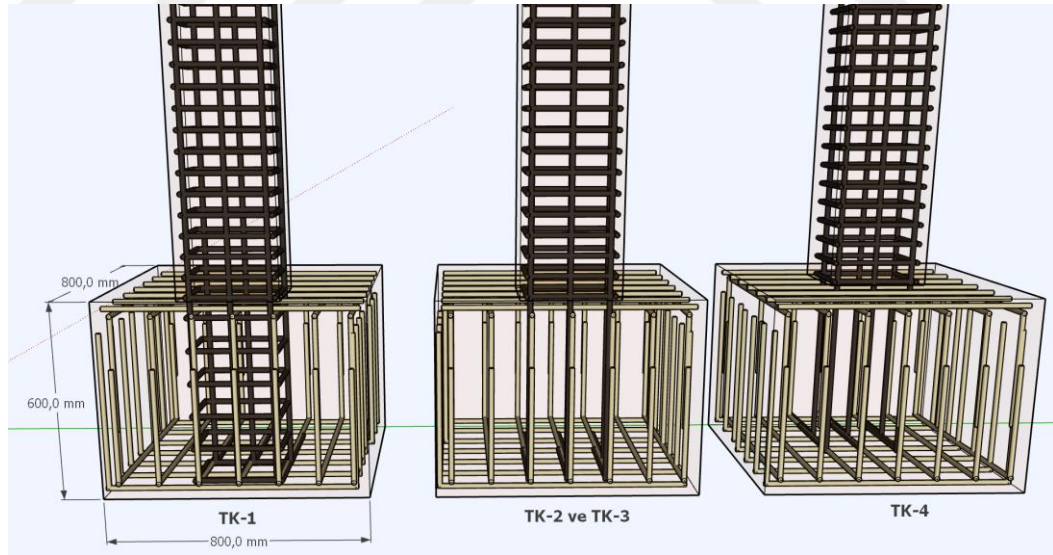
3. DENEYSEL YÖNTEM

TBDY 2018'in 7.3.4 "Enine Donatı Koşulları" başlıklı maddesinde enine donatıların imalat koşulları açıklanmıştır. 7.3.4.1 maddesine göre enine donatıların temel içerisinde kolonun minimum boyutundan küçük olmayan bir yükseklik boyunca devam ettirileceği açıkça belirtilmiştir. Kahramanmaraş merkezli depremler sonrasında yapılan saha gözlemleri, bu koşula uyulmadan imal edilen kolonlarda (özellikle kenar ve köşe kolonlarda) kabuk betonunun atması sonucu temel içerisine devam eden kolon boyuna donatılarının enine donatı bulunmaması sebebi ile burkularak hasar aldığını göstermiştir. Ağır hasarlı yapı sınıfına giren bu yapılar hem can hem de mal kayıplarına sebebiyet vermiştir. Çalışmanın ana konusu olan bu durum deneysel olarak incelenmiştir. Tüm numunelere, her numune için hesaplanan sabit eksenel yük ve çevrimsel yatay yükleme protokolü uygulanmıştır. Bu sayede, farklı detaylandırma ve güçlendirme durumlarının birleşim bölgesinin sünekliği, enerji tüketim kapasitesi ve hasar yayılımı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

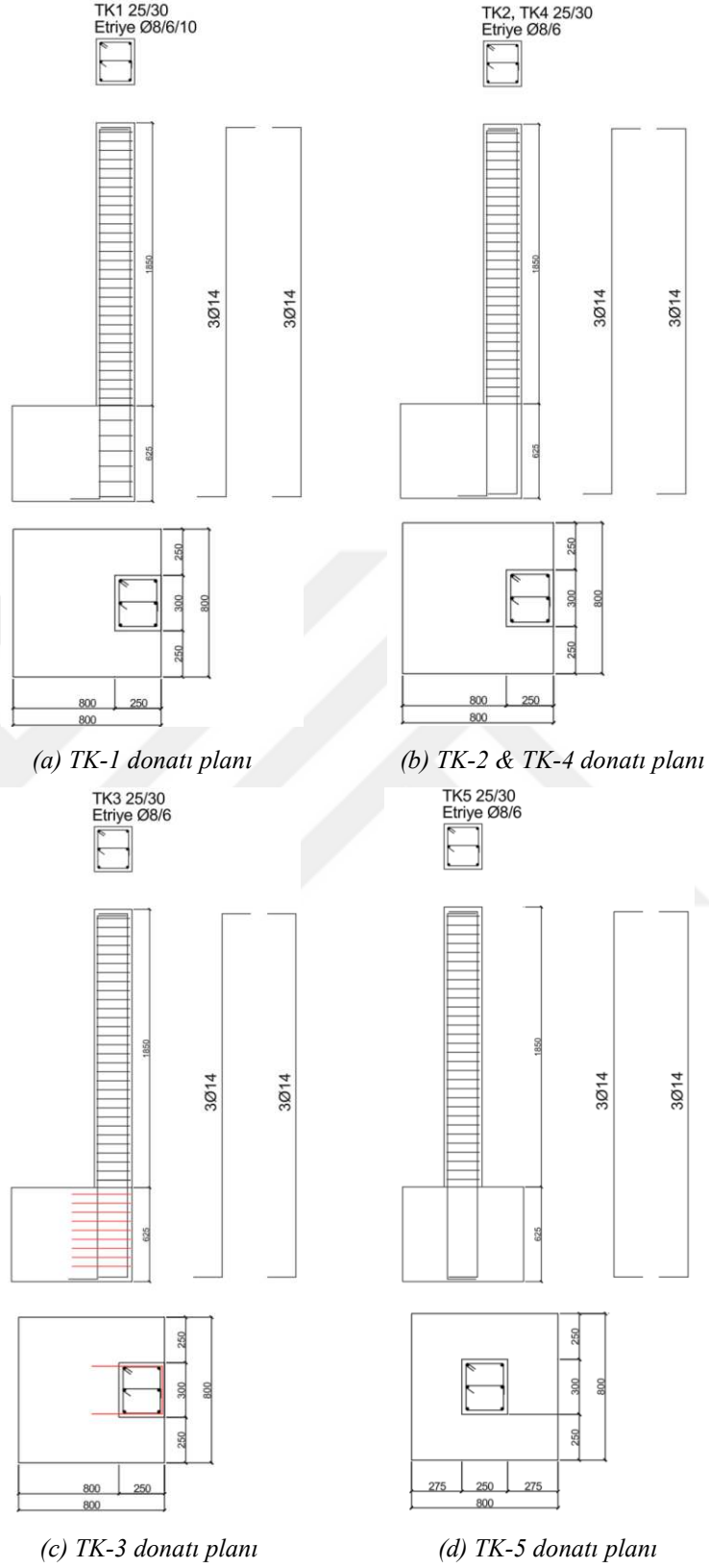
3.1. Numune Boyutları ve Detayları

Çalışma kapsamında, kolon-temel birleşim bölgesinin davranışını incelemek amacıyla dört adet 1/1 ölçekli betonarme deney numunesi imal edilmiştir. Numuneler, farklı detaylandırma ve güçlendirme koşullarını temsil edecek şekilde tasarlanmıştır. Birinci deney numunesi olan TK-1, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) esas alınarak, temel seviyesinde yeterli enine donatı düzenlemesi yapılacak şekilde imal edilmiştir. Bu numune, standartlara uygunluğu nedeniyle referans numune olarak kabul edilmiştir. İkinci numune olan TK-2, yönetmeliklere aykırı olacak şekilde, temel seviyesinde enine donatı yerleştirilmeden üretilmiştir. Bu numune, enine donatı yetersizliğinin birleşim bölgesi davranışına etkilerini gözlemlemek amacıyla tasarlanmıştır. Deney sonucunda ciddi hasar alan TK-2 numunesi, hasar sonrası karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) levhalar kullanılarak onarılmış ve tekrar teste tabi tutulmuştur. Onarılan bu numune TK-3 olarak adlandırılmıştır. Dördüncü numune olan TK-4, tıpkı TK-2 gibi temel seviyesinde enine donatı olmadan üretilmiştir. Ancak bu numune, deney öncesinde birleşim bölgesine dıştan yerleştirilen standart L-profil çelik köşebentler ile güçlendirilmiştir. Bu sayede, deney öncesi güçlendirme yönteminin birleşim davranışına olan etkisi araştırılmıştır. Beşinci ve son numune olan TK-5 ise, yine temel seviyesinde enine donatı içermeyecek şekilde imal edilmiştir. Bu numuneyi

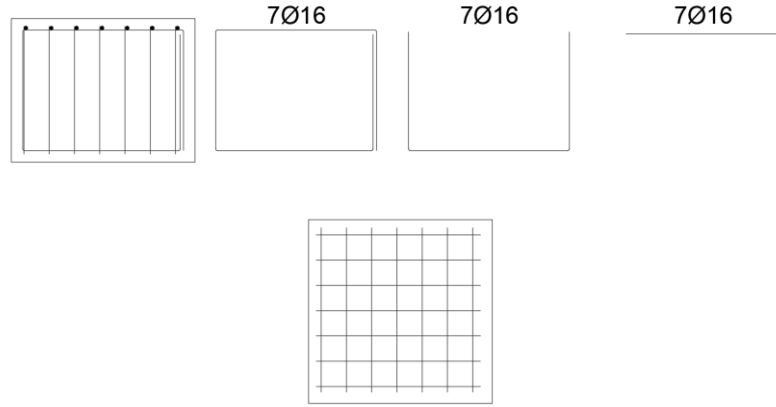
diğerlerinden ayıran temel fark, kenarlarında ampattmanlar kalacak şekilde kolonun temel ortasına yerleştirilmiş olmasıdır. Bu detay, 6 Şubat 2023 tarihli Kahramanmaraş depremleri sonrasında, özellikle bina dış sınırında bulunan kenar kolonların ciddi hasar gördüğü gözlemlerine dayanarak seçilmiştir. TK-5 numunesi ile, temel kenarında yer almayan ve yapı içinde belirli bir mesafe içeride yer alan kolonların enine donatı bulundurmeyen birleşim bölgelerinin sismik davranışı araştırılmıştır. Bütün numunelerde aynı olmak üzere, kolon boyutları TBDY 2007’de belirtilen minimum kolon boyutları olan 250 mm x 300 mm olarak imal edilmiştir. Kolon yüksekliği 1850 mm olarak seçilmiştir. Temel boyutları ise laboratuvar şartlarına göre seçilmiş olup 800 mm x 800 mm x 625 mm olarak imal edilmiştir (Şekil 3.1). Deney sırasında temeller, laboratuvarda bulunan güçlü zemine dört adet somun kullanılarak bağlanmıştır. Böylelikle deney numune temellerinin herhangi bir şekilde yer değiştirme ve dönme hareketi yapmasına izin verilmemiştir. Bütün numunelerde temel seviyesinde Ø16, kolon boyuna donatıları Ø14, etriye ve çiroz olarak Ø8 donatı tercih edilmiştir (Şekil 3.2). Temel seviyesinde kolonlardan daha büyük çaplı donatı kullanılarak temelin kolona göre daha rijit olması sağlanmıştır. Kolonlarda enine donatı aralıkları tüm kolon yüksekliği boyunca sabit 6 cm olarak imal edilerek, kesme hasarının önüne geçilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 3.1. Numunelerin donatı yerleşimi



Şekil 3.2. Numunelerin donatı planları



(e) Temel donatı planı

Şekil 3.2.(Devam) Numunelerin donatı planları

3.1.1. TK-3 numunesi onarım aşamaları

TK-2 numunesine uygulanan depremi benzeştiren yatay çevrimsel yükleme sonucunda, temel seviyesinde kabuk betonunun ezilerek devre dışı kalması ve boyuna donatıların burkulması gibi hasarlar gözlemlenmiştir. Bu hasarların, temel seviyesinde enine donatının bulunmamasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Deneyin tamamlanmasının ardından, TK-2 numunesine CFRP kullanılarak bir onarım yöntemi uygulanmıştır.

İlk aşamada, temel seviyesindeki hasarlar onarılmıştır. Onarım öncesinde, TK-2 numunesi hidrolik piston ile sıfır pozisyonuna (deplasman yapmamış haline) geri getirilmiştir. Temel seviyesinde eksik olan enine donatılar, donatı planına uygun olarak temel seviyesine yerleştirilmiştir. Enine donatılar U şeklinde bükülerek, kol uzunluğu 40 cm olacak şekilde hazırlanmıştır. Donatının yerleştirileceği bölgeler matkap yardımıyla delinmiş, açılan deliklere epoksi esaslı kimyasal ankraj enjeksiyonu uygulanarak boşluklar doldurulmuş ve ardından enine donatılar yerlerine monte edilmiştir (Görsel 3.1 (a)).

Kimyasal ankrajların kürlenmesi için yeterli süre beklendikten sonra, temel yüzeyi yüksek dayanımlı bir tamir harcı (70 MPa) ile kaplanmıştır. Benzer şekilde, kolonda meydana gelen beton hasarları da aynı harç kullanılarak onarılmıştır (Görsel 3.1 (b)).

Çevrimsel yükleme sırasında CFRP kaplamanın temel seviyesindeki performansını artırmak amacıyla, temele 2 mm kalınlığında iki adet çelik plaka monte edilmiştir. Bu plakaları taşıyacak çubuklar, temel üzerine matkapla açılan deliklere yerleştirilmiştir.

Montaj işleminin ardından, deliklerdeki boşluklar epoksi esaslı kimyasal ankraj ile doldurulmuştur (Görsel 3.1 (c)).

CFRP'nin kolon yüzeyine tam yapışmasını sağlamak için, kolonun keskin köşeleri yuvarlatılmıştır. Bu işlemin yapılmaması durumunda, keskin kenarların CFRP malzemesine zarar vererek onarımın etkinliğini olumsuz yönde etkilemesi söz konusudur (Görsel 3.1 (d)).

Beton yüzeyi ile epoksi esaslı onarım ve ankraj harcı arasındaki aderansı artırmak amacıyla, yüzeye 0.1 mm kalınlığında epoksi bazlı bir astar kaplama (primer) uygulanmıştır (Görsel 3.1 (e)).

CFRP sargılamasından önceki son adımda, onarılan bölgeler epoksi esaslı bir onarım ve ankraj harcı ile kaplanmıştır. Bu uygulama, hem geniş çatlakların doldurulmasını sağlamakta hem de onarılan numune ile CFRP kaplama arasında yeterli aderansın oluşmasına katkıda bulunmaktadır (Görsel 3.1 (f)).

Tüm bu işlemlerin ardından, CFRP kaplama uygulanmıştır. Kolon bölgesine iki kat, temel seviyesine ise tek kat CFRP sarılmıştır (Görsel 3.1 (g)).

Son olarak, temel seviyesindeki CFRP levhaların yerinde kalmasını sağlamak amacıyla çelik plakalar monte edilerek onarım işlemi tamamlanmıştır (Görsel 3.1 (h)).



(a) U şeklinde bükülen donatıların yerleştirilmesi

Görsel 3.1. TK-3 onarım aşamaları



(b) Tamir harcı ile onarım



(c) Çelik plakalar için kimyasal dübel uygulaması



(d) Kolon keskin kenarların yuvarlatılması



(e) Astar uygulaması

Görsel 3.1.(Devam) TK-3 onarım aşamaları



(f) Epoksi bazlı tamir harcı uygulaması



(g) CFRP sarılma işlemi



(h) Plakaların sabitlenmesi

Görsel 3.1.(Devam) TK-3 onarım aşamaları

3.1.2. TK-4 numunesi güçlendirme aşamaları

TK-4 numunesine, deney öncesinde bir güçlendirme yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemin temel amacı, mevcut yapılarda sıklıkla karşılaşılan enine donatı yetersizliğinin, yapının tamamen yıkılıp yeniden inşa edilmesine gerek kalmaksızın güçlendirme yoluyla

telafi edilip edilemeyeceğini değerlendirmektir. Glendirme işlemi sırasında, her biri 5 cm kol uzunluğuna sahip toplam beş adet standart elik köşebent (L-profil) kullanılmıştır (Görsel 3.2). Bu köşebentlerin  yatay doğrultuda yerleştirilmiş ve temel seviyesinde etriye görevi görmesi amaçlanmıştır. Diğer iki köşebent ise çapraz olarak konumlandırılmış ve beton içerisindeki iç gerilmelerin yzeyeye dengeli biçimde yayılmasına yardımcı olarak potansiyel hasarın azaltılması hedeflenmiştir. Uygulama sırasında, kşebentleri taşıyacak olan çubukların yerleştirilebilmesi için, her biri 40 cm derinliğinde delikler açılmıştır. Ø8 çaplı sonsuz civatalar deliklere yerleştirildikten sonra, oluşan boşluklar epoksi esaslı kimyasal ankraj malzemesi ile doldurularak sabitleme işlemi tamamlanmıştır.



(a) Temele ankre edilen sonsuz civata



(b) Profillerin uygulanması



(c) Test numunesi genel görünümü

Görsel 3.2. TK-4 güçlendirme yöntemi

3.2. Malzeme Özellikleri

Sonuçların daha iyi değerlendirilebilmesi amacıyla, deney sırasında kullanılmış olan bütün malzemelerin özelliklerini belirlemek amacıyla deneyler yapılmıştır.

3.2.1. Beton

Ülkemizde eski binaların düşük beton dayanımına sahip olduğu bilinmektedir. Özellikle 1999 öncesi yapılan binalarda beton yerinde hazırlanıp dökümü yapıldığından dolayı bu durum gözlenmektedir. Büyük agrega boyutları, bağlayıcı malzemelerin az oluşu ve su oranının yüksek olmasından kaynaklı beton dayanımında düşüş görülmektedir.

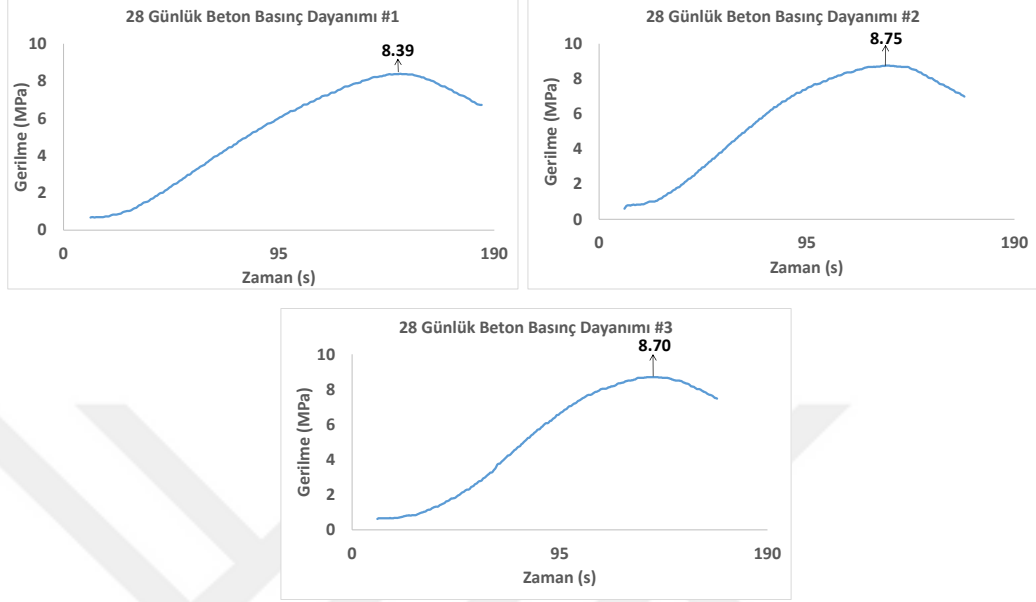
Yapılan çalışmada, ülkemizde sıklıkla görülen dayanımı 10 MPa'a yakın beton kullanılması amaçlanmıştır (Çağatay, 2005). Bu amaç doğrultusunda, beton santralinden istenilen kalitede beton temin edilmiştir. Numunelerin beton dökümü sırasında, 28 günlük beton basınç dayanımı ve her numune için deney günü beton basınç dayanımını tespit edebilmek amacıyla 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde silindir numuneler alınmıştır (Görsel 3.3).



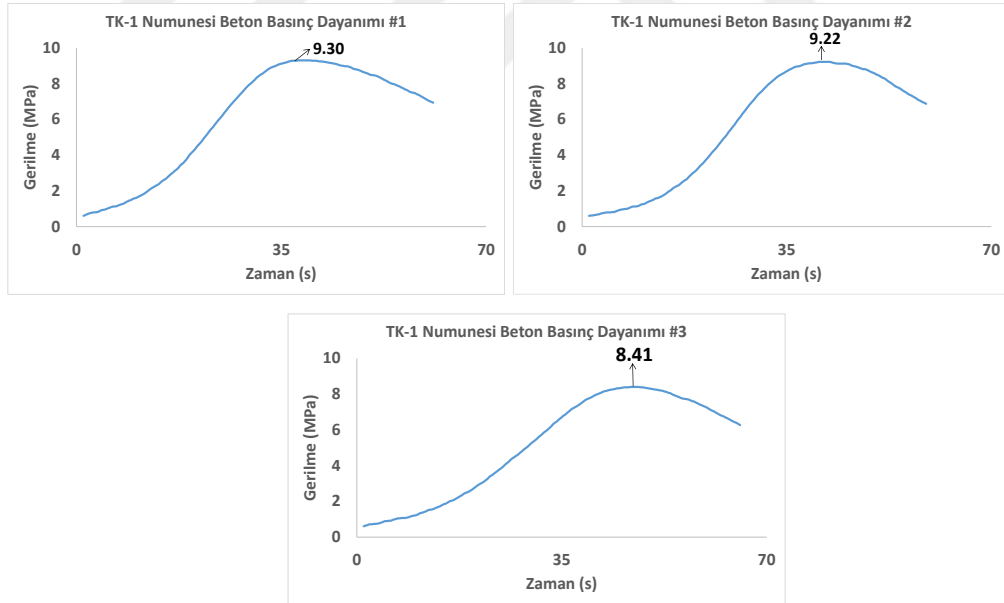
Görsel 3.3. Beton silindir numuneleri

Deney günü belirlenecek olan beton basınç dayanımı, eksenel yük büyüklüğünü belirlemede kullanılacaktır. Her numune için üç adet numune alınmıştır. Yapılan beton basınç deneylerinden elde edilen grafikler aşağıda gösterilmiştir. Yapılan beton basınç deneyleri sonunda, 28 günlük ortalama basınç dayanımı 8.61 MPa çıkmıştır (Şekil 3.3).

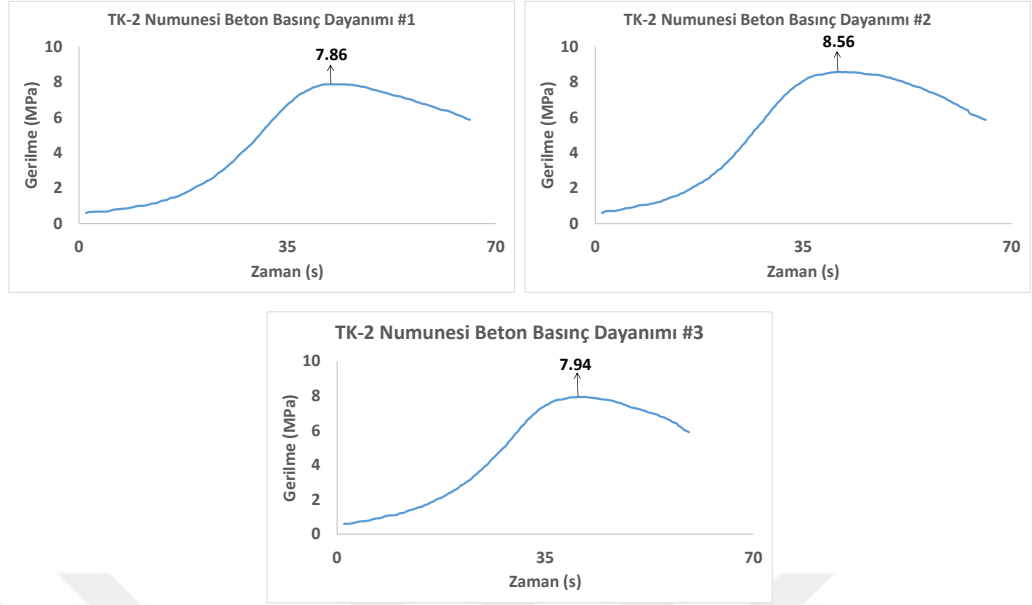
Deney günü yapılan basınç deneyleri sonunda ortalama beton basınç değerleri TK-1 için 8.98 MPa (Şekil 3.4), TK-2 için 8.12 MPa (Şekil 3.5), TK-4 için 8.94 MPa (Şekil 3.6) ve TK-5 için 9.15 MPa çıkmıştır (Şekil 3.7). Tüm değerler Tablo 3.1’de verilmiştir.



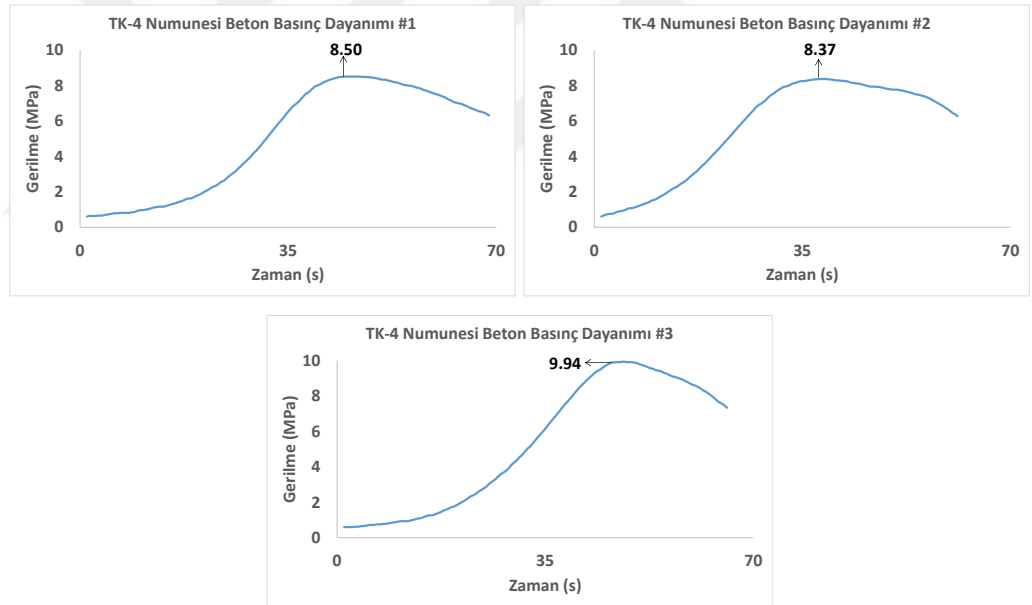
Şekil 3.3. 28 günlük beton basınç dayanım grafikleri



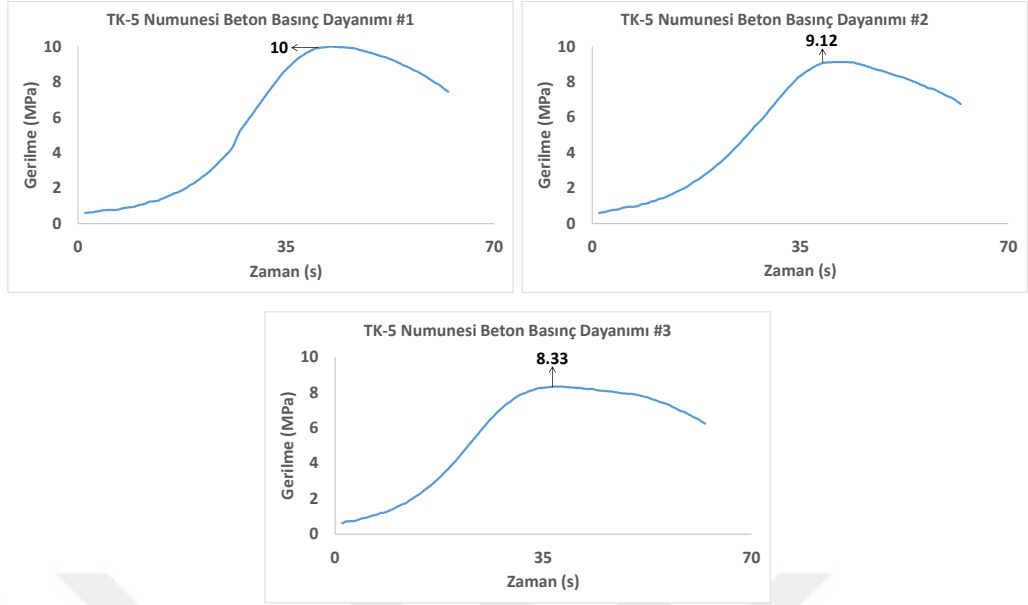
Şekil 3.4. Deney günü TK-1 beton testi sonuçları



Şekil 3.5. Deney günü TK-2 beton testi sonuçları



Şekil 3.6. Deney günü TK-4 beton testi sonuçları



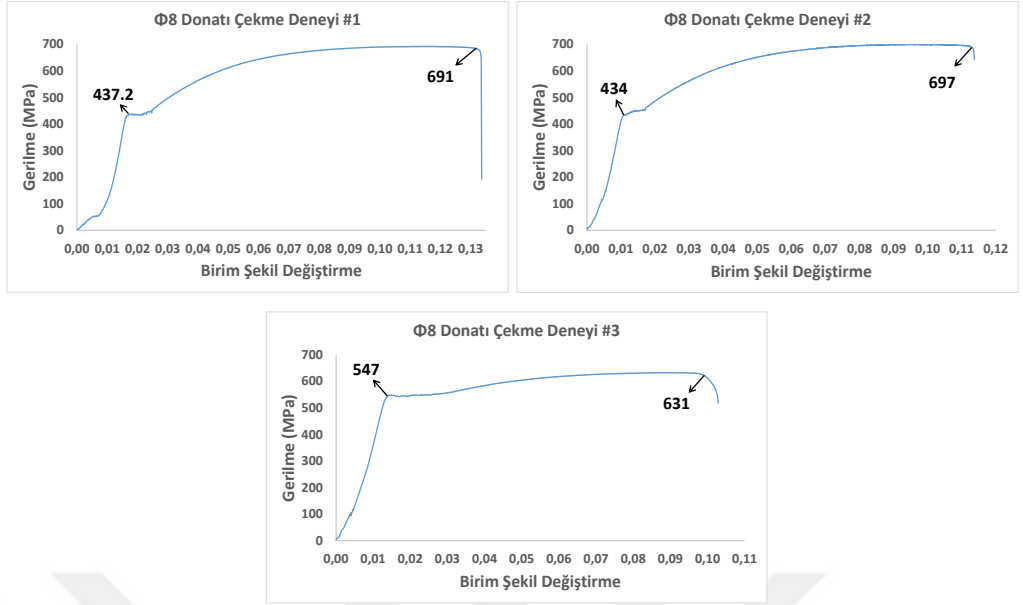
Şekil 3.7. Deney günü TK-5 beton testi sonuçları

Tablo 3.1. Beton basınç dayanım değerleri (MPa)

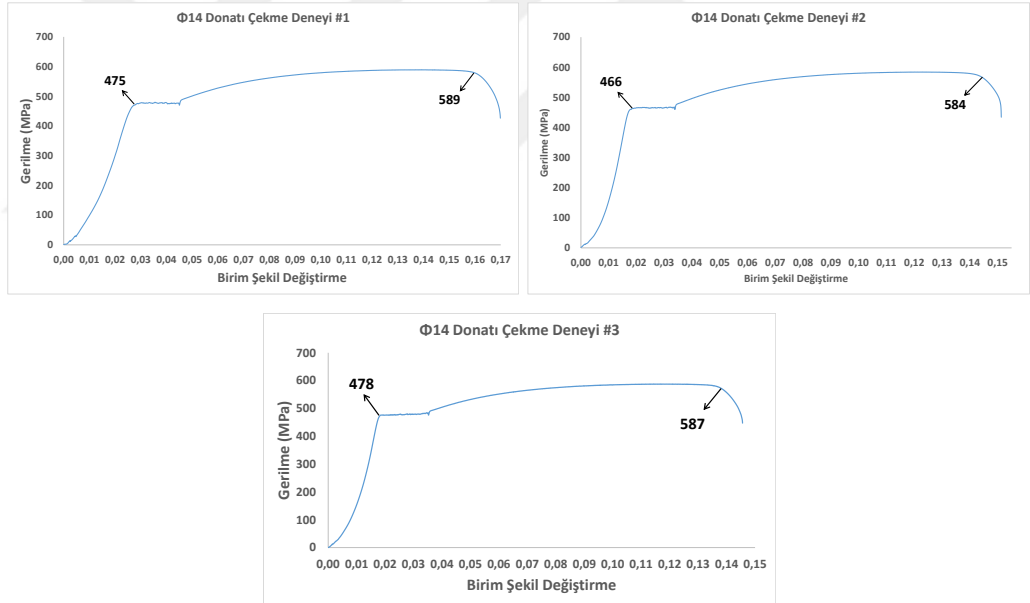
Numuneler	Deney Günü Ortalama Beton Basınç Dayanımı (MPa)
TK-1	8.98
TK-2 & TK-3	8.12
TK-4	8.94
TK-5	9.15

3.2.2. Donatı çeliği

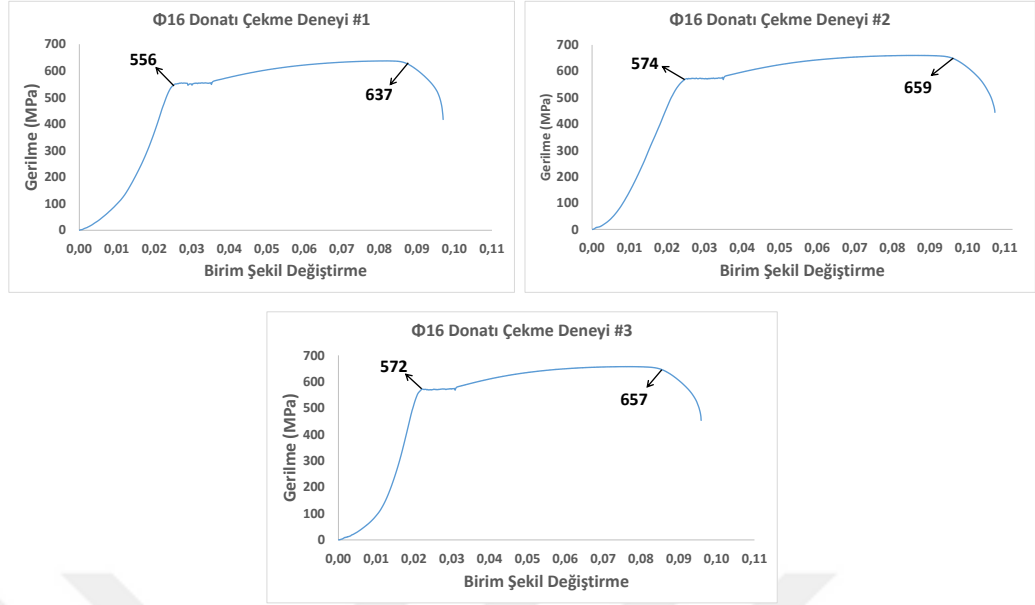
Yapılan çalışmada Ø8, Ø14 ve Ø16 olmak üzere üç farklı çapta donatı kullanılmıştır. Kullanılan donatılardan üçer tane örnek çekme deneyine tabii tutulmuştur ve malzeme özellikleri belirlenmiştir. Ø8 donatı için elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 3.8’de, Ø14 donatı için elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 3.9’da, Ø16 donatı için elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 3.10’da verilmiştir. Testler sonucunda elde edilen ortalama akma ve kopma dayanımları Tablo 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Ø8 Donatı için gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri



Şekil 3.9. Ø14 Donatı için gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri



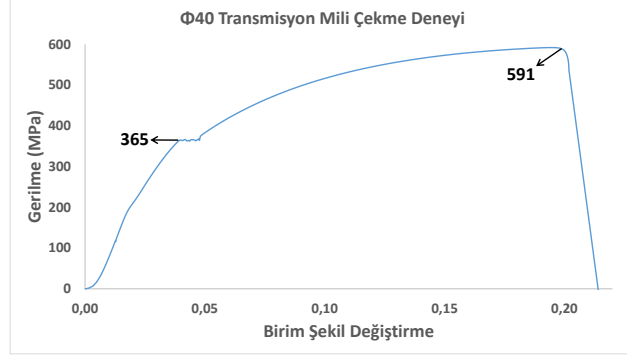
Şekil 3.10. Ø16 Donatı için gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri

Tablo 3.2. Donatı akma dayanımları (MPa)

Donatılar	Ortalama Akma Dayanımı (MPa)	Ortalama Kopma Dayanımı (MPa)
Ø8	473	673
Ø14	473	587
Ø16	567	651

3.2.3. Ø40 Transmisyon mili

Deney düzeneğinde kolonlara uygulanacak eksenel yükün sisteme aktarılmasında kullanılacak olan transmisyon milleri, deneyin tamamlanabilmesi için önemlidir. Kolona verilecek olan eksenel kuvvet sırasında bu elemanlar çekme kuvveti altında kalacaklardır. Yapılan çekme deneyine ait grafik Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Yapılan çekme deneyi sonucunda Ø40 transmisyon millerinin akma noktasına gelmesi için 458 kN kuvvet uygulanacağı hesaplanmıştır. Sisteme uygulanacak eksenel kuvvetlerin en büyüğü değerlendirildiğinde, transmisyon millerinin akma noktasına gelmeden sistemi güvenle taşıyacağı hesaplanmıştır.



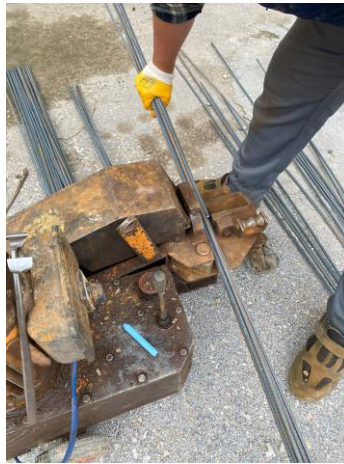
Şekil 3.11. Ø40 Transmisyon mili gerilme – birim şekil değiştirme grafiği

3.3. Numunelerin Üretimi

Deneyde kullanılmak üzere hazırlanan toplam dört numune Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde üretilmiştir. İlk olarak numunelerin donatıları bağlanmış, daha sonra kalıp imalatı yapılmış ve son olarak beton döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Betonlar prizini aldıktan sonra kalıp söküm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında hasarların ve çatlakların daha iyi gözlenebilmesi amacıyla bütün numuneler kireç ile sıvanmıştır.

3.3.1. Donatı imalatı

Donatı imalatları, Sta4CAD programından alınan donatı planlarına göre imal edilmiştir (Şekil 3.2). İlk olarak, numunelerde kullanılacak olan bütün donatılar projeye göre uygun boyutlarda kesilerek Görsel 3.4’teki gibi hazırlanmıştır.



Görsel 3.4. Donatı kesim işlemi

Kesilen donatıların, etriye büküm masasında gerekli ölçülerde bükümleri yapılmıştır. Kolonlarda kullanılacak olan bütün etriyeler ve çirozlar, kanca boyları 15 cm

ve kancaları 135° bükülerek imal edilmiştir. Kolon boyuna donatılarının gönye boyları 30 cm, temel donatılarının gönye boyları ise 45 cm olacak şekilde büküm işlemleri gerçekleştirilmiştir (Görsel 3.5).



(a) Çirozların imalatı



(b) Etriyelerin imalatı



(c) Temel donatı imalatı



(d) Temel donatı imalatı

Görsel 3.5. Bükümü yapılan donatılar

Bütün numunelerin donatıları, donatı aplikasyon planlarına uyularak bağlanmıştır. Numunelerin son halleri Görsel 3.6’da gösterilmiştir.



(a) TK-1



(b) TK-2, TK-3 & TK-4



(c) TK-5

Görsel 3.6. Donatıları bağlanmış numuneler

3.3.2. Kalıp imalatı

Numuneler için aynı boyutlarda toplam dört adet kalıp hazırlanmıştır. İlk olarak kalıpların temel kısımları hazırlanmıştır. Hazırlanan kalıpların içerisine, temel donatılarına 2.5 cm'lik pas payları takıldıktan sonra numuneler yerleştirilmiştir. Temelde bulunan Ø75 çapında PVC borular, deney sırasında temeli güçlü zemine bağlamak için kullanılacak boşlukları oluşturmak için yerleştirilmiştir. Daha sonra kolon kalıpları yerleştirilmiştir. Kalıplara yerleştirilen numuneler Görsel 3.7'deki gibidir.



Görsel 3.7. Kalıp imalatı

3.3.3. Beton dökümü

Bütün numunelerin imalat aşamaları tamamlandıktan sonra, Türkiye yapı stokunun büyük kısmını temsil etmek amacıyla basınç dayanımları 10 MPa'a yakın olan hazır beton sipariş edilmiştir. Döküm işlemi laboratuvarında bulunan kova ve vinç yardımıyla yapılmıştır (Görsel 3.8). Beton döküm işlemine temel seviyesinde başlanmıştır. Vibratör kullanılarak betonun boşluksuz bir şekilde kalıplara yerleşmesi sağlanmıştır. Beton dökümü tamamlandıktan sonra yüzeyler mala yardımı ile düzeltilmiştir. Beton döküm işlemi sırasında, her bir deney numunesi için üçer adet, 28 günlük beton basınç dayanımını elde etmek için ise üç adet silindirik numuneler alınmıştır.



Görsel 3.8. Beton dökümü ve kalıp sökümü

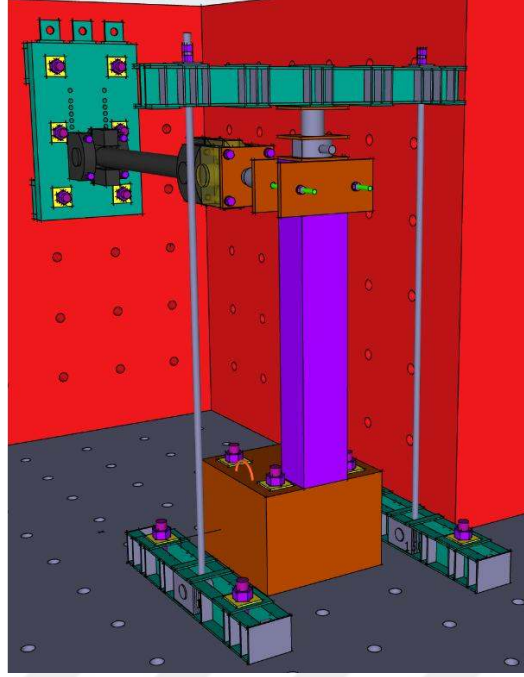
3.4. Deney Düzeneği

3.4.1. Eksenel yük sistemi

Bir taşıyıcı elemanın kolon olarak çalışabilmesi için bir eksenel yük taşıması istenmektedir. Bu yükün maksimum değeri, kesitin alanına ve kullanılan betonun karakteristik basınç dayanımına göre sınırlandırılmaktadır. Kolonlara gelebilecek olan maksimum eksenel yük TBDY 2018’de Denklem 3.1’e göre sınırlandırılmaktadır. Burada A_c kesitin taban alanını, f_{ck} betonun karakteristik basınç dayanımını, N_{dm} ise elemanın üzerine gelen eksenel kuvvetlerin en büyüğünü ifade etmektedir.

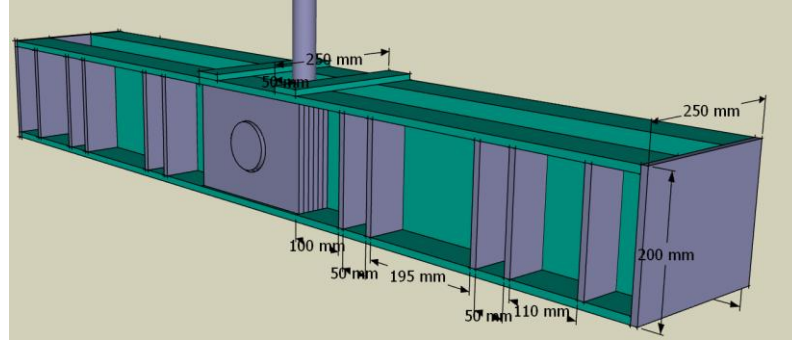
$$0.4A_c f_{ck} \geq N_{dm} \quad (3.1)$$

Literatürde, farklı şekillerde tasarlanan eksenel yük sistemleri mevcuttur. Bu sistemlerde eksenel yükleme, kolonun üstüne yerleştirilen rijit bir çelik çerçeve yardımıyla kolona verilmektedir. Depremi benzeştiren yatay yükleme sırasında bu rijit çerçevenin kolon ile beraber hareket edebilmesi amacıyla kolon ile çerçeve arasına kayıcı mesnet yerleştirilmiştir. Bu sistem, laboratuvar koşullarımıza uymadığından dolayı ikinci bir alternatif olan mafsalların temel seviyesinde olduğu bir sistem düşünülmüştür. Yapılan bir çalışmada, temel seviyesine yerleştirilen beton bloklara sabitlenmiş olan mafsallar yardımıyla, kolonun üstündeki çelik çerçevenin kolon ile beraber hareket etmesi sağlanmıştır (Pul vd., 2021). Yaptığımız çalışmada, bütün numunelerde kolonların aynı yerde olmamasından dolayı bu mafsal sisteminin sökölüp takılarak deney numunesine uygun konuma getirilmesi gerektiğinden dolayı, beton bloklar yerine çelik profiller kullanılarak imal edilen bir mafsal sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan düzenek, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi atölyelerinde imal edilmiştir. İmal edilen sistemin genel görüntüsü Şekil 3.12’de verilmiştir. Numunelere uygulanacak çevrimsel yatay yüklemenin uygulanabilmesi için reaksiyon duvarı ve güçlü zemin, Yapı Laboratuvarı’nda bulunmaktadır.



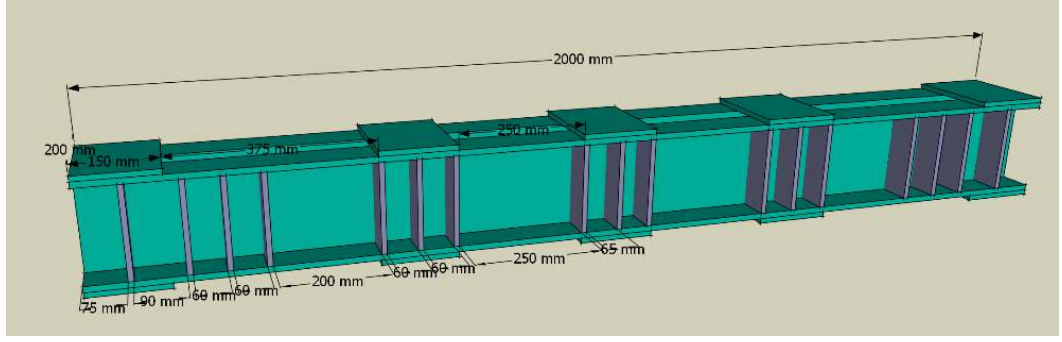
Şekil 3.12. Eksenel yük sistemi genel görünümü

Tasarım yapılırken, Göksu ve İlki (2016) tarafından daha önce kullanılan bir sistem, kendi laboratuvar koşullarımıza uygun olacak şekilde değiştirilmiştir. Eksenel yük sisteminde, alt kısımda dört adet 1.5 metre uzunluğunda UPN200 çelik profil kullanılmıştır. İki profil arası 100 mm olacak şekilde 10 mm kalınlığındaki sac plakaların başlık bölgelerinden kaynatılmıştır ve beraber çalışması sağlanmıştır (Şekil 3.13).



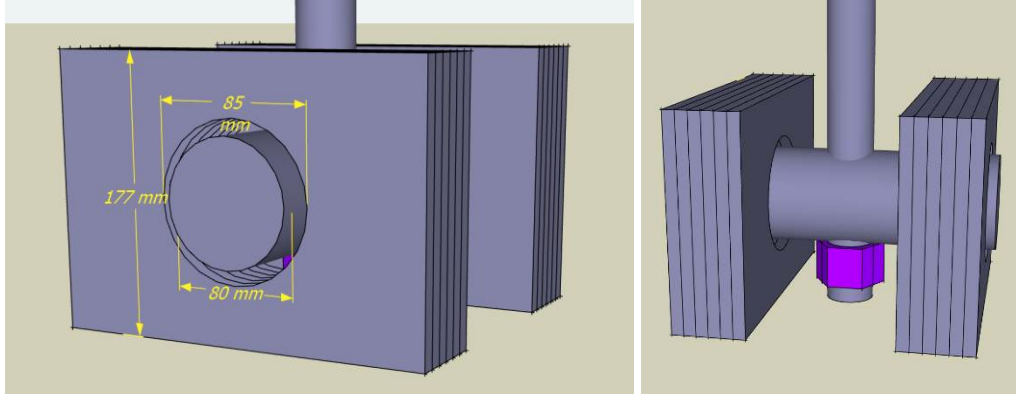
Şekil 3.13. Eksenel yük sistemi alt parçası

Sistemin üst kısmında ise iki adet 2 metre uzunluğunda UPN200 çelik profil kullanılmıştır. Bu profiller, belirli aralıklar ile üstlerine çelik saclar kaynatılarak beraber çalışması sağlanmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Eksenel yük sistemi üst parçası

Alt kısımda bulunan profillerin orta noktalarına 85 mm çapında delikler açılmıştır. Deliklerin içerisinde 80 mm çapında, iç kısmına Ø40 millerin takılacağı şekilde dış açılmış olan çelik takozlar geçirilmiştir. Bu takozların dış kısmına, 40 mm çapında transmisyon milleri yerleştirilmiş olup, üst kısımda bulunan çelik profillerin arasından geçirilmiştir. Transmisyon milleri alttan ve üstten somunlarla sıkılarak sabitlenmiştir. Bu sayede, depremi benzeştiren yatay yükleme sırasında eksenel yük sisteminin bir bütün olarak çalışması sağlanmıştır. Aynı zamanda, 80 mm çapındaki mafsal takozlarının delikler içinde dönebilmesi ile birlikte bir mafsal sistemi oluşturulmuştur ve yatay yükleme sırasında deney numunelerine ekstra bir kesme kuvveti gelmesi engellenmiştir (Şekil 3.15). Deney sırasında mafsalın daha iyi çalışabilmesi için gres yağı kullanılmıştır. Görşel 3.9’da mafsalın çalıştığı lazer ile kontrol edilmiştir.



Şekil 3.15. Eksenel yük sistemi mafsal detayı



Görsel 3.9. Eksenel yük sistemi mafsalsal kontrolü

Eksenel yük sisteminin imalatında kullanılacak olan çelik profiller, çelik plakalar, transmisyon milleri ve takozlar temin edilmiştir. Görsel 3.10’da gösterilen eksenel yük sisteminin kaynak işleri üniversite atölye çalışanları tarafından yapılmıştır.



Görsel 3.10. Eksenel yük sistemi kaynak işleri

Şekil 3.15’de görülen 80 mm çapındaki çelik mafsalsal takozuna ve 40 mm çapındaki transmisyon millerine diş açımı gerçekleştirilmiştir (Görsel 3.11). Bu takoz sayesinde, hem sökülüp takılabilen bir sistem oluşturulmuştur hem de deney sırasında yatay yüklemelerden gelecek olan ekstra kesme kuvvetinin önüne geçilmiştir



Görsel 3.11. *Mafsal takozuna ve millere dış açılma işlemi*

3.4.2. Deney düzeneğinin kurulması

Deney sistemi kurulurken, öncelikle numuneler temel köşelerinde bulunan dört adet deliklerden güçlü zemine M64 bulon ve somunlar kullanılarak sabitlenmiştir. Eksenel yük sisteminin zeminde bulunan kısmı, transmisyon milleri kolonun tam orta noktasına denk gelecek şekilde yerleştirilmiştir ve temelde olduğu gibi M64 bulon ve somunlar ile güçlü zemine sabitlenmiştir. Böylelikle deney sırasında temelin ve eksenel yük sisteminin altta kalan kısmının hareketi engellenmiştir. Kolonun üst ucuna piston ve yük hücresi yerleştirilmiştir. Bu sayede pistondan verilecek olan eksenel yük miktarı, doğrudan yük hücresi tarafından okunabilecektir. Eksenel yük sisteminin üst kısmı, yük hücresinin üstüne yerleştirilmiştir ve kolonun sağında ve solunda bulunan iki adet transmisyon mili somunlar ile sıkılarak eksenel yük sisteminin yerleştirilmesi tamamlanmıştır. Depremi benzeştiren yatay yüklemeyi verecek olan aktüatörün ucuna, kolonun yüzeyine temas eden bir çelik plaka takılmıştır. Kolonun karşı yüzüne de aynı boyutlarda imal edilen çelik plaka yerleştirilmiştir ve iki plaka üzerlerinde bulunan deliklerden geçen bulonlar ile birbirine bağlanmıştır (Görsel 3.12).



Görsel 3.12. Deney sistemi

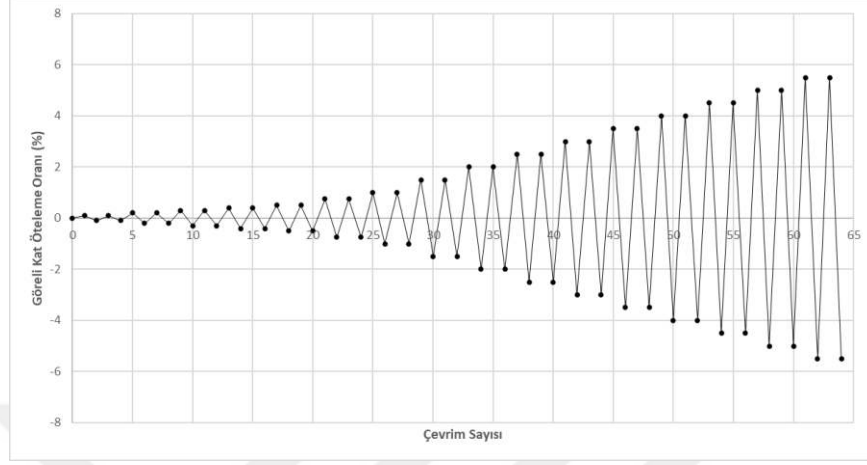
Bütün deney numunelerine çevrimsel yatay ve sabit eksenel olmak üzere iki çeşit yükleme yapılmıştır. Deneyde kolonlara uygulanması gereken eksenel kuvvetler Denklem 3.1’de belirtilen sınır şarttan fazla olacak şekilde kolon taşıma kapasitesinin %50’si olarak belirlenmiştir. Belirlenen değerler Tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.3. Numuneler için hesaplanan eksenel yük miktarları

Numuneler	Eksenel Yük Miktarları
TK-1	$0.5 \times 250 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 8.98 \text{ N/mm}^2 = 336 \text{ kN}$
TK-2 & TK-3	$0.5 \times 250 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 8.12 \text{ N/mm}^2 = 305 \text{ kN}$
TK-4	$0.5 \times 250 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 8.94 \text{ N/mm}^2 = 335 \text{ kN}$
TK-5	$0.5 \times 250 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 9.15 \text{ N/mm}^2 = 343 \text{ kN}$

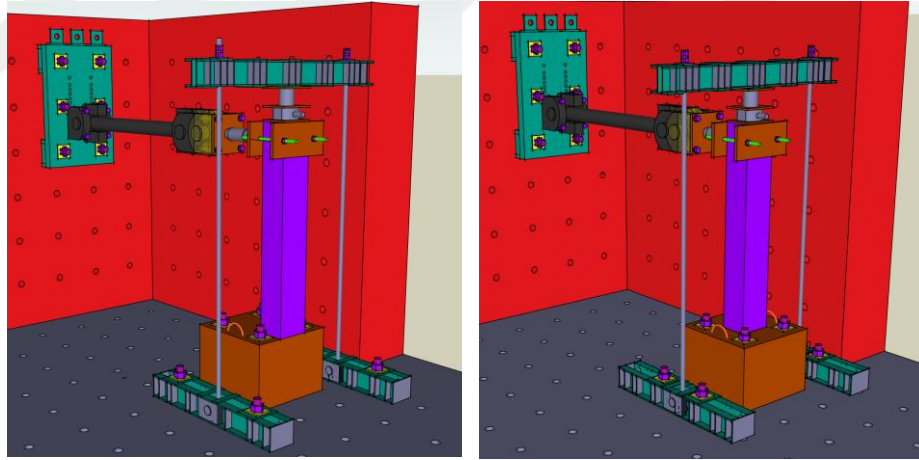
Deney düzeneğinde uygulanacak çevrimsel yatay yükleme protokolünün belirlenmesi amacıyla, literatürde yer alan çeşitli deneysel çalışmalar kapsamlı biçimde incelenmiştir. Yükleme adımlarının sınır değerleri, ACI T1.1-01 (Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing) standardında belirtilen esaslar doğrultusunda oluşturulmuştur. Bu kapsamda, deplasman kontrollü yükleme protokolü, numunelerin belirli hedef görelî kat öteleme oranlarına ulaşmasını sağlayacak şekilde kurgulanmıştır. Yükleme adımları, sırasıyla %0.1, %0.2, %0.3, %0.4, %0.5, %0.75 ve %1

gibi kritik öteleme seviyelerini kapsayacak şekilde düzenlenmiş, ardından bu oranlar kademeli olarak artırılarak maksimum %5.5 görelî ötelemeye ulaşılmıştır. Uygulanan yükleme protokolü Şekil 3.16'daki gibidir.



Şekil 3.16. Numunelere ait yükleme protokolü

Deney düzeneklerine ait; reaksiyon duvarı, güçlü zemin, numune bağlantı detayları ile birlikte düşey ve yatay yükleme yöntemleri ile pozitif ve negatif yönlü yatay yükleme uygulamalarının genel yerleşim düzeni Şekil 3.17'de sunulmuştur.



Şekil 3.17. Deney düzeneği yerleşim planı

3.4.3. Veri okuma sistemi

Deney sırasında, kolonun yatay yüklemenin uygulandığı üst bölgesine iki adet Doğrusal Deplasman Ölçer (LVDT) yerleştirilmiştir. Bu LVDT'ler (SDP-200-1 ve SDP-200-2), her yükleme adımında kolonun yatay deplasman değerlerini kaydetmek amacıyla kullanılmıştır. Her adımda kolona uygulanan pozitif ve negatif yatay yük değerleri ise, LVDT'lerle aynı eksene yerleştirilmiş aktüatör ucundaki yük hücresi

(TCLP300KNB) aracılığıyla elde edilmiştir. Temelde meydana gelebilecek olası hareketleri izleyebilmek için, birisi temel arka yüzeyine (CDP-50-1), ikisi ise temel üst yüzeyine yerleştirilmiş olmak üzere (CDP-50-2 ve CDP-50-3) toplam üç adet LVDT kullanılmıştır. Uygulanan eksenel yük, piston ile kolon yüzeyi arasına yerleştirilen yük hücresi (CLC1MNa) ile kaydedilmiştir. Yükleme süreci boyunca, farklı ölçüm cihazlarından elde edilen verilerin belirli anlık değerlerinin dijital ortamda kaydedilebilmesi amacıyla bir veri toplama cihazı (Data Logger) kullanılmıştır. Bu cihaz ile bilgisayar arasında GP-IB bağlantı kablosu aracılığıyla iletişim sağlanmış ve deney verileri anlık olarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

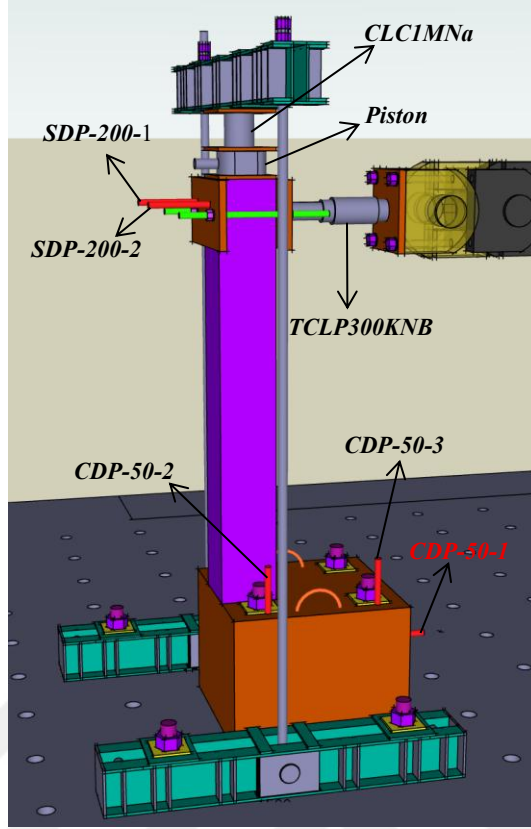
Hidrolik pistonun kontrol ünitesi, deplasman ölçerler ve yük hücrelerinden gelen veriler; 30 kanallı bir veri toplama cihazı, GP-IB kablosu ve bir bilgisayar aracılığıyla eş zamanlı olarak toplanmıştır. Veri toplama sürecinde, Visual LOG TDS-7130 V1 (2016) adlı yazılım paketi kullanılmıştır. Veri toplama yazılımında yapılan temel ayarları gösteren ekran görüntüsü Şekil 3.18’de sunulmuştur. Bu ayarlar kapsamında; ölçüm verilerine atanan isimlendirmeler, her kanala ait kalibrasyon katsayıları, ölçüm birimleri ve ondalık hassasiyet düzeyleri gibi parametreler tanımlanmıştır. Böylece ham verilerin anlamlı mühendislik verilerine dönüştürülmesi sağlanmıştır.

Visual LOG TDS-7130 - [Sablon.tsd]										
File Edit Sheet View Measurement Window Help										
Test Title										
TDS-303 Step 0										
Condition setup Interval setup Data comparator setup Data list Data table Check result										
No.	Name	Ch.No./Function	Unit	Format	Meas/ Direct	Sensor	Offset	Option data		
								Op.Data1	Op.Data2	Op.Data3
1	date / time	=DATE()		/YYYY HH:				1		
2	LoadcellMTS	=CH(0)*3.6/55.15	kN	0.000	Meas	VOLT 1/1		2		
3	LVDT-MTS	=CH(1)*50	mm	0.00	Meas	VOLT 1/100		3		
4	CLC1MNa	=CH(2)*0.333	kN	0.000	Meas	4GAGE		4		
5	TCLP300KNB	=CH(3)*-0.15	kN	0.000	Meas	4GAGE		5		
6	SDP-200-1	=CH(4)*-0.02	mm	0.00	Meas	4GAGE		6		
7	SDP-200-2	=CH(5)*-0.02	mm	0.00	Meas	4GAGE		7		
8	CDP-50-1	=CH(6)*0.005	mm	0.00	Meas	4GAGE		8		
9	CDP-50-2	=CH(7)*0.005	mm	0.00	Meas	4GAGE		9		
10	CDP-50-3	=CH(8)*0.005	mm	0.00	Meas	4GAGE		10		

Şekil 3.18. Veri toplama cihazı kanal ayarları

3.4.4. Deney yöntemi

Deney numuneleri, temellerine yerleştirilmiş çelik kancalar aracılığıyla laboratuvarında bulunan vinç sistemine bağlanarak, güçlü zemin üzerine dikkatli bir şekilde yerleştirilmiştir. Deney düzeneği, Bölüm 3.4.2’de detaylı şekilde açıklanan esaslara uygun olarak kurulmuştur. Tüm LVDT’ler ve yük hücreleri, veri toplama sistemine doğru şekilde bağlanmış (Şekil 3.19); ardından her kanal için kalibrasyon ayarları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.19. Veri okuma cihazlarının yerleşimi

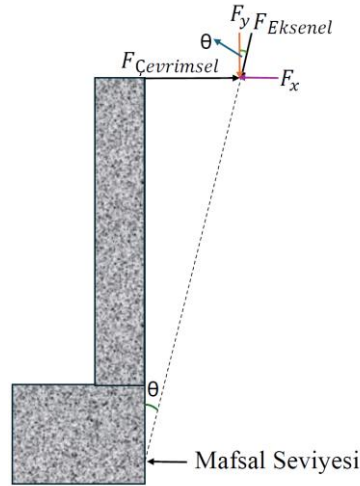
Her bir numune için, deney günü elde edilen beton basınç dayanımı değerleri dikkate alınarak (Tablo 3.1), uygulanacak eksenel yük miktarı hesaplanmıştır. Bu yük, hidrolik piston aracılığıyla kolona aktarılmış ve sistemin kararlılığı kontrol edilmiştir. Gerekli kontroller tamamlandıktan sonra, önceden belirlenen çevrimsel yatay yükleme protokolü, deplasman kontrollü olarak bilgisayar destekli hidrolik sistem ile numunelere uygulanmıştır. Tüm numunelerde, yatay yükleme hızı 1 mm/saniye olacak şekilde sabitlenmiştir. Her adımda, eksenel yük, yatay yük ve deplasman verileri veri toplama cihazı tarafından eşzamanlı olarak kaydedilmiştir. Deney süresince eksenel yükün sabit tutulmasına özen gösterilmiş; yükte düşüş gözlemlendiği durumlarda, yalnızca ilgili döngünün ilk adımında olmak kaydıyla eksik yük tamamlanarak hedef değere ulaşılması sağlanmıştır. Güvenlik gerekçeleriyle, numunelere uygulanan maksimum görelî kat ötelemesi oranları farklılık göstermiştir. TK-3 numunesine %5.5, TK-1, TK-2 ve TK-4 numunelerine %4.5, TK-5 numunesine ise %3.5 görelî kat ötelemesi uygulanmıştır.

4. DENEY SONUÇLARI

Temel seviyesinde enine donatı eksikliğinden kaynaklanan hasar mekanizmalarının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneylerde, çevrimsel yatay yükleme protokolü, her hedef deplasmana iki döngü olacak şekilde uygulanmıştır. Hedef deplasman seviyelerine ulaşılan kadar her yükleme adımında, kolon tepe deplasmanı ile bu deplasmana karşılık gelen yatay yük değerleri düzenli olarak kaydedilmiştir. Deney süresince, oluşan çatlaklar gözlemlenmiş, gelişimleri takip edilmiş ve her adım sonunda detaylı biçimde kayıt altına alınmıştır. Bu bölümde, her bir numune ayrı başlıklar altında ele alınarak elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Deneyde ölçülen kuvvet ve deplasman değerlerinin işaretlendirilmesinde; hidrolik pistonun itme yönü pozitif, çekme yönü ise negatif olarak kabul edilmiştir. Histerezis eğrilerinin oluşturulmasında, kolona etkiyen net yatay kuvvetler, aktüatöre bağlı yük hücresinden elde edilen veriler, uygulanan eksenel yükün yatay bileşeni dikkate alınarak düzeltilmiş ve bu şekilde hesaplanmıştır (Şekil 4.1). Her yükleme adımında, eksenel yükün (F_{eksenel}) oluşturduğu yatay kuvvet bileşeni (F_x) hesaplanmış ve bu değer, yük hücresinden okunan yatay kuvvetten ($F_{\text{Çevrimsel}}$) çıkarılarak numuneye etkiyen gerçek yatay kuvvet (F_{net}) elde edilmiştir. Eksenel yükün yatay bileşenini hesaplamak amacıyla, kolonun dönme açısı (θ) belirlenmiştir. Bu işlemde, eksenel yükün uygulandığı nokta ile eksenel yük sisteminin alt kısmında bulunan mafsallık merkezi arasındaki düşey mesafe esas alınmıştır. Bu yükseklik kullanılarak her adımda oluşan açı hesaplanmış ve buna bağlı olarak eksenel yükün yatay bileşeni elde edilmiştir. Elde edilen bu bileşenler, histerezis eğrilerinin daha doğru şekilde oluşturulmasında kullanılmıştır. Bu işlemler Denklem 4.1 ve Denklem 4.2 kullanılarak yapılmıştır.

$$F_x = F_{\text{Eksenel}} \times \sin(\theta) \quad (4.1)$$

$$F_{\text{Net}} = F_{\text{Çevrimsel}} - F_x \quad (4.2)$$



Şekil 4.1. Deney sırasında numuneye etkiyen yük bileşenleri

4.1. TK-1 Test Numunesi

TK-1 numunesi, yönetmeliğe uygun olarak temel seviyesinde enine donatı bulundurmasından dolayı referans numunesi olarak kabul edilmiştir. Numune, çevrimsel yatay yükleme altında test edilmiştir ve davranışı değerlendirilmiştir. İlgili numune için deney günü elde edilen beton basınç dayanımı 8.98 MPa olarak belirlenmiştir (Tablo 3.1).

Deney sonucunda elde edilen kolon tepe deplasmanları ve bu deplasmanlara karşılık gelen yatay yük değerleri kullanılarak histerezis grafiği çizilmiştir. Deney sırasında gözlenen hasarlar kayıt altına alınmıştır. Görsel 4.1’de, TK-1 numunesine ait hasar gelişimi gösterilmiştir.

TK-1 numunesinin, hedef deplasmanlara gidilen ilk çevrimlerinin tepe noktası deplasmanları ve taban kesme kuvvetleri Tablo 4.1’de gösterilmiştir. Bu numunede, maksimum yatay yük kapasitesi pozitif yönde (itme) 32.4 kN, negatif yönde (çekme) ise 19.8 kN olarak ölçülmüştür. Deney, kolon tepe deplasmanında 81.4 mm’ye karşılık gelen %4.5 görelî kat ötelemesi (GKÖ) seviyesinde sonlandırılmıştır. İlk çatlaklar yaklaşık %0.5 görelî öteleme oranında, kolon ile temel birleşim noktasında gözlemlenmiştir. Görelî ötelemenin %3 seviyesine ulaşmasıyla birlikte çatlaklar daha belirgin hale gelmiş ve temelden kolona doğru yukarı yönlü yayılmaya başlamıştır. %4 görelî öteleme seviyesinde ise, kolonda beton örtüsünde ezilme ve dökülmeler meydana gelmiştir. Numuneye ait histerezis eğrisi Şekil 4.2’de verilmiştir.



(a) %0.5 GKÖ

(b) %1 GKÖ



(c) %2 GKÖ

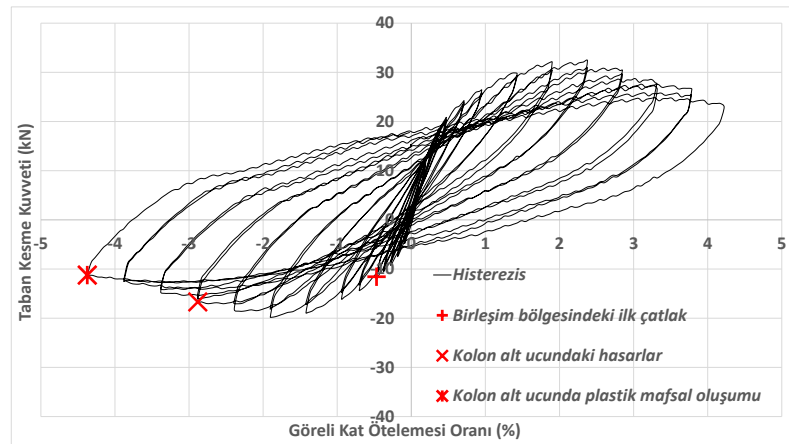
(d) %3 GKÖ



(e) %4 GKÖ

(f) %4.5 GKÖ

Görsel 4.1. TK-1 numunesi hasar tipleri



Şekil 4.2. TK-1 histerezis eğrisi

Tablo 4.1. *TK-1 çevrimsel yüklemelerin ilk çevrimlerinde elde edilen yük-deplasman değerleri*

Çevrim No	Taban Kesme Kuvveti (kN)	Tepe Noktası Deplasmanı (mm)	Görelî Kat Öteleme Oranı (%)	Hedef Görelî Kat Öteleme Oranı (%)
1	5.87	1.85	0.1	0.1
2	-4.69	-1.67	-0.09	-0.1
5	11.30	3.58	0.19	0.2
6	-7.42	-3.47	-0.19	-0.2
10	15.08	5.35	0.29	0.3
13	-9.25	-5.22	-0.28	-0.3
14	18.42	7.06	0.38	0.4
17	-10.48	-6.98	-0.38	-0.4
18	20.85	8.8	0.47	0.5
21	-11.56	-8.74	-0.47	-0.5
22	24.22	13.27	0.71	0.75
25	-14.34	-13.08	-0.70	-0.75
26	26.39	17.68	0.95	1
29	-16.06	-17.52	-0.94	-1
30	29.68	26.57	1.43	1.5
33	-18.90	-26.45	-1.42	-1.5
34	32.08	35.37	1.90	2
37	-19.77	-35.41	-1.90	-2
38	32.37	44.22	2.38	2.5
41	-18.24	-44.45	-2.38	-2.5
42	30.43	53.00	2.85	3
45	-16.68	-53.61	-2.88	-3
46	27.75	61.65	3.31	3.5
49	-14.65	-62.92	-3.38	-3.5
50	26.55	70.43	3.79	4
53	-12.48	-72.22	-3.88	-4
54	22.91	78.54	4.22	4.5
57	-11.23	-81.34	-4.37	-4.5

4.2. TK-2 Test Numunesi

TK-2 numunesi, kolon-temel birleşim bölgesinde enine donatı bulunmayacak şekilde, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) esaslarına aykırı olarak imal edilmiştir. Bu düzenleme, mevcut betonarme yapı stokunda sıkça karşılaşılan detay eksikliklerini temsil etmeyi amaçlamıştır. Numune, sabit eksenel yük ile birlikte çevrimsel yatay yük altında, belirgin yapısal hasar oluşuncaya kadar test edilmiştir. Deney sırasında numunenin taşıyabildiği maksimum yatay yük, pozitif (itme) yönde 20.9 kN, negatif (çekme) yönde ise 25.2 kN olarak kaydedilmiştir. Deney, kolon tepe noktasında 81.4 mm yatay deplasmana karşılık gelen %4.5 görelî kat ötelemesi seviyesinde sonlandırılmıştır. Bu sınır, taşıma gücündeki düşüş ve güvenlik gerekçeleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Pozitif yükleme yönü dikkate alındığında, bu numunede referans numuneye göre yaklaşık %35 oranında taşıma gücü kaybı gözlemlenmiştir. TK-1 numunesine benzer şekilde, ilk çatlaklar yaklaşık %0.5 görelî kat ötelemesi seviyesinde, kolon-temel birleşim bölgesinde ortaya çıkmıştır. Görelî ötelemenin %3 seviyesine ulaşmasıyla birlikte hasar, temel bölgesine doğru ilerlemiş ve enine donatının bulunmaması nedeniyle beton örtüsünde dökülmeler meydana gelmiştir. Çatlak yayılımı sadece birleşim bölgesiyle sınırlı kalmamış; aynı zamanda çatlaklar, temelin sol ve sağ alt köşelerine doğru çapraz şekilde ilerlemiştir. %4.5 görelî öteleme seviyesine ulaşıldığında, temel seviyesindeki beton örtüsü tamamen dökülmüş ve kolonun boyuna donatıları tamamen açığa çıkmıştır. Bu aşamada, belirgin donatı burkulmaları ve boyuna donatıların beton içerisindeki aderansını kaybederek önemli miktarda kayma yaptığı açıkça gözlemlenmiştir. Enine donatının bulunmaması nedeniyle, birleşim bölgesi sınırlı enerji tüketimi göstermiş ve rijitlik hızla azalmıştır. Numune, taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra ani bir dayanım kaybı sergileyerek gevrek davranış göstermiştir. Deneyden elde edilen histerezis eğrileri dar ve içe çökük döngüler şeklinde oluşmuş ve birleşimin düşük süneklik ile zayıf enerji sönümleme performansını doğrulamıştır (Şekil 4.3). Gözlemlenen hasar türleri, Görsel 4.2’de sunulmuştur. TK-2 numunesinin, hedef deplasmanlara gidilen ilk çevrimlerinin tepe noktası deplasmanları ve taban kesme kuvvetleri Tablo 4.2’de gösterilmiştir.



(a) %0.5 GKÖ



(b) %1 GKÖ



(c) %2 GKÖ



(d) %3 GKÖ

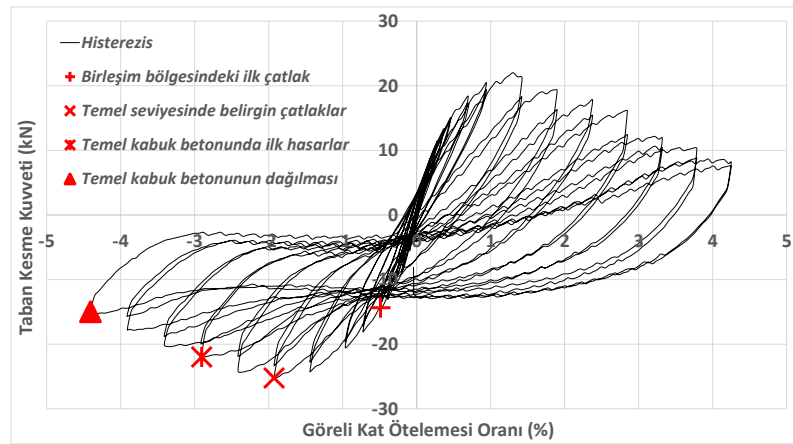


(e) %4 GKÖ



(f) %4.5 GKÖ

Görsel 4.2. TK-2 numunesi hasar tipleri



Şekil 4.3. TK-2 histerezis eğrisi

Tablo 4.2. TK-2 çevrimsel yüklemelerin ilk çevrimlerinde elde edilen yük-deplasman değerleri

Çevrim No	Taban Kesme Kuvveti (kN)	Tepe Noktası Deplasmanı (mm)	Görelî Kat Öteleme Oranı (%)	Hedef Görelî Kat Öteleme Oranı (%)
1	5,10	1.85	0.1	0.1
2	-5.70	-1.67	-0.1	-0.1
5	8.85	3.58	0.19	0.2
6	-9.15	-3.47	-0.20	-0.2
9	12.00	5.35	0.29	0.3
10	-11.55	-5.22	-0.30	-0.3
13	14.25	7.06	0.37	0.4
14	-13.95	-6.98	-0.39	-0.4
17	16.20	8.8	0.46	0.5
18	-15.60	-8.74	-0.49	-0.5
21	20.10	13.27	0.70	0.75
22	-19.95	-13.08	-0.73	-0.75
25	22.80	17.68	0.94	1
26	-22.95	-17.52	-0.97	-1
29	24.60	26.57	1.42	1.5
30	-27.90	-26.45	-1.44	-1.5
33	24.15	35.37	1.90	2
34	-30.15	-35.41	-1.93	-2
37	23.85	44.22	2.38	2.5
38	-30.30	-44.45	-2.42	-2.5
41	23.40	53.00	2.85	3
42	-29.40	-53.61	-2.91	-3
45	20.40	61.65	3.32	3.5
46	-28.80	-62.92	-3.41	-3.5
49	19.95	70.43	3.79	4
50	-27.75	-72.22	-3.91	-4
53	19.05	78.54	4.25	4.5
54	-26.25	-81.34	-4.41	-4.5

4.3. TK-3 Test Numunesi

TK-3 numunesi, daha önce enine donatı eksikliği nedeniyle ciddi hasar gören TK-2 numunesinin karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kullanılarak onarılmış halidir. Uygulanan sistematik güçlendirme yöntemi sonrasında, bu numune tekrar teste tabi tutulmuş ve CFRP sargısının, önceden hasar görmüş ve yetersiz detaylandırılmış birleşim bölgesinin sismik performansını ne ölçüde iyileştirebildiği değerlendirilmiştir.

Onarımın ardından, TK-3 numunesi sabit eksenel yük ve çevrimsel yatay yükleme protokolü altında yeniden test edilmiştir. Deney sırasında kaydedilen maksimum yatay yük, pozitif yönde 23.7 kN, negatif yönde ise 28.6 kN olarak ölçülmüştür. Deney, kolon tepe noktasında 99.8 mm yatay deplasmana karşılık gelen %5.5 görelî kat ötelemesi seviyesinde sonlandırılmıştır (Şekil 4.4). Bu değerler, özellikle pozitif yönde, TK-2'ye kıyasla belirgin bir taşıma gücü artışına işaret etmektedir. Ancak, referans numune TK-1 ile karşılaştırıldığında, yapısal kapasitenin yalnızca kısmen geri kazanıldığı ve hala belirli bir dayanım eksikliği bulunduğu gözlenmiştir. Onarım tekniğinin uygulanmasının ardından, bu numune TK-1 ve TK-2'nin ulaştığı görelî öteleme oranlarından yaklaşık 1.2 kat daha yüksek değerlere ulaşabilmiştir. İlk hasar belirtileri, TK-1 ve TK-2 numunelerine kıyasla daha geç, yaklaşık %2 görelî öteleme seviyesinde ortaya çıkmıştır. Bu hasar, kolonun alt ucunda CFRP malzemesinin kabarması şeklinde gözlemlenmiştir. Test süresince bu kabarma giderek artmış ve %5.5 görelî öteleme oranında CFRP levhalarda yırtılma meydana gelerek güçlendirme sistemi hasar almıştır. CFRP sargılamasının sağladığı dış kısıtlama etkisi sayesinde, beton örtüsündeki dökülmeler önemli ölçüde gecikmiş ve bu aşamaya kadar malzeme bütünlüğü büyük oranda korunmuştur. Güçlendirme uygulaması, çatlak açıklıklarını sınırlandırmış, ağır hasarın gecikmesini sağlamış ve deney süresince yapısal sürekliliğin korunmasına yardımcı olmuştur. Gözlemlenen hasar türleri, Görsel 4.3'de sunulmuştur. TK-3 numunesinin, hedef deplasmanlara gidilen ilk çevrimlerinin tepe noktası deplasmanları ve taban kesme kuvvetleri Tablo 4.3'de gösterilmiştir.



(a) %0.5 GKÖ

(b) %1 GKÖ



(c) %2 GKÖ

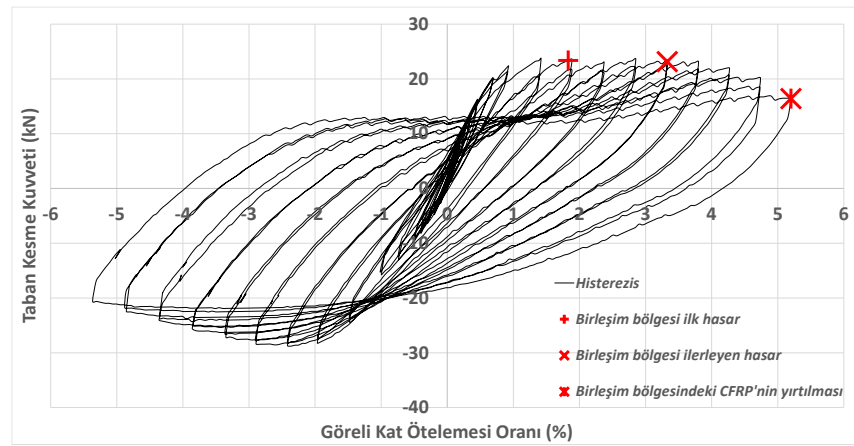
(d) %3 GKÖ



(e) %4 GKÖ

(f) %5.5 GKÖ

Görsel 4.3. TK-3 numunesi hasar tipleri



Şekil 4.4. TK-3 histerezis eğrisi

Tablo 4.3. TK-3 çevrimsel yüklemelerin ilk çevrimlerinde elde edilen yük-deplasman değerleri

Çevrim No	Taban Kesme Kuvveti (kN)	Tepe Noktası Deplasmanı (mm)	Görelî Kat Öteleme Oranı (%)	Hedef Görelî Kat Öteleme Oranı (%)
1	3,97	1,7	0,09	0.1
2	-2,74	-1,91	-0,10	-0.1
5	7,63	3,45	0,19	0.2
6	-4,74	-3,69	-0,20	-0.2
9	10,84	5,13	0,28	0.3
10	-6,42	-5,64	-0,30	-0.3
13	13,62	6,79	0,37	0.4
14	-8,13	-7,43	-0,40	-0.4
17	16,23	8,52	0,46	0.5
18	-9,07	-9,34	-0,50	-0.5
21	20,13	12,89	0,69	0.75
22	-12,96	-13,74	-0,74	-0.75
25	22,37	17,28	0,93	1
26	-15,75	-18,56	-1,00	-1
29	23,72	26,39	1,42	1.5
30	-24,41	-27,54	-1,48	-1.5
33	23,37	35,09	1,83	2
34	-28,12	-36,57	-1,97	-2
37	23,03	44,13	2,37	2.5
38	-28,62	-44,97	-2,42	-2.5
41	23,61	53,05	2,85	3
42	-28,15	-53,82	-2,89	-3
45	23,14	61,91	3,33	3.5
46	-27,13	-62,31	-3,35	-3.5
49	23,13	70,7	3,80	4
50	-25,53	-71,78	-3,86	-4
53	21,93	79,44	4,27	4.5
54	-24,11	-81,03	-4,36	-4.5
57	20,13	88,14	4,74	5
58	-22,23	-90,32	-4,86	-5
61	16,40	96,72	5,20	5.5
62	-20,62	-99,82	-5,37	-5.5

4.4. TK-4 Test Numunesi

TK-4 numunesi, tıpkı TK-2’de olduğu gibi temel seviyesinde enine donatı içermeyecek şekilde tasarlanmıştır. Ancak bu numune, deney öncesinde yapılan bir güçlendirme müdahalesi ile farklılık göstermektedir. Temel bölgesine dıştan monte edilen L profilli çelik köşebentler, enine donatı eksikliğini pratik bir şekilde gidermeyi amaçlayan bir yöntem olarak uygulanmıştır. Birleşim bölgesine üç yatay ve iki çapraz çelik köşebent, ankraj çubukları ile sabitlenmiş; bu sayede hem sıklaştırma etkisi sağlanmış hem de iç gerilmelerin dengeli şekilde yayılması hedeflenmiştir.

Sabit eksenel yük ve çevrimsel yatay yükleme altında test edilen TK-4 numunesi, pozitif yönde 30 kN, negatif yönde ise 20.8 kN maksimum yatay taşıma kapasitesine ulaşmıştır (Şekil 4.5). Deney, kolon tepe noktasında 81.6 mm yatay yer değiştirmeye karşılık gelen %4.5 görelî kat ötelemesi seviyesinde sonlandırılmıştır. Elde edilen bu değerler, özellikle itme yönünde, numunenin referans numune ile benzer bir yatay taşıma kapasitesi sergilediğini göstermektedir. Bununla birlikte, hasar gelişimi ve ilerleyişi açısından bazı farklılıklar gözlemlenmiştir. TK-1 numunesinde çatlaklar %0.5 görelî öteleme seviyesinde oluşmaya başlarken, TK-4 numunesinde benzer çatlak oluşumu ancak %1.5 görelî öteleme seviyesinde gözlenmiştir. Bu çatlaklar da yine kolon-temel birleşim bölgesinde ortaya çıkmıştır. %3 görelî öteleme seviyesine ulaşıldığında, çatlaklar kolona doğru yukarı yönde yayılmış ve daha belirgin hale gelmiştir. %4 görelî öteleme seviyesinde ise, kolonun arka yüzeyinde hasar meydana gelmiş ve beton örtüsünde dökülmeler gözlenmiştir. Önemli bir gözlem olarak, hasarın temele monte edilen ilk yatay çelik köşebendin altına doğru yayılmadığı tespit edilmiştir. Bu durum, uygulanan güçlendirme tekniğinin hasar bölgesini sınırlayıcı bir etkisinin olduğunu ve birleşim bölgesini korumada etkili bir performans sergilediğini göstermektedir. Temel bölgesinde gözlenen minimum düzeydeki hasar, güçlendirme sisteminin beklendiği şekilde çalıştığını ve başarılı olduğunu ortaya koymaktadır. Deney süresince gözlemlenen hasar paternleri Görsel 4.4’de sunulmuştur. TK-4 numunesinin, hedef deplasmanlara gidilen ilk çevrimlerinin tepe noktası deplasmanları ve taban kesme kuvvetleri Tablo 4.4’de gösterilmiştir.



(a) %0.5 GKÖ

(b) %1 GKÖ



(c) %2 GKÖ

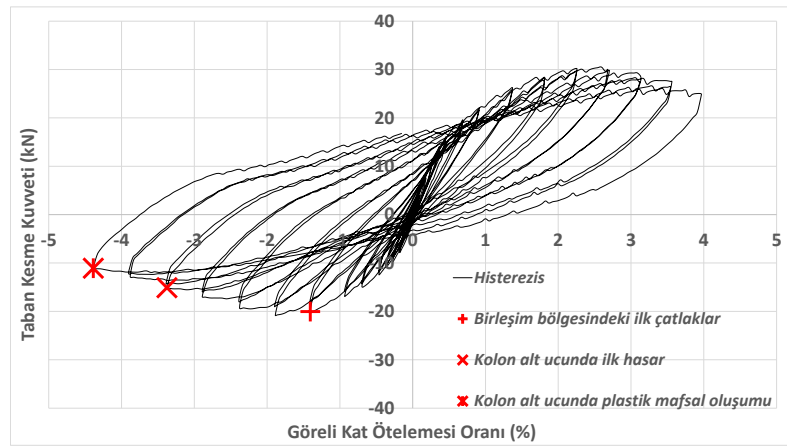
(d) %3 GKÖ



(e) %4 GKÖ

(f) %4.5 GKÖ

Görsel 4.4. TK-4 numunesi hasar tipleri



Şekil 4.5. TK-4 histerezis eğrisi

Tablo 4.4. TK-4 çevrimsel yüklemelerin ilk çevrimlerinde elde edilen yük-deplasman değerleri

Çevrim No	Taban Kesme Kuvveti (kN)	Tepe Noktası Deplasmanı (mm)	Görelî Kat Öteleme Oranı (%)	Hedef Görelî Kat Öteleme Oranı (%)
1	3,80	1,68	0,09	0.1
2	-3,34	-1,75	-0,09	-0.1
5	7,59	3,40	0,18	0.2
6	-7,75	-3,31	-0,18	-0.2
9	11,23	5,13	0,28	0.3
10	-9,73	-5,11	-0,27	-0.3
13	13,97	6,85	0,37	0.4
14	-10,95	-6,94	-0,37	-0.4
17	15,82	8,48	0,46	0.5
18	-12,35	-8,62	-0,46	-0.5
21	19,51	12,84	0,69	0.75
22	-14,84	-12,96	-0,70	-0.75
25	22,03	17,03	0,92	1
26	-16,87	-17,39	-0,93	-1
29	26,14	25,53	1,37	1.5
30	-20,05	-26,16	-1,41	-1.5
33	28,35	33,77	1,82	2
34	-20,80	-35,10	-1,89	-2
37	30,11	42,00	2,26	2.5
38	-19,27	-44,24	-2,38	-2.5
41	29,97	49,88	2,68	3
42	-16,93	-53,77	-2,89	-3
45	28,09	58,36	3,14	3.5
46	-15,12	-62,78	-3,38	-3.5
49	27,49	66,26	3,56	4
50	-12,80	-72,18	-3,88	-4
53	24,85	73,8	3,97	4.5
54	-11,08	-81,6	-4,39	-4.5

4.5. TK-5 Test Numunesi

TK-5 numunesi, TK-2 ve TK-4 numunelerinde olduğu gibi, kolon-temel birleşim bölgesinde enine donatı içermeyecek şekilde imal edilmiştir. Ancak bu numunede kolon, diğerlerinden farklı olarak temelin kenarında değil, tam merkezinde konumlandırılmıştır. Bu konfigürasyon, 6 Şubat 2023 Elbistan depremlerinde ciddi hasar gören kenar kolonlardan farklı olarak, iç kolonların deprem davranışını temsil etmek amacıyla tercih edilmiştir.

Numune, sabit eksenel yük ile çevrimsel yatay yükleme birlikte uygulanarak test edilmiştir. Deney sırasında pozitif yönde 26.3 kN, negatif yönde ise 15.2 kN maksimum yatay yük değerleri kaydedilmiştir (Şekil 4.6). Deney, kolonun yapmış olduğu eksen dışı hareketten dolayı güvenlik gerekçesiyle kolon tepe noktasında 62.2 mm yatay yer değiştirmeye karşılık gelen %3.5 görelî kat ötelemesi seviyesinde sonlandırılmıştır. Hasar ilerleyişi incelendiğinde, belirgin çatlakların yaklaşık %1.5 görelî kat ötelemesi seviyesinde ve temelden 300 mm yukarıda oluşmaya başladığı görülmüştür. %2.5 görelî öteleme seviyesine ulaşıldığında çatlak genişlemiş ve temel yönüne doğru aşağıya doğru ilerlemiştir. %3 görelî öteleme seviyesinde, kolonun sol yüzeyinde beton örtüsünde dökülme meydana gelmiştir. Bu dökülmenin ardından, yaklaşık %3.5 görelî öteleme seviyesinde kolonda eksen dışı yer değiştirme başlamış ve bu durum deneyin sonlandırılmasına neden olmuştur. Sıklaştırmının yetersiz olması nedeniyle enerji tüketimi sınırlı kalmış ve taşıma kapasitesi, referans numune olan TK-1'e kıyasla daha düşük seviyede kalmıştır. Deney boyunca gözlemlenen hasar türleri ve çatlak yayılımları Görsel 4.5'de sunulmuştur. TK-5 numunesinin, hedef deplasmanlara gidilen ilk çevrimlerinin tepe noktası deplasmanları ve taban kesme kuvvetleri Tablo 4.5'de gösterilmiştir.



(a) %0.5 GKÖ

(b) %1 GKÖ



(c) %2 GKÖ

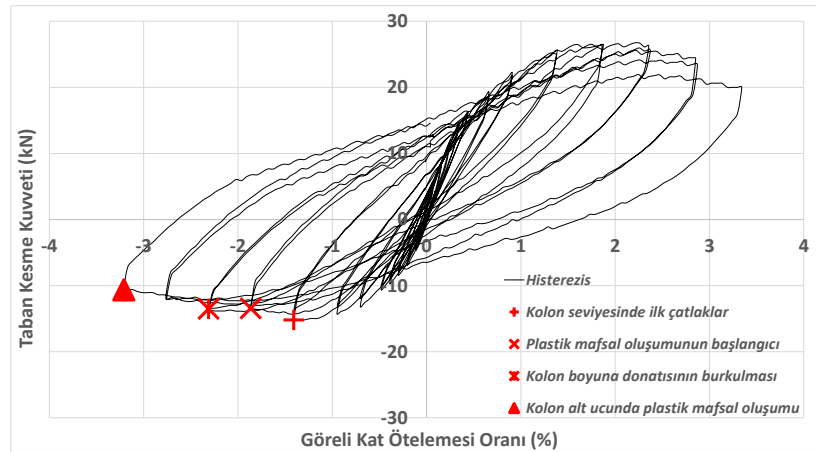


(d) %3 GKÖ



(e) %3.5 GKÖ

Görsel 4.5. TK-5 numunesi hasar tipleri



Şekil 4.6. TK-5 histerezis eğrisi

Tablo 4.5. TK-5 çevrimsel yüklemelerin ilk çevrimlerinde elde edilen yük-deplasman değerleri

Çevrim No	Taban Kesme Kuvveti (kN)	Tepe Noktası Deplasmanı (mm)	Görelî Kat Öteleme Oranı (%)	Hedef Görelî Kat Öteleme Oranı (%)
1	4,24	1,67	0,09	0.1
2	-4,62	-2,15	-0,12	-0.1
5	8,24	2,97	0,16	0.2
6	-6,91	-3,85	-0,21	-0.2
9	11,73	4,70	0,25	0.3
10	-8,44	-5,58	-0,30	-0.3
13	14,47	6,38	0,34	0.4
14	-9,69	-7,26	-0,39	-0.4
17	16,29	8,19	0,44	0.5
18	-10,63	-8,96	-0,48	-0.5
21	19,26	12,31	0,66	0.75
22	-13,15	-13,07	-0,70	-0.75
25	22,16	16,90	0,91	1
26	-14,24	-17,68	-0,95	-1
29	24,87	25,62	1,38	1.5
30	-15,18	-26,21	-1,41	-1.5
33	26,34	34,62	1,86	2
34	-13,43	-34,68	-1,86	-2
37	26,28	43,82	2,36	2.5
38	-13,51	-42,99	-2,31	-2.5
41	24,41	53,08	2,85	3
42	-11,91	-51,44	-2,77	-3
45	20,02	62,16	3,34	3.5
46	-10,64	-59,73	-3,21	-3.5

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Numunelerin çevrimsel yatay yük altındaki sismik davranışlarını değerlendirebilmek amacıyla, her bir numune için histerezis eğrileri oluşturulmuştur. Bu eğriler, kolon tepe noktasına yerleştirilen LVDT'lerden elde edilen yatay deplasman verileri ile, hidrolik aktüatöre bağlı yük hücresinden alınan yatay kuvvet verileri kullanılarak oluşturulmuştur. Histerezis eğrileri, yapının tekrarlı yükleme altındaki davranışını gösteren temel araçlardan biridir. Bu eğriler aracılığıyla; enerji tüketim kapasitesi, rijitlik azalması, taşıma gücü kaybı ve süneklik gibi önemli yapısal performans parametreleri değerlendirilmektedir. Tüm numunelerin histerezis ve zarf eğrileri karşılaştırılarak, farklı detaylandırma koşullarının ve uygulanan güçlendirme ve onarım yöntemlerinin yapısal performansa olan etkileri belirlenmiştir. Bu sayede her numunenin deprem etkileri altındaki davranışı hem nitel hem de nicel olarak değerlendirilmiştir.

5.1. Dayanım

Yapı elemanlarının sismik performansının değerlendirilmesinde dayanım, en temel mühendislik parametrelerinden biridir. Dayanım, bir elemanın önemli bir hasar ya da göçme meydana gelmeden önce karşı koyabildiği maksimum yatay yükü ifade eder. Deprem mühendisliği bağlamında, yalnızca en büyük dayanım değil, bu dayanımın çevrimsel yükleme altında ne ölçüde korunabildiği de yapısal bütünlük açısından kritik öneme sahiptir. Deneysel çalışmalarda, yapı elemanlarının dayanım özelliklerini değerlendirmek için histerezis eğrileri ve bu eğrilerden elde edilen backbone (zarf) eğrileri yaygın olarak kullanılmaktadır. Histerezis eğrileri, bir numunenin ardışık itme ve çekme yüklemesi döngüleri sırasında sergilediği yük-deplasman ilişkisini, zarf eğrileri ise her döngüde ulaşılan maksimum yatay kuvvetlerin birleşiminden oluşan sınır eğrisini temsil eder. Zarf eğrisi genellikle üç bölgeden oluşur: başlangıçtaki yükselen kol, elemanın rijitlik ve dayanım kazanımını temsil eder; bunu izleyen tepe noktası, numunenin ulaşabildiği maksimum yatay taşıma kapasitesini gösterir; son olarak gelen azalan kol ise malzeme hasarı ya da rijitlik kaybı nedeniyle yaşanan taşıma gücü düşüşünü yansıtır. Bu tepe noktası, deneysel karşılaştırmalarda referans alınan kritik dayanım seviyesidir. Öte yandan histerezis eğrileri, taşıma gücünün zaman içinde nasıl değiştiğini gösterir. Bu eğriler sayesinde bir numunenin yalnızca ne kadar yük taşıyabildiği değil, aynı zamanda tekrarlı yükleme altında nasıl davrandığı, örneğin daralma (pinching) etkisi ve enerji sönmüleme kapasitesi gibi performans özellikleri de değerlendirilebilir.

TK-1 numunesi, tüm numuneler arasında en yüksek yatay taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Pozitif yönde yaklaşık 32.37 kN, negatif yönde ise 19.77 kN kapasiteye ulaşmıştır. Zarf eğrisi, yüksek başlangıç rijitliği sonrasında kontrollü bir dayanım kaybı göstermektedir. Histerezis döngüleri geniş ve kararlıdır; düşük pinching etkisi ve yüksek enerji tüketimi, numunenin yüksek süneklik düzeyine işaret etmektedir. Çevrimsel yüklemeler süresince herhangi bir ani dayanım kaybı gözlemlenmemiştir.

Enine donatının bulunmaması nedeniyle TK-2 numunesinin taşıma kapasitesinde belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. Pozitif yöndeki taşıma kapasitesi 20.96 kN olup, bu değer TK-1'e kıyasla yaklaşık %35.5 daha düşüktür. Öte yandan, negatif yönde ulaştığı 25.22 kN, referans numuneye göre yaklaşık %27.6 daha yüksektir. Zarf eğrisi erken bir tepe noktasına ulaştıktan sonra hızlı bir azalma göstermiş ve bu durum gevrek davranışa işaret etmiştir. Histerezis eğrilerinde daralma ve belirgin pinching etkisiyle birlikte rijitlikte hızlı bir azalma gözlemlenmiş, bu da numunenin çevrimsel yükler altında sınırlı süneklik gösterdiğini ortaya koymuştur.

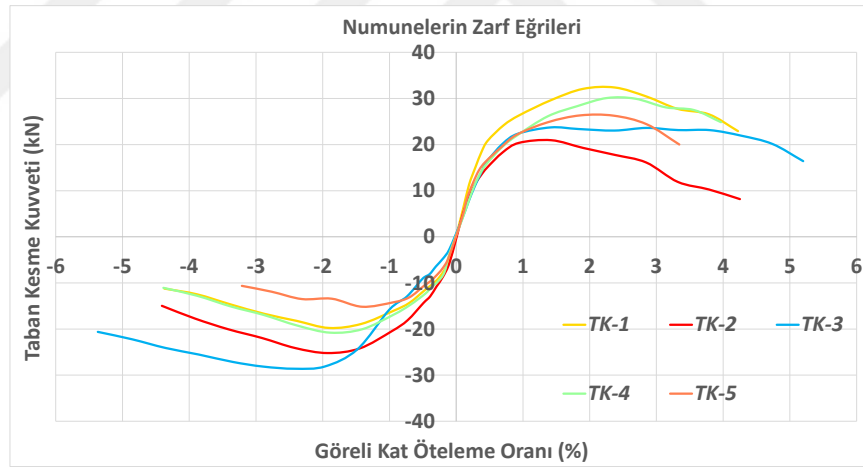
CFRP ile onarılan TK-3 numunesi, dayanım açısından kısmi bir iyileşme göstermiştir. Pozitif yönde 23.72 kN kapasiteye ulaşarak, TK-2'ye göre %13.4 oranında artış sağlamış ancak TK-1'e kıyasla %26.7 daha düşük kalmıştır. Negatif yöndeki kapasite 28.62 kN ile hem TK-2'ye göre %13.5, hem de TK-1'e göre %44.8 daha yüksektir. Zarf eğrisi, tepe noktasından sonra daha yumuşak bir düşüş eğilimi göstermekte, histerezis döngüleri ise daha dolgun ve kararlı yapıdadır. Bu da onarımın süneklik ve enerji tüketimi açısından etkili olduğunu göstermektedir. Üst deplasman seviyelerinde CFRP katmanlarında yerel ayrılmalar gözlenmiş olsa da bu güçlendirme davranış açısından ciddi bir iyileşme sağlamıştır.

Pozitif yönde 30.11 kN taşıma kapasitesine ulaşan TK-4, referans numuneye göre yalnızca %7.1 daha düşük performans göstermiştir. Negatif yönde ise 20.80 kN ile TK-1'in yaklaşık %5.2 üzerine çıkmıştır. Bu sonuçlar, dıştan uygulanan çelik köşebentlerin etkinliğini açıkça ortaya koymaktadır. Zarf eğrisi yüksek seviyelerde seyretmiş ve dayanım kaybı kademeli şekilde gerçekleşmiştir. Histerezis döngüleri geniş, simetrik ve kararlıdır. Bu da numunenin kontrollü dayanım kaybı ve yüksek süneklik sergilediğini göstermektedir. Gözlemler, hasarın ilk çelik köşebentin üst bölgesinde sınırlı kaldığını ve güçlendirme detayının hasar yayılımını başarıyla engellediğini doğrulamaktadır.

TK-5 numunesi, pozitif yönde 26.28 kN ve negatif yönde 15.18 kN taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Bu değerler, TK-1'e kıyasla sırasıyla %28.1 ve %23.2 oranında

daha düşüktür. Kolonun temel ortasına yerleştirilmiş olmasına rağmen enine donatının bulunmaması, tepe noktasından sonra kademeli bir dayanım kaybına neden olmuştur. Zarf eğrisi tepe sonrası yumuşak eğilimli bir azalma göstermekte, histerezis döngüleri ise kararlılık açısından TK-4'e göre daha zayıf bir görüntü sunmaktadır. TK-2'ye kıyasla daha iyi performans sergilemiş olsa da çevrimsel yükler altında yüksek düzeyde dayanımı sürdürmemiştir.

Yapılan değerlendirmeler, tüm numunelerin pozitif ve negatif yönlerde gösterdiği maksimum taşıma kapasiteleri açısından birbirinden farklı tepkiler ortaya koyduğunu göstermektedir. Pozitif yönde TK-1 referans numune olarak en yüksek kapasiteye ulaşmış, bunu güçlendirilmiş ve onarılmış numuneler olan TK-4 ve TK-3 takip etmiştir. Negatif yönde ise özellikle TK-3 ve TK-2 numunelerinin, referans numuneden daha yüksek taşıma kapasitesi sergilemesi dikkat çekici bir bulgu olarak öne çıkmıştır. Elde edilen zarf eğrileri, her numunenin taşıma kapasitesinin karşılaştırmalı olarak izlenmesini sağlamış ve davranıştaki farklılıkların daha net şekilde ortaya konmasına olanak tanımıştır (Şekil 5.1).

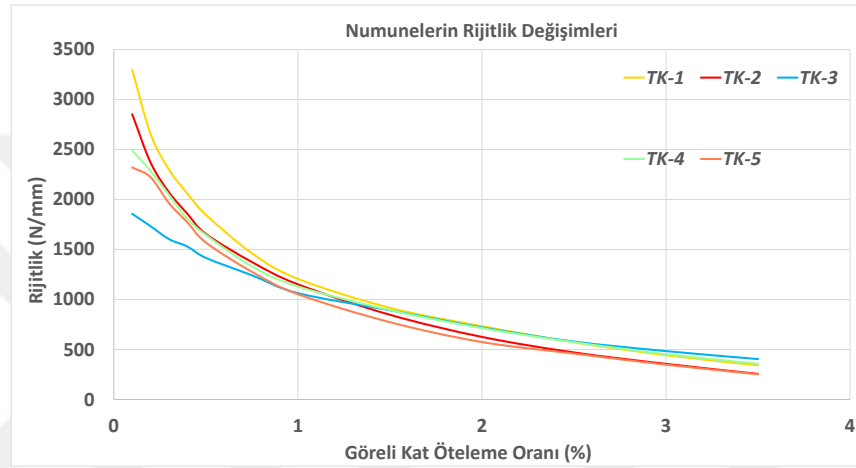


Şekil 5.1. Numunelerin zarf eğrileri

5.2. Rijitlik Azalımı

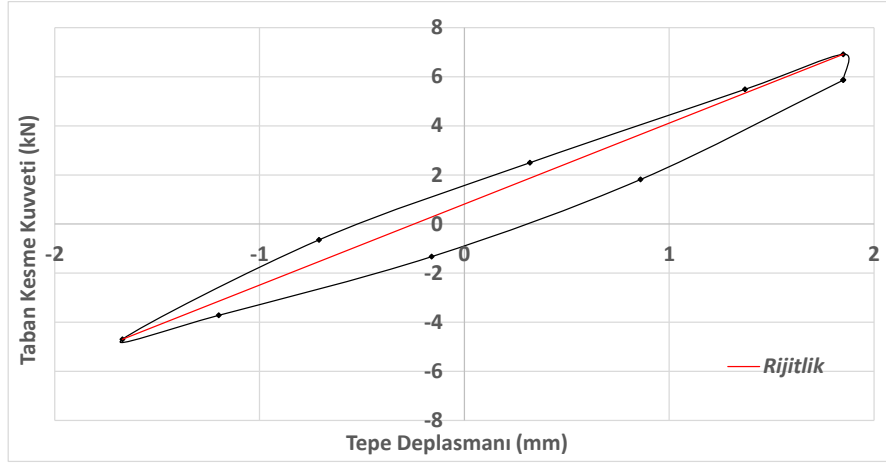
Yapı elemanlarının sismik performans değerlendirmelerinde, rijitlik hem yapının başlangıç tepkisini hem de hasar ilerlemesini belirleyen temel parametrelerden biridir. Rijitlik, genellikle bir yapı elemanının yer değiştirmeye karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır ve uygulanan yatay kuvvet ile oluşan deplasman arasındaki orana karşılık gelir. Çevrimsel yükleme altında rijitlik, yalnızca deplasman büyüklüklerini değil, aynı zamanda yapısal kararlılığı ve enerji tüketim kapasitesini de doğrudan etkiler. Numunenin

başlangıç rijitliği, elastik davranışı ortaya koyarken; yükleme döngüleri boyunca rijitlikte yaşanan azalma, çatlak oluşumu, hasar birikimi ve taşıyıcı sistemdeki zayıflamanın göstergesidir. Rijitliğin hızlı kaybı genellikle erken çatlak oluşumu ya da yetersiz sıkılaştırma ile ilişkilendirilirken, daha yavaş ve kademeli azalma davranışı ise sünekliğin yüksek olduğuna ve enerjinin daha etkin sönmüldüğüne işaret eder. Bu çalışmada, her deplasman adımında elde edilen rijitlik değerleri değerlendirilmiş; rijitlik azalma eğrileri karşılaştırılarak farklı detaylandırma ve güçlendirme stratejilerinin yapısal kararlılığı koruma performansı ortaya konmuştur (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Numunelerin rijitlik azalması

Deney sırasında elde edilen rijitlik değerleri, her yükleme döngüsünün ilk çevriminde histerezis eğrisi üzerinde kaydedilen tepe kuvvet değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Her döngünün ilk çevriminde elde edilen maksimum kuvvet ile buna karşılık gelen deplasman değerleri birleştirilmiş ve bu iki nokta arasındaki doğrusal ilişki üzerinden eğim hesaplanmıştır (Şekil 5.3). Bu eğim, ilgili döngü için rijitlik değeri (N/mm) olarak kabul edilmiştir. Uygulanan bu yöntem, her yükleme döngüsünün sonunda elemanın rijitlik durumunu idealize ederek, yükleme ilerledikçe yapısal elemanlardaki ilerleyici rijitlik kaybının izlenmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 5.3. Numunelerin rijitlik hesabı örneği (%0.1 GKÖ için)

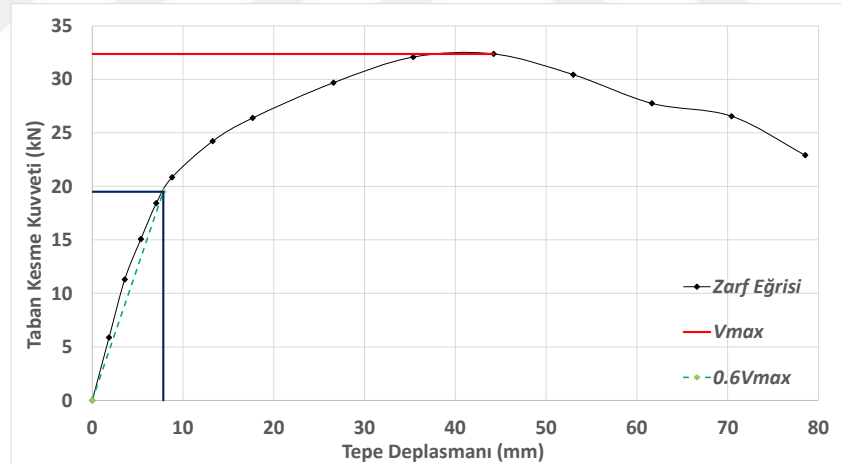
Deney numunelerinin rijitlik değişimleri incelendiğinde, TK-1 numunesinin en yüksek başlangıç rijitliğine sahip olduğu, ardından sırasıyla TK-2, TK-5, TK-4 ve TK-3 numunelerinin geldiği gözlemlenmiştir. Özellikle TK-1 ve TK-2, yüklemenin ilk aşamalarında yüksek rijitlik sergilemiş; ancak deplasman arttıkça bu rijitlikte belirgin bir azalma meydana gelmiştir. %4.5 göreceli kat ötelemesi seviyesine ulaşıldığında, başlangıçta daha düşük rijitliğe sahip olmasına rağmen TK-3 numunesinin rijitliğini diğer numunelere göre daha iyi koruduğu ve bu aşamada en yüksek rijitlik değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, CFRP onarım tekniğinin hasar ilerledikçe rijitlik kaybını geciktirdiğini göstermektedir. TK-2 ve TK-3 numuneleri karşılaştırıldığında, TK-3'ün rijitlik korunumu açısından TK-2'ye göre daha başarılı bir performans sergilediği belirlenmiştir. TK-2'de rijitlik azalma oranı %94.97 olarak ölçülmüşken, TK-3'te bu oran %84.61 seviyesinde kalmıştır. Bu da CFRP ile yapılan onarımın yaklaşık %11 oranında daha az rijitlik kaybı ile sonuçlandığını ve yapısal elemanın rijitlik performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Çelik köşebentlerle güçlendirilmiş TK-4, yüklemenin ileri evrelerinde rijitliğini belirli bir seviyede tutmayı başarmıştır. Rijitlik kaybının temel nedenleri arasında, birleşim bölgesinde oluşan mikro çatlaklar, beton örtüsünün dökülmesi ve boyuna donatılarda meydana gelen burkulmalar yer almaktadır. Özellikle enine donatı içermeyen numunelerde, birleşim bölgesindeki yetersiz sıklaştırma nedeniyle rijitlik kaybı daha erken aşamalarda ve daha hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir.

Doğrusal olmayan yapısal davranışın analizinde, rijitlik sabit bir büyüklük olmaktan çıkar ve zamana, deplasmana, malzemeye; kesit, eleman ve yapı hasarlarına bağlı olarak değişir. Bu nedenle, çevrimsel yükleme altında rijitliğin değerlendirilmesinde sekant rijitliği kavramı yaygın biçimde kullanılmaktadır. Sekant rijitliği, yük-deplasman

eğrisi üzerinde orijin ile belirli bir nokta arasındaki doğrusal eğimin hesaplanmasıyla elde edilir ve elemanın belirli bir andaki ortalama rijitlik değerini temsil eder. Bu çalışmada, deney numunelerinin zarf eğrilerinin idealize edilmesinde, sekant rijitliği esas alınmıştır. Her numune için maksimum taşıma kapasitesinin %60'ına karşılık gelen kuvvet ve deplasman değerleri kullanılarak sekant rijitlik hesaplanmış, böylece her numunenin elastik bölgeden çıkmaya başladığı ancak henüz dayanım kaybının oluşmadığı bir davranış aralığı temsil edilmiştir (Şekil 5.4). Hesaplanan sekant rijitlik değerleri Tablo 5.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Numunelerin sekant rijitlik değerleri

Numuneler	Pozitif Yönde Sekant Rijitliği (N/mm)	Negatif Yönde Sekant Rijitliği (N/mm)
TK-1	2490.4	1287.7
TK-2	2010.7	1507.9
TK-3	1977.2	857.1
TK-4	1720.6	1410.4
TK-5	2185.5	1432.1

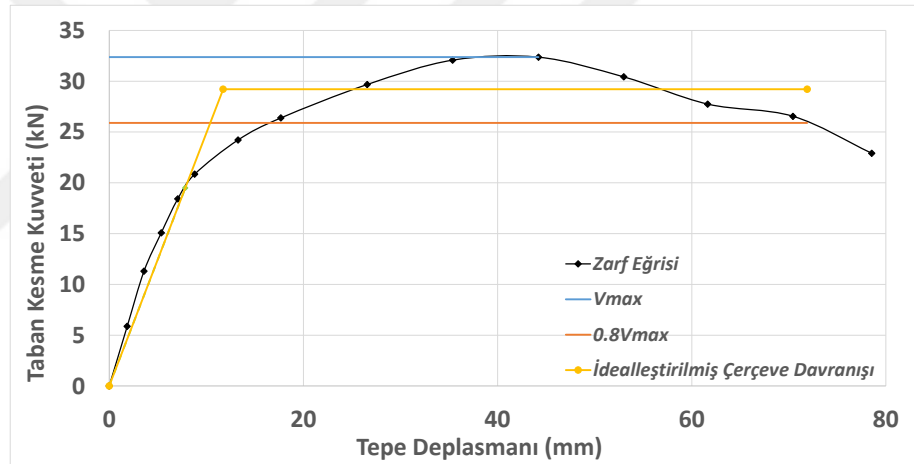


Şekil 5.4. Sekant rijitliği hesaplama örneği

5.3. Süneklik

Deneyssel olarak elde edilen zarf eğrilerinin idealize edilerek iki doğrusal (bilinear) yapıya dönüştürülmesi, yapı elemanlarının süneklik, enerji tüketimi ve göçme davranışı gibi performans kriterlerinin analitik olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Bu çalışmada, zarf eğrilerinin iki doğrulu hale getirilmesi süreci, enerji eşdeğerliği ilkesine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.5). Bu yaklaşıma göre,

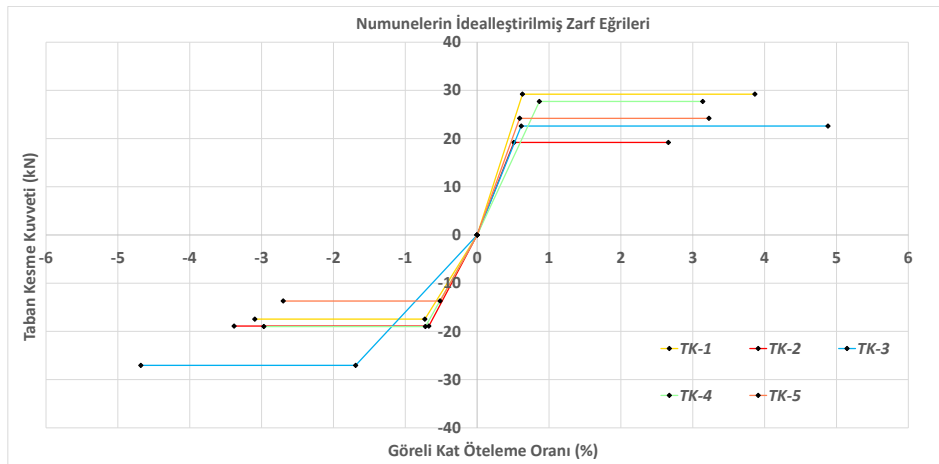
idealize edilen iki doğrusal eğrinin altında kalan alan ile gerçek zarf eğrisinin altında kalan alanın eşit olması sağlanmıştır. Böylece sistemin enerji tüketimi korunarak idealize bir yapı elde edilmiştir (Akın, 2011). İki doğrusal eğrinin elastik doğrusal bölgesinin eğimi, sekant rijitlik değeri olarak alınmıştır. İki doğrusal eğrinin akma sonrası bölgesinin son noktası, zarf eğrisi üzerinde maksimum taşıma kapasitesinin %20 oranında azaldığı nokta olarak seçilmiştir. Bu yaklaşım, Park (1989) tarafından önerilen ve elemanın dayanım kaybının başladığı noktayı esas alan bir değerlendirme kriteridir. Bu nokta, hem sünekliğin hem de kalıcı deformasyonun sınırlandırıldığı davranış bölgesini tanımlamaktadır. İki bölgenin birleşim noktasındaki yatay kuvvet düzeyi, modelin altında kalan toplam alan, zarf eğrisinin altında kalan alanla eşit olacak şekilde belirlenmiş; böylece enerji eşdeğerliği sağlanmıştır. Elde edilen bu iki aşamalı idealize eğri, hem sistemin süneklik kapasitesinin hem de rijitlik ve deformasyon karakteristiklerinin karşılaştırmalı olarak analiz edilmesine olanak tanımıştır.



Şekil 5.5. Enerji eşitleme ilkesine göre hesap örneği

Deney numunelerine ait idealize edilmiş iki doğrusal zarf eğrileri ve karakteristik deplasman verileri birlikte değerlendirildiğinde, her bir numunenin taşıma kapasitesi, deformasyon yeteneği ve süneklik davranışı açısından belirgin farklılıklar sergilediği görülmektedir. TK-1 numunesi, yaklaşık 32.4 kN'luk maksimum taşıma kapasitesi ve %3.9 görel kat ötelemesi oranına kadar ulaşan deformasyon kabiliyetiyle, rijit ve sünek davranışı bir arada sergileyerek referans niteliğinde bir performans ortaya koymuştur. Aynı zamanda 11.7 mm akma deplasmanı ve 71.9 mm maksimum deplasman değerleriyle 6.12 süneklik katsayısına ulaşmıştır. Bu durum, diğer numunelere kıyasla numunenin hem dayanım hem de süneklik açısından dengeli bir performans gösterdiğini işaret etmektedir. TK-2 numunesi, pozitif yönde sınırlı bir taşıma kapasitesiyle birlikte yaklaşık

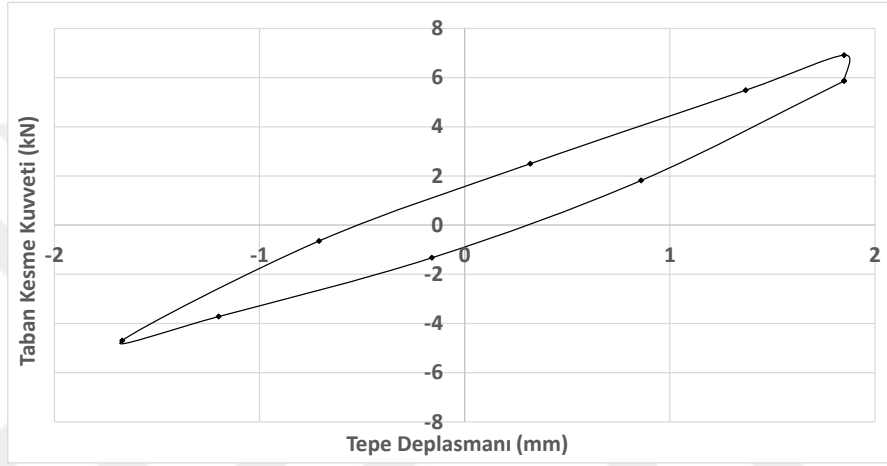
%2.7 görel kat öteleme oranında deformasyonu sonlandırmış ve 49.5 mm maksimum deplasman değeriyle 5.21 süneklik katsayısı göstermiştir. Enine donatı bulunmaması hem taşıma kapasitesini hem de sünekliği olumsuz yönde etkilemiştir. İdealize eğrisi, kısa bir yatay taşıma bölgesine sahip olup gevrek davranış eğilimi göstermektedir. CFRP ile onarılmış olan TK-3, hem taşıma kapasitesini hem de deformasyon kabiliyetini belirgin şekilde iyileştirmiştir. Pozitif yönde taşıma kapasitesi 22.6 kN, maksimum deplasman değeri ise 90.8 mm'dir. 7.96 süneklik katsayısıyla tüm numuneler arasında en yüksek değere ulaşan bu numune, CFRP uygulamasının yalnızca dayanımı değil, aynı zamanda sünekliği ve enerji tüketim kapasitesini de artırdığını göstermektedir. TK-4 numunesi, çelik köşebentlerle güçlendirilmiş olup pozitif yönde 30.1 kN kapasiteye ulaşmıştır. Ancak 58.4 mm maksimum deplasman değeri ve 3.63 süneklik katsayısı ile deformasyon kapasitesinin sınırlı kaldığı gözlenmiştir. TK-5 numunesi ise orta düzey bir taşıma kapasitesi (24.2 kN) ile birlikte 60.0 mm maksimum deplasmana ve 5.46 süneklik katsayısına ulaşmıştır. Kolonun temelin ortasında yer alması, TK-2'ye göre taşıma kapasitesini arttırsa da enine donatının bulunmaması nedeniyle deformasyon kapasitesi sınırlı kalmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, TK-3 numunesi süneklik açısından en iyi performansı sergilemiş; TK-1 ise taşıma kapasitesi ve rijitlik dengesini korumuştur. Güçlendirme ve onarım yöntemlerinin sadece taşıma kapasitesi değil, yapısal süneklik üzerinde de doğrudan etkili olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 5.6).



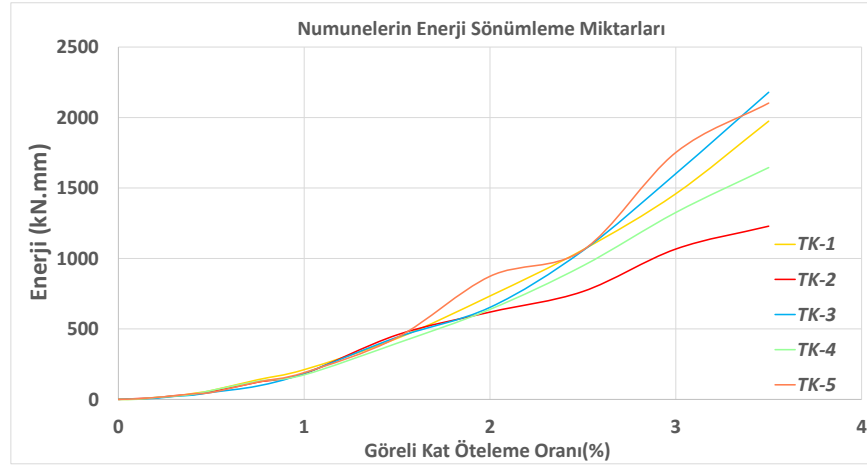
Şekil 5.6. İdealize edilmiş zarf eğrileri

5.4. Enerji Sönümleme Kapasitesi

Numunelerin her bir döngüdeki enerji tüketim kapasiteleri, ilgili histerezis döngüsünün ilk çevriminin çevrelediği alanın hesaplanmasıyla belirlenmiştir (Şekil 5.7). Kümülatif enerji tüketim kapasitesi ise, ilgili görel kat öteleme oranına kadar oluşan tüm histerezis döngülerinin çevrelediği alanların toplanmasıyla elde edilmiştir. Şekil 5.8, numunelere ait kümülatif enerji tüketimi ile görel kat öteleme oranı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekil 5.8 çizilirken, numuneler arasında en düşük görel kat öteleme oranına giden numune (%3.5) referans alınmıştır ve grafikler o noktaya kadar çizilmiştir.



Şekil 5.7. Enerji sönümleme kapasitesi hesap örneği (%0.1 GKÖ için)



Şekil 5.8. Enerji sönümleme kapasiteleri

Analiz sonuçlarına göre, TK-3 numunesi, en yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip numune olmuştur. Özellikle %5.5 görel kat öteleme oranında ulaştığı 4639.8 kN·mm değerle, diğer tüm numuneleri belirgin şekilde geride bırakmıştır. Bu durum, CFRP ile onarılmış numunenin yalnızca dayanım açısından değil, yüksek süneklik ve deformasyon kapasitesi sayesinde enerjiyi etkin biçimde yutma konusunda da üstün bir

performans sergilediğini göstermektedir. Enerji eğrisinin eğimindeki süreklilik, hasar ilerlese dahi numunenin davranışını sürdürebildiğini ortaya koymaktadır.

TK-1 numunesi, temel seviyesinde enine donatı bulundurmasının etkisiyle yüksek bir enerji tüketimi profili çizmiştir. %4.5 görelî kat ötelemesi oranında 3040.8 kN·mm enerji tüketmiş ve bu değeriyle tüm numuneler arasında ikinci sırada yer almıştır. İlk yükleme döngülerinden itibaren rijitliğini koruyan bu numune, yüksek başlangıç dayanımının etkisiyle erken aşamalarda önemli miktarda enerji yutmuştur.

TK-4 numunesi, çelik köşebentlerle güçlendirilmiş haliyle, %4.5 görelî kat ötelemesi oranında 2709.8 kN·mm enerji tüketmiş ve TK-1'e yakın bir performans sergilemiştir. Güçlendirme uygulamasının çatlak ilerlemesini geciktirdiği, rijitliği belirli bir seviyede tutarak enerji birikimini artırdığı görülmektedir.

TK-5 numunesi, ilk başta TK-1 ve TK-4 ile benzer bir eğilim göstermiştir. Ancak yükleme %3,5 görelî kat ötelemesi oranını aştığında, enerji sönümleme hızı yavaşlamış ve 2103.1 kN·mm değerinde enerji sönümlemiştir. Bu durum, kolonun temelın ortasında yer almasının başlangıçta rijitliği desteklemesine karşın, ilerleyen yükleme seviyelerinde yeterli taşıma kapasitesinin sürdürülememesiyle ve eksen dışı hareketi ile açıklanabilir.

TK-2 numunesi ise en düşük enerji sönümleme kapasitesini göstermiştir. %4.5 görelî kat ötelemesi oranında ulaştığı toplam 1531.9 kN·mm değer, diğer numunelere göre oldukça düşüktür. Temel seviyesinde enine donatı bulunmayan bu numune, çatlakların erken oluşması ve rijitliğin hızla azalması nedeniyle çevrimsel yükleme altında enerjiyi sönümleyememiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, güçlendirme yöntemlerinin enerji tüketimi üzerinde doğrudan etkili olduğu, özellikle CFRP uygulamasının yüksek deplasman seviyelerinde dahi enerji sönümleme kapasitesini koruduğu açıkça görülmektedir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kolon–temel birleşim bölgelerindeki enine donatı yetersizliğinin, yapısal davranış üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiş; güçlendirme ve onarım uygulamalarının performansa katkısı değerlendirilmiştir. Deneysel program kapsamında, biri referans olmak üzere toplam dört adet 1/1 ölçekli betonarme kolon–temel birleşim numunesi hazırlanmış ve çevrimsel yatay yükleme altında testler gerçekleştirilmiştir. TK-1 numunesi yönetmeliklere uygun şekilde enine donatılı olarak üretilmiş ve referans numune olarak tanımlanmıştır. TK-2 numunesinde birleşim bölgesine hiçbir enine donatı yerleştirilmemiştir. TK-3, TK-2’nin CFRP sargılamasıyla onarılarak tekrar teste tabi tutulmuş halidir. TK-4 numunesi, çelik köşebentlerle önceden güçlendirilmiş; TK-5 numunesinde ise kolon temel ortasında konumlandırılmış ancak enine donatı kolon-temel birleşim bölgesinde kullanılmamıştır. Tüm numunelere eksenel yük sabit tutularak deplasman kontrollü çevrimsel yükleme uygulanmıştır.

Yapılan testler sonucunda, kolon–temel birleşiminde enine donatının bulunmamasının hem dayanım hem de rijitlik ve enerji tüketimi açısından önemli performans kayıplarına yol açtığı gözlemlenmiştir. Referans numune olan TK-1, pozitif yönde 32.37 kN, negatif yönde ise 19.77 kN maksimum yatay taşıma kapasitesine ulaşarak tüm numuneler arasında en yüksek performansı göstermiştir. TK-2 numunesi, pozitif yönde yaklaşık %35 daha düşük taşıma kapasitesine ulaşmış, bu da enine donatı eksikliğinin doğrudan taşıma kapasitesini sınırladığını göstermiştir. CFRP ile onarılan TK-3 numunesi ise, pozitif yönde TK-2’ye göre yaklaşık %13’lük bir artış, negatif yönde ise referans numuneye göre yaklaşık %45 daha yüksek taşıma kapasitesi sergileyerek CFRP’nin etkili bir şekilde dayanıma katkı sunduğunu ortaya koymuştur. TK-4 numunesi pozitif yönde 30.11 kN taşıma kapasitesine ulaşmış ve referans numuneye oldukça yakın bir performans sergilemiştir. TK-5 ise her iki yönde de sınırlı kapasite göstermiştir.

Rijitlik değerlendirmelerinde, TK-1 numunesi en yüksek ortalama rijitlik değerine (1.3 kN/mm) ulaşarak yapının elastik bölgedeki davranışını en iyi temsil etmiştir. CFRP ile onarılan TK-3 numunesi, başlangıçta düşük rijitlik göstermiş olsa da ileri deplasman seviyelerinde rijitliğini diğer numunelere göre daha iyi koruyarak, %4.5 görelî kat ötelemesi oranında en yüksek rijitlik değerine ulaşmıştır. Bu durum CFRP uygulamasının rijitlik kaybını geciktirdiğini ortaya koymuştur. Sekant rijitlik hesaplamalarında, zarf eğrilerinin idealizasyonu için dayanımın %60’ına karşılık gelen kuvvet ve deplasman

değerleri kullanılmış, böylece tüm numunelerin ortalama rijitlik eğilimleri eşit tabanda karşılaştırılmıştır.

Enerji sönümleme kapasiteleri açısından yapılan değerlendirmede ise TK-3 numunesi, 4639.8 kN·mm toplam enerji sönümleme kapasitesiyle tüm numunelerden ayrılmıştır. TK-1 ve TK-4 numuneleri sırasıyla 3040.8 kN·mm ve 2709.8 kN·mm ile onu takip etmiştir. En düşük enerji sönümü 1531.9 kN·mm ile TK-2’de gözlenmiş, bu durum donatısız birleşim bölgesinin yapısal sistemin sönümleme kabiliyetini ciddi oranda azalttığını göstermiştir. TK-5 numunesi ise ilk etapta başarılı bir enerji sönümleme özelliği göstermiştir ancak ileri deplasman seviyelerinde bu özelliği zayıflamıştır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması ile kolon-temel birleşim bölgesindeki enine donatının eksikliği durumunda yapısal davranışın önemli ölçüde etkilendiği ve performansın azaldığı deneysel olarak ortaya konmuştur. Bununla birlikte, CFRP ile yapılan onarım uygulamasının ve çelik köşebentlerle yapılan güçlendirme yönteminin hem dayanım hem de rijitlik ve enerji sönümleme kapasitesi üzerinde olumlu etkiler yarattığı görülmüştür. Özellikle CFRP sargılamasının ileri deplasman seviyelerinde dahi yüksek enerji tüketimi ve süneklik sağlaması, bu yöntemin yapısal onarımlar için etkili bir çözüm olduğunu göstermektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, bu çalışmada güçlendirme yöntemine alternatif olarak hem dayanımı hem de sünekliği eşzamanlı artıracak yeni yöntemler araştırılabilir. Ek olarak, sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal modeller oluşturularak elde edilen veriler deney sonuçları ile karşılaştırılabilir. Ayrıca, tek açıklıklı bir çerçeve sistemi tasarlanarak farklı kolon–temel birleşim detaylarının aynı deney düzeneğinde test edilmesi, gerçek davranışın daha etkili şekilde test edilmesini sağlayabilir. Bunlara ek olarak kolonların, temellerin farklı bölgelerinde olduğu durumlarda, çalışma konusundaki gibi birleşim bölgelerinde etriye kullanılmadığındaki davranışları da tartışılabilir.

KAYNAKÇA

- ACI Committee T1 and 374. (2001). *ACI T1.1-01: Acceptance criteria for moment frames based on structural testing*. American Concrete Institute.
- AFAD. (2023). *06 Şubat 2023 Pazarcık-Elbistan (Kahramanmaraş) Mw: 7.7 – Mw: 7.6 depremleri raporu*. AFAD Deprem ve Risk Azaltma Genel Müdürlüğü, Deprem Dairesi Başkanlığı.
- Akın, E. (2011). *Strengthening of brick infilled RC frames with CFRP reinforcement: General principles* (Doctoral dissertation). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- American Concrete Institute. (2019). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary*. American Concrete Institute.
- Avşar, Ö., Bozer, A., Tunaboyu, O., Sülev, E., Demirtaş, Y. (2023). *6 Şubat Kahramanmaraş depremlerinde 2000 sonrası yapılmış betonarme binalar ile bölgedeki karayolu köprülerinin sismik performansı: Hatay saha gözlemleri raporu*.
- Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. (1975). *Afet bölgelerinde yapılacak yapılar hakkında yönetmelik* (Resmî Gazete No: 15176, 2 Eylül 1975).
- Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. (1998). *Afet bölgelerinde yapılacak yapılar hakkında yönetmelik* (Resmî Gazete No: 23109, 6 Mart 1998).
- Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. (2007). *Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkındaki yönetmelik* (Resmî Gazete No: 26454, 6 Mart 2007).
- Bruneau, M. (2002). Building damage from the Marmara, Turkey earthquake of August 17, 1999. *Journal of Seismology*, 6(3), 357–377.
- Chong, X., Liu, H., Xie, L., Zhou, A., Huang, J., Sha, H. (2024, April). Experimental investigation of retrofitting seismically damaged reinforced-concrete frames using steel jacketing. In *Structures* (Vol. 62, p. 106243). Elsevier.
- Çağatay, İ. H. (2005). Failure of an industrial building during a recent earthquake in Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 12(4), 497-507.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018)* (Resmî Gazete No: 30364, Mükerrer, 18 Mart 2018).
- Dang, C. T. and Dinh, N. H. (2017). Experimental Study on Structural Performance of RC Exterior Beam-Column Joints Retrofitted by Steel Jacketing and Haunch Element under Cyclic Loading Simulating Earthquake Excitation. *Advances in Civil Engineering*, 2017(1), 9263460.

- Del Vecchio, C., Di Ludovico, M., Balsamo, A., Prota, A., Manfredi, G., Dolce, M. (2014). Experimental investigation of exterior RC beam-column joints retrofitted with FRP systems. *Journal of Composites for Construction*, 18(4), 04014002.
- European Committee for Standardization. (2004). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (EN 1998-1)*. CEN.
- Fan, J. J., Feng, D. C., Wu, G., Hou, S., Lu, Y. (2020). Experimental study of prefabricated RC column-foundation assemblies with two different connection methods and using large-diameter reinforcing bars. *Engineering Structures*, 205, 110075.
- Fukuyama, K., Higashibata, Y., and Miyauchi, Y. (2000). Studies on repair and strengthening methods of damaged reinforced concrete columns. *Cement and Concrete Composites*, 22(1), 81-88.
- Goksu, C. ve Ilki, A. (2016). Seismic Behavior of Reinforced Concrete Columns with Corroded Deformed Reinforcing Bars. *ACI Structural Journal*, 113(5).
- Grgić, N., Radnić, J., Matešan, D., Banović, I. (2017). Stirrups effect on the behavior of concrete columns during an earthquake: Auswirkung der Haltebügel auf das Verhalten von Betonsäulen bei Erdbeben. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 48(5), 406-419.
- Kazaz İ., Avşar, Ö. and Dilsiz, A. (2024). Importance of building inspection on the seismic response of a severely damaged RC structure during the February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquake sequence. *Engineering Failure Analysis*, 162, 108410.
- Latour, M. and Rizzano, G. (2019). Mechanical modelling of exposed column base plate joints under cyclic loads. *Journal of Constructional Steel Research*, 162, 105726.
- Le-Trung K., Lee, K., Lee, J., Lee, D. H., Woo, S. (2010). Experimental study of RC beam-column joints strengthened using CFRP composites. *Composites Part B: Engineering*, 41(1), 76-85.
- Li, J., Gong, J. and Wang, L. (2009). Seismic behavior of corrosion-damaged reinforced concrete columns strengthened using combined carbon fiber-reinforced polymer and steel jacket. *Construction and Building materials*, 23(7), 2653-2663.
- Nascimbene R. and Bianco L. (2021). Cyclic response of column to foundation connections of reinforced concrete precast structures: numerical and experimental comparisons. *Engineering Structures*, 247, 113214.
- Park R. (1989). Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing. *Bulletin of the new Zealand society for earthquake engineering*, 22(3), 155-166.

- Pul S., Senturk M., Ilki A., Hajirasouliha I. (2021). Experimental and numerical investigation of a proposed monolithic-like precast concrete column-foundation connection. *Engineering Structures*, 246, 113090.
- Saatcioglu M., Mitchell D., Tinawi R., Gardner N. J., Gillies A. G., Ghobarah, A., Lau, D. (2001). The August 17, 1999, Kocaeli (Turkey) earthquake damage to structures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(4), 715-737.
- Sta4 Software. (2023). *STA4-CAD* (Sürüm 15.3) [Bilgisayar yazılımı].
- Sucuoğlu, H. (2000). The 1999 Kocaeli and Düzce-Turkey Earthquakes. *Middle East Technical University*.
- Tao, Y., Feng, S., Zhao, Q., Zhao, W. (2024). Effects of concrete strength and joint stirrup ratio on seismic behavior of precast RCS joint with simple detail. *Engineering Structures*, 316, 118613.
- Tarabia, A. M., and Albakry, H. F. (2014). Strengthening of RC columns by steel angles and strips. *Alexandria Engineering Journal*, 53(3), 615-626.
- Türk Standartları Enstitüsü (TSE). (2000). *TS 500: Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları*. TSE.
- Visual LOG TDS-7130 V1. (2016). *Visual LOG TDS-7130 V1* [Bilgisayar yazılımı].
- Xu, W., Han, L. H., and Li, W. (2016). Seismic performance of concrete-encased column base for hexagonal concrete-filled steel tube: experimental study. *Journal of Constructional Steel Research*, 121, 352-369.
- Zhang, G., Han, Q., Xu, K., Du, X., He, W. (2021). Experimental investigation of seismic behavior of UHPC-filled socket precast bridge column-foundation connection with shear keys. *Engineering Structures*, 228, 111527.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Mert COŞKUN

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2022, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

