T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK PLASTİK İKAMESİNİN VE CFRP SARGININ BETONARME KOLONLARIN TEKRARLI YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞINA ETKİSİ

DOKTORA TEZİ

Ömer Fatih SANCAK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Bilim Dalı

MAYIS 2025

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK PLASTİK İKAMESİNİN VE CFRP SARGININ BETONARME KOLONLARIN TEKRARLI YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞINA ETKİSİ

DOKTORA TEZİ

Ömer Fatih SANCAK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Muhammet Zeki ÖZYURT

Ortak Danışman: Prof. Dr. Mehmet Emin ARSLAN

MAYIS 2025

Ömer Fatih SANCAK tarafından hazırlanan "Atık Plastik İkamesinin ve CFRP Sargının Betonarme Kolonların Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışına Etkisi" adlı tez çalışması 28.05.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı **Yapı** Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	**Prof. Dr. Metin İPEK** Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi :	**Prof. Dr. Mehmet EMİROĞLU** Sakarya Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi :	**Doç. Dr. M. Zeki ÖZYURT(Danışman)** Sakarya Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi :	**Doç. Dr. Tahir AKGÜL** Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi :	**Dr. Öğr. Üyesi Necati MERT** Sakarya Üniversitesi	.....

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum "Atık Plastik İkamesinin ve CFRP Sargının Betonarme Kolonların Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışına Etkisi" başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(28/05/2025)

Ömer Fatih SANCAK

Aileme

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Muhammet Zeki ÖZYURT'a teşekkürlerimi sunarım.

Değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım ortak danışman hocam Prof. Dr. Mehmet Emin ARSLAN'a, tez izleme komitemde yer alarak değerli vaktini ve fikirlerini benimle paylaşan Prof. Dr. Mehmet EMİROĞLU'na ve Doç. Dr. Tahir AKGÜL'e, çalışmada emeği geçen tüm Sakarya Üniversitesi görevlilerine teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi her konuda desteklerini esirgemeyen, üzerimde emekleri olan, bugünlere gelmemde büyük katkıları olan aileme teşekkür ederim.

2024-26-61-21 numaralı proje ile bu çalışmayı destekleyen Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

224M521 numaralı proje ile bu çalışmayı destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Ömer Fatih SANCAK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ v
TEŞEKKÜR ix
İÇİNDEKİLER xi
KISALTMALAR xv
SİMGELER xvii
TABLO LİSTESİ xxi
ŞEKİL LİSTESİ xxv
ÖZET xxxiii
SUMMARY xxxv
1. GİRİŞ 1
1.1. PET Atıklar ve Beton 2
1.2. Betonarme Kolonlarda Sismik Yükleme ve Güçlendirme 3
1.3. Tezin Amacı ve Özgün Değeri 7
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 11
2.1. PET Atıklar ve Beton Literatür Özeti 11
2.2. Betonarme Kolonlarda Sismik Yükleme ve Güçlendirme Literatür Özeti 12
2.2.1. FRP sargısı olmayan kolonların sismik yük çalışma sonuçları 13
2.2.2. FRP sargılı kolonların sismik yük çalışma sonuçları 16
2.3. Deney Düzenekleri Literatür Özeti 21
3. BETONDA PET İKAMESİ DENEYLERİ 31
3.1. Betonda PET İkamesi Deneyleri İçin Tasarım 31
3.2. Betonda PET İkamesi Deneyleri İçin Materyal 31
3.2.1. PET granüller 32
3.2.2. Lifli polimer kumaşlar 32
3.2.3. Epoksi 33
3.2.4. Mıcır 33
3.2.5. Kum 34
3.2.6. Çimento 34
3.2.7. Betoniyer 35
3.2.8. Kompressometre 35
3.2.9. Gerinim ölçer 36
3.2.10. Veri toplama ünitesi 36
3.3. Betonda PET İkamesi Deneyleri İçin Metot 37
3.4. Betonda PET İkamesi Deneyleri İçin Deney Sonuçları 42
3.4.1. Çökme değerleri 42
3.4.2. Yoğunluk değerleri 43
3.4.3. Betonda PET ikamesi deneyleri için basınç dayanımı deneyi sonuçları 44
3.4.4. Betonda PET ikamesi deneyleri için yarmada çekme dayanımı deneyi sonuçları 46
3.4.5. Betonda PET ikamesi deneyleri için eğilme dayanımı deneyi sonuçları 47

3.4.6. Betonda PET ikamesi deneyleri için elastisite modülü ve poisson oranı değerleri 49
4. BETONDA PET İKAMESİ VE FRP SARGI DENEYLERİ 51
4.1. Betonda PET İkamesi ve FRP Sargı Deneyleri İçin Tasarım 51
4.2. Betonda PET İkamesi ve FRP Sargı Deneyleri İçin Materyal 53
4.3. Betonda PET İkamesi ve FRP Sargı Deneyleri İçin Metot 54
4.4. Betonda PET İkamesi ve FRP Sargı Deneyleri İçin Deney Sonuçları 54
4.4.1. Betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için basınç dayanımı deneyi sonuçları 54
4.4.2. Betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için yarmada çekme dayanımı deneyi sonuçları 55
4.4.3. Betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için eğilme dayanımı deneyi sonuçları 56
4.4.4. Betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için elastisite modülü ve poisson oranı değerleri 57
5. MALZEME DENEYLERİ İÇİN VERİ TABANI VE MODEL GELİŞTİRME 59
5.1. PET İkameli Beton 59
5.1.1. Basınç dayanımı için model geliştirme 61
5.1.2. Çekme dayanımı için model geliştirme 64
5.1.3. Eğilme dayanımı için model geliştirme 69
5.1.4. Elastisite modülü için model geliştirme 73
5.2. FRP Etkisi 77
6. KOLON DENEYLERİ 83
6.1. Kolon Deneyleri İçin Tasarım 83
6.2. Kolon Deneyleri İçin Materyal 86
6.2.1. Donatı 86
6.2.2. Kalıp 87
6.2.3. Yük hücresi 87
6.2.4. Lineer potansiyometre 88
6.2.5. Aktüatör 88
6.2.6. Statik veri toplama ünitesi 89
6.3. Kolon Deneyleri İçin Metot 89
6.4. Kolon Deneyleri İçin Deney Sonuçları 96
6.4.1. CL-R-0-015 kolonu 102
6.4.2. CL-R-0-030 kolonu 107
6.4.3. CL-CFRP-0-015 kolonu 112
6.4.4. CL-CFRP-0-030 kolonu 117
6.4.5. CL-PET-10-015 kolonu 122
6.4.6. CL-PET-10-030 kolonu 127
6.4.7. CL-PET-CFRP-10-015 kolonu 132
6.4.8. CL-PET-CFRP-10-030 kolonu 137
6.5. Kolonlardan Alınan Numuneler İçin Malzeme Deneyleri 142
7. KOLON DENEYLERİ İÇİN DEĞERLENDİRME VE TARTIŞMA 147
7.1. Maksimum Yük ve Süneklik Katsayısı Değerlerinin Karşılaştırılması 147
7.1.1. PET ikamesinin varlığına göre maksimum yük ve süneklik katsayısı 148
7.1.2. Karbon lifli polimer sargı kullanımına göre maksimum yük ve süneklik katsayısı 153
7.1.3. Eksenel yük düzeyine göre maksimum yük ve süneklik katsayısı 158
7.2. Rijitlik Değerlerinin Karşılaştırılması 163

7.2.1. PET ikamesinin varlığına göre rijitlik değerleri 163
7.2.2. Karbon lifli polimer sargı kullanımına göre rijitlik değerleri 170
7.2.3. Eksenel yük düzeyine göre rijitlik değerleri 178
7.3. Enerji Sönümleme Kapasitelerinin Karşılaştırılması 186
7.3.1. PET ikamesinin varlığına göre enerji sönümleme kapasiteleri..... 187
7.3.2. Karbon lifli polimer sargı kullanımına göre enerji sönümleme kapasiteleri 194
7.3.3. Eksenel yük düzeyine göre enerji sönümleme kapasiteleri..... 201
7.4. Maksimum Kesme Kuvvetinin Önerilen Modeller ile Uyumu 208
7.4.1. PET ikamesinin varlığına göre modellerin uyumu 217
7.4.2. Karbon lifli polimer sargı kullanımına göre modellerin uyumu 221
7.4.3. Eksenel yük düzeyine göre modellerin uyumu 225
8. SONUÇ 231
KAYNAKLAR 237
EKLER 247
ÖZGEÇMİŞ..... 259

KISALTMALAR

ACI : Amerikan Beton Enstitüsü (American Concrete Institute)
AFRP : Aramid Fiber Takviyeli Polimer (Aramid Fiber Reinforced Polymer)
ASTM : American Society for Testing and Materials
CFRP : Karbon Fiber Takviyeli Polimer (Carbon Fiber Reinforced Polymer)
CSA : Kanada Standartları Birliği (Canadian Standard Association)
EN : Avrupa Standartları (European Norm)
FEMA : Federal Emergency Management Agency
FRP : Fiber Takviyeli Polimer (Fiber Reinforced Polymer)
GFRP : Cam Fiber Takviyeli Polimer (Glass Fiber Reinforced Polymer)
MABE : Ortalama Mutlak Sapma Hatası (Mean Absolute Bias Error)
MAPE : Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (Mean Absolute Percentage Error)
PET : Polietilen Tereftalat (Polyethylene Terephthalate)
TBDY : Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TOPSIS : Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

SİMGELER

a : Kesme açıklığı

A_c : Kolonun brüt enkesit alanı

A_g : Kolon kesitinin brüt alanı

A_s : Çekme donatısı alanı

A_{sh} : Enine donatı aralığında enine donatı kesit alanı

b : Betonarme kolonun kesitinin genişliği

c : Beton örtü kalınlığı

c_a : Kemer modelinde etkin destek derinliği

d : Kolonun kesitinin etkin derinliği

D : Beton numunenin çapı

D' : Kolon kesitinde en dış enine donatıların merkezleri arasındaki mesafe

DR : Ötelenme oranı

DR_m : Betonarme kolonun maksimum dayanım anındaki ötelenme oranı

DR_u : Betonarme kolonun nihai dayanım anındaki ötelenme oranı

DR_y : Betonarme kolonun akma anındaki ötelenme oranı

d_v : Kolonun etkin kesme derinliği

E_1 : Elastisite modülü (Gerilme-gerinim grafiğin ilk kısmındaki eğim)

E_2 : Gerilme-gerinim grafiğin ikinci kısmındaki eğim

E_c : İkamesiz betonun elastisite modülü

E_{cpet} : PET ikameli betonun elastisite modülü

E_{cum} : Kümülatif enerji sönümleme değeri

E_{frp} : FRP malzemesinin elastisite modülü

E_{DR} : Ötelenme oranındaki enerji sönümleme değeri

E_s : Çelik donatının elastisite modülü

f_{ck} : Betonun karakteristik silindir basınç dayanımı

f_{frp} : FRP malzemesinin çekme dayanımı

f_{lu} : FRP malzemesinin nihai yanal sargılama etkisi

$f_{lu,a}$: FRP malzemesinin gerçek nihai yanal sargılama etkisi

f_{yh} : Enine donatının akma dayanımı

f'_c : İkamesiz betonun maksimum basınç dayanımı

f'_{cc} : Sargılı betonun maksimum basınç dayanımı

f'_{co} : Sargısız betonun maksimum basınç dayanımı

f'_{cpet} : PET ikameli betonun maksimum basınç dayanımı

f'_r : İkamesiz betonun eğilme dayanımı

f'_{rpet} : PET ikameli betonun eğilme dayanımı

f'_t : İkamesiz betonun çekme dayanımı

f'_{tpet} : PET ikameli betonun çekme dayanımı

h : Betonarme kolunun kesit yüksekliği

H : Beton numunenin yüksekliği

$K_{0.15}$: 0.15 ötelenme oranındaki sekant rijitliği

K_a : Kemer modelin kesme rijitliği

K_{DR} : Ötelenme oranındaki sekant rijitliği

K_t : Kafes modelin kesme rijitliği

K_u : Nihai dayanım anındaki rijitlik değeri

K_y : Akma anındaki rijitlik değeri

k_ε : Gerinim azaltma faktörü

L : Betonarme kolonun yüksekliği

P : Kolona uygulanan eksenel kuvvet

$pet\%$: PET ikame yüzdesi

s : Enine donatı aralığı

s_{ze} : Kolonun etkin çatlak aralığı

t_{frp} : FRP malzemesinin kalınlığı

V_a : Kesme dayanımına kemer hareketinin etkisi

V_c : Kesme dayanımına betonun etkisini

V_{DR+} : Betonarme kolonun ötelenme oranındaki pozitif yük değeri

V_{DR-} : Betonarme kolonun ötelenme oranındaki negatif yük değeri

V_m : Betonarme kolonun maksimum dayanımı

V_n : Betonarme kolonun kesme dayanımı

V_p : Kesme dayanımına eksenel yük tarafından sağlanan katkı

V_s : Kesme dayanımına enine donatının etkisi

V_y : Betonarme kolonun akma dayanımı

V_{y+} : Betonarme kolonun akma dayanımı anındaki pozitif yük değeri

V_{y-} : Betonarme kolonun akma dayanımı anındaki negatif yük değeri

V_u : Betonarme kolonun nihai dayanımı

V_{u+} : Betonarme kolonun nihai dayanımı anındaki pozitif yük değeri

V_{u-} : Betonarme kolonun nihai dayanımı anındaki negatif yük değeri

x : Tarafsız eksen derinliği

α : Kemer eğimi

β : Kesme dayanımına beton katkısını ifade eden katsayı

γ_{cpet} : PET ikameli betonun yoğunluğu

γ_E : Çelik donatı elastisite modülünün betonun elastisite modülüne oranı

ε_{co} : Sargısız betonun maksimum basınç dayanımındaki eksenel gerinim

ε_{cu} : Sargılı betonun maksimum basınç dayanımındaki eksenel gerinim

ε_{frp} : FRP malzemesinin nihai çekme gerinimi

$\varepsilon_{h,rup}$: FRP sargı kopma gerinimi

ε_{lo} : Sargısız betonun maksimum basınç dayanımındaki yanal gerinim

ε_{lu} : Sargılı betonun maksimum basınç dayanımındaki yanal gerinim

ε_x : Kolon kesitinin orta derinliğindeki boyuna gerinim

ζ_1 : Sınır koşuluna bağlı olan birinci katsayı (ε_x hesaplanırken kullanılır)

ζ_2 : Sınır koşuluna bağlı olan ikinci katsayı (θ hesaplanırken kullanılır)

θ : Kolonun boyuna eksenine göre çatlamış betonun açısı

λ_K : Rijitlik azalma oranı

μ : Süneklik katsayısı

μ_K : Rijitlik katsayısı

ν : Poisson Oranı

ρ_h : Enine donatının hacimsel oranı

ρ_{sl} : Boyuna donatının hacimsel oranı

Δ_{DR+} : Betonarme kolonun ötelenme oranındaki pozitif yer değiştirmesi

Δ_{DR-} : Betonarme kolonun ötelenme oranındaki negatif yer değiştirmesi

Δ_m : Betonarme kolonun maksimum dayanım anındaki yer değiştirmesi

Δ_u : Betonarme kolonun nihai dayanım anındaki yer değiştirmesi

Δ_{u+} : Betonarme kolonun nihai dayanım anındaki pozitif yer değiştirmesi

Δ_{u-} : Betonarme kolonun nihai dayanım anındaki negatif yer değiştirmesi

Δ_y : Betonarme kolonun akma anındaki yer değiştirmesi

Δ_{y+} : Betonarme kolonun akma anındaki pozitif yer değiştirmesi

Δ_{y-} : Betonarme kolonun akma anındaki negatif yer değiştirmesi

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Literatürdeki malzeme deneyleri..... 21
Tablo 3.1. Betonda PET ikamesi deneyleri isimlendirmesi. 31
Tablo 3.2. Granül malzeme özellikleri. 32
Tablo 3.3. 1 m^3 referans beton tarifi. 37
Tablo 3.4. FRP kullanılmayan numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için basınç dayanımı deneyi sonuçları. 45
Tablo 3.5. FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için basınç dayanımı deneyi sonuçları..... 46
Tablo 3.6. Numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için yarmada çekme dayanımı deneyi sonuçları. 47
Tablo 3.7. FRP kullanılmayan numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için eğilme dayanımı deneyi sonuçları..... 48
Tablo 3.8. FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için eğilme dayanımı deneyi sonuçları..... 49
Tablo 3.9. Numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için basınç dayanımı deneylerinden elde edilen elastisite modülü değerleri. 50
Tablo 3.10. Numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için basınç dayanımı deneylerinden elde edilen poisson oranı değerleri. 50
Tablo 4.1. Karar matrisi..... 51
Tablo 4.2. Normalize karar matrisi. 52
Tablo 4.3. Ağırlıklı normalize karar matrisi..... 52
Tablo 4.4. Pozitif ideal ve negatif ideal çözüm değerleri..... 52
Tablo 4.5. Pozitif ideal ve negatif ideal çözüm değerlerine olan uzaklıklar. 53
Tablo 4.6. İdeal çözüme göreli yakınlık değerleri..... 53
Tablo 4.7. Betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri isimlendirmesi..... 53
Tablo 4.8. FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için basınç dayanımı deneyi sonuçları. 55
Tablo 4.9. FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için yarmada çekme dayanımı deneyi sonuçları. 55
Tablo 4.10. FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için eğilme dayanımı deneyi sonuçları..... 56
Tablo 4.11. Numunelerin betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için basınç dayanımı deneylerinden elde edilen elastisite modülü değerleri. 57
Tablo 4.12. Numunelerin betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için basınç dayanımı deneylerinden elde edilen poisson oranı değerleri. 57
Tablo 5.1. İstatiksel metrikler..... 59
Tablo 5.2. Basınç dayanımı için elde edilen denklemler ve önerilen geliştirilmiş modeller..... 62
Tablo 5.3. Basınç dayanımı için önerilen modeller ve performansları. 63
Tablo 5.4. Çekme dayanımı ile PET ikame yüzdesi arasındaki bağlantı için elde edilen denklemler ve önerilen geliştirilmiş modeller..... 65

Tablo 5.5. Çekme dayanımı ile PET ikame yüzdesi arasındaki bağlantı için önerilen modeller ve performansları. 66
Tablo 5.6. Çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki bağlantı için elde edilen denklemler ve önerilen geliştirilmiş modeller. 68
Tablo 5.7. Çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki bağlantı için önerilen modeller ve performansları. 68
Tablo 5.8. Eğilme dayanımı ile PET ikame yüzdesi arasındaki bağlantı için elde edilen denklemler ve önerilen geliştirilmiş modeller. 70
Tablo 5.9. Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki bağlantı için elde edilen denklemler ve önerilen geliştirilmiş modeller. 72
Tablo 5.10. Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki bağlantı için önerilen modeller ve performansları. 72
Tablo 5.11. Elastisite modülü ile PET ikame yüzdesi arasındaki bağlantı için elde edilen denklemler ve önerilen geliştirilmiş modeller. 74
Tablo 5.12. Elastisite modülü ile PET ikame yüzdesi arasındaki bağlantı için önerilen modeller ve performansları. 74
Tablo 5.13. Elastisite modülü ile basınç dayanımı arasındaki bağlantı için elde edilen denklemler ve önerilen geliştirilmiş modeller. 75
Tablo 5.14. Elastisite modülü ile basınç dayanımı arasındaki bağlantı için önerilen modeller ve performansları. 76
Tablo 5.15. FRP ile sarılmış beton numunelerin sonuçları ve FRP özellikleri. 77
Tablo 5.16. Basınç dayanımı için sargılı beton modellerinin deneysel veriler ile uyumu. 78
Tablo 5.17. Nihai gerinim değeri için sargılı beton modellerinin deneysel veriler ile uyumu. 80
Tablo 6.1. Kolon deneyleri isimlendirmesi. 84
Tablo 6.2. Oluşturulan betonarme kolonların boyut ve donatı detayı. 86
Tablo 6.3. Kolon numunelerin deney sonuçları. 98
Tablo 6.4. Kolon numunelerin rijitlik katsayıları. 100
Tablo 6.5. Kolon numunelerin kümülatif enerji sönümleme değerleri. 101
Tablo 6.6. CL-R-0-015 numunesi deney sonuçları. 103
Tablo 6.7. CL-R-0-015 numunesi için rijitlik değerleri. 104
Tablo 6.8. CL-R-0-015 numunesi için sönümlenen enerji değerleri. 105
Tablo 6.9. CL-R-0-030 numunesi deney sonuçları. 108
Tablo 6.10. CL-R-0-030 numunesi için rijitlik değerleri. 109
Tablo 6.11. CL-R-0-030 numunesi için sönümlenen enerji değerleri. 110
Tablo 6.12. CL-CFRP-0-015 numunesi deney sonuçları. 113
Tablo 6.13. CL-CFRP-0-015 numunesi için rijitlik değerleri. 114
Tablo 6.14. CL-CFRP-0-015 numunesi için sönümlenen enerji değerleri. 115
Tablo 6.15. CL-CFRP-0-030 numunesi deney sonuçları. 118
Tablo 6.16. CL-CFRP-0-030 numunesi için rijitlik değerleri. 119
Tablo 6.17. CL-CFRP-0-030 numunesi için sönümlenen enerji değerleri. 120
Tablo 6.18. CL-PET-10-015 numunesi deney sonuçları. 123
Tablo 6.19. CL-PET-10-015 numunesi için rijitlik değerleri. 124
Tablo 6.20. CL-PET-10-015 numunesi için sönümlenen enerji değerleri. 125
Tablo 6.21. CL-PET-10-030 numunesi deney sonuçları. 128
Tablo 6.22. CL-PET-10-030 numunesi için rijitlik değerleri. 129
Tablo 6.23. CL-PET-10-030 numunesi için sönümlenen enerji değerleri. 130
Tablo 6.24. CL-PET-CFRP-10-015 numunesi deney sonuçları. 133
Tablo 6.25. CL-PET-CFRP-10-015 numunesi için rijitlik değerleri. 134

Tablo 6.26. CL-PET-CFRP-10-015 numunesi için sönümlenen enerji değerleri. .. 135
Tablo 6.27. CL-PET-CFRP-10-030 numunesi deney sonuçları. ... 138
Tablo 6.28. CL-PET-CFRP-10-030 numunesi için rijitlik değerleri. ... 139
Tablo 6.29. CL-PET-CFRP-10-030 numunesi için sönümlenen enerji değerleri. .. 140
Tablo 6.30. Silindir beton numune dayanımları. ... 143
Tablo 6.31. Donatı çekme deneyi sonuçları. ... 145
Tablo 7.1. Maksimum yük ve süneklik katsayısına PET ikamesinin etkisi. ... 148
Tablo 7.2. Maksimum yük ve süneklik katsayısına karbon lifli polimer sargının etkisi. ... 153
Tablo 7.3. Maksimum yük ve süneklik katsayısına eksenel yük düzeyinin etkisi. . 158
Tablo 7.4. Rijitlik değerlerine PET ikamesinin etkisi. ... 163
Tablo 7.5. CL-R-0-015 ve CL-PET-10-015 sekant rijitliği farklılıkları. ... 166
Tablo 7.6. CL-R-0-030 ve CL-PET-10-030 sekant rijitliği farklılıkları. ... 167
Tablo 7.7. CL-CFRP-0-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 sekant rijitliği farklılıkları. ... 168
Tablo 7.8. CL-CFRP-0-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 sekant rijitliği farklılıkları. ... 169
Tablo 7.9. Rijitlik değerlerine karbon lifli polimer sargının etkisi. ... 171
Tablo 7.10. CL-R-0-015 ve CL-CFRP-0-015 sekant rijitliği farklılıkları. ... 174
Tablo 7.11. CL-R-0-030 ve CL-CFRP-0-030 sekant rijitliği farklılıkları. ... 175
Tablo 7.12. CL-PET-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 sekant rijitliği farklılıkları. ... 176
Tablo 7.13. CL-PET-10-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 sekant rijitliği farklılıkları. ... 177
Tablo 7.14. Rijitlik değerlerine eksenel yük düzeyinin etkisi. ... 179
Tablo 7.15. CL-R-0-015 ve CL-R-0-030 sekant rijitliği farklılıkları. ... 182
Tablo 7.16. CL-CFRP-0-015 ve CL-CFRP-0-030 sekant rijitliği farklılıkları. ... 183
Tablo 7.17. CL-PET-10-015 ve CL-PET-10-030 sekant rijitliği farklılıkları. ... 184
Tablo 7.18. CL-PET-CFRP-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-030 sekant rijitliği farklılıkları. ... 185
Tablo 7.19. Kümülatif enerji değerine PET ikamesinin etkisi. ... 187
Tablo 7.20. CL-R-0-015 ve CL-PET-10-015 enerji değerleri. ... 188
Tablo 7.21. CL-R-0-030 ve CL-PET-10-030 enerji değerleri. ... 190
Tablo 7.22. CL-CFRP-0-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 enerji değerleri. ... 191
Tablo 7.23. CL-CFRP-0-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 enerji değerleri. ... 193
Tablo 7.24. Kümülatif enerji değerine karbon lifli polimer sargı kullanımının etkisi. ... 194
Tablo 7.25. CL-R-0-015 ve CL-CFRP-0-015 enerji değerleri. ... 195
Tablo 7.26. CL-R-0-030 ve CL-CFRP-0-030 enerji değerleri. ... 197
Tablo 7.27. CL-PET-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 enerji değerleri. ... 198
Tablo 7.28. CL-PET-10-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 enerji değerleri. ... 200
Tablo 7.29. Kümülatif enerji değerine eksenel yük düzeyinin etkisi. ... 201
Tablo 7.30. CL-R-0-015 ve CL-R-0-030 enerji değerleri. ... 202
Tablo 7.31. CL-CFRP-0-015 ve CL-CFRP-0-030 enerji değerleri. ... 204
Tablo 7.32. CL-PET-10-015 ve CL-PET-10-030 enerji değerleri. ... 205
Tablo 7.33. CL-PET-CFRP-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-030 enerji değerleri. ... 207
Tablo 7.34. Kesme dayanımı modelleri. ... 215
Tablo 7.35. Tüm kolon numunelerin kesme dayanımları ve modellerin tahminleri. ... 216

Tablo 7.36. Tüm kolon numunelerin kesme dayanımları için modellerin performansı. 216
Tablo 7.37. PET ikamesi yapılmayan kolon numunelerin kesme dayanımları ve modellerin tahminleri. 218
Tablo 7.38. PET ikamesi yapılmayan kolon numunelerin kesme dayanımları için modellerin performansı. 218
Tablo 7.39. PET ikamesi yapılan kolon numunelerin kesme dayanımları ve modellerin tahminleri. 219
Tablo 7.40. PET ikamesi yapılan kolon numunelerin kesme dayanımları için modellerin performansı. 220
Tablo 7.41. Karbon lifli polimer sargı kullanılmayan kolon numunelerin kesme dayanımları ve modellerin tahminleri. 221
Tablo 7.42. Karbon lifli polimer sargı kullanılmayan kolon numunelerin kesme dayanımları için modellerin performansı. 222
Tablo 7.43. Karbon lifli polimer sargı kullanılan kolon numunelerin kesme dayanımları ve modellerin tahminleri. 223
Tablo 7.44. Karbon lifli polimer sargı kullanılan kolon numunelerin kesme dayanımları için modellerin performansı. 224
Tablo 7.45. Eksenel kuvvet oranı 0.15 olan kolon numunelerin kesme dayanımları ve modellerin tahminleri. 225
Tablo 7.46. Eksenel kuvvet oranı 0.15 olan kolon numunelerin kesme dayanımları için modellerin performansı. 226
Tablo 7.47. Eksenel kuvvet oranı 0.30 olan kolon numunelerin kesme dayanımları ve modellerin tahminleri. 227
Tablo 7.48. Eksenel kuvvet oranı 0.30 olan kolon numunelerin kesme dayanımları için modellerin performansı. 228

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Almeshal ve ark. (2020) çalışmasına ait görseller. 11
Şekil 2.2. Saxena ve ark. (2018) çalışmasına ait görseller. 12
Şekil 2.3. Wang ve ark. (2018) çalışmasına ait görseller. 17
Şekil 2.4. Yu ve ark. (2018) çalışmasına ait görseller. 18
Şekil 2.5. Wang ve ark. (2022) çalışmasına ait görseller. 19
Şekil 2.6. Seyhan ve ark. (2015) çalışmasına ait görseller. 21
Şekil 2.7. Ispir (2015) çalışmasına ait görseller. 22
Şekil 2.8. Ahmad ve ark. (2021) çalışmasına ait görseller. 22
Şekil 2.9. Ispir (2015) çalışmasına ait elde edilen sonuçların görseli. 22
Şekil 2.10. Manda ve ark. (2023) çalışmasına ait görseller. 23
Şekil 2.11. Yurt (2020) çalışmasına ait görseller. 23
Şekil 2.12. Manda ve ark. (2023) çalışmasına ait elde edilen sonuçların görseli. 23
Şekil 2.13. Jang ve Yun (2018) çalışmasına ait görsel. 24
Şekil 2.14. Jang ve Yun (2018) çalışmasına ait elde edilen sonuçların görseli. 24
Şekil 2.15. Donatı çekme deneyi Olabi (2021) çalışmasına ait görseller. 24
Şekil 2.16. Olabi (2021) çalışmasına ait elde edilen sonuçların görseli. 25
Şekil 2.17. Lifli polimer kumaş çekme deneyi Zhang ve ark. (2016) çalışmasına ait görseller. 25
Şekil 2.18. Zhang ve ark. (2016) çalışmasına ait görsel. 26
Şekil 2.19. Betonarme kolonlarda tekrarlı yükleme testi Liu ve ark. (2019) çalışmasına ait görseller. 26
Şekil 2.20. Betonarme kolonlarda tekrarlı yükleme testi He ve ark. (2018) çalışmasına ait görseller. 27
Şekil 2.21. Betonarme kolonlarda tekrarlı yükleme testi Liu ve ark. (2018) çalışmasına ait görseller. 27
Şekil 2.22. Liu ve ark. (2019) çalışmasına ait görsel. 28
Şekil 2.23. He ve ark. (2018) çalışmasına ait görsel. 28
Şekil 2.24. Liu ve ark. (2019) çalışmasına ait görsel. 29
Şekil 3.1. PET granüller. 32
Şekil 3.2. FRP tipleri: a) CFRP, b) GFRP. 33
Şekil 3.3. FRP sarma işleminde kullanılan epoksi. 33
Şekil 3.4. Mıcırlar: a) 1 numaralı mıcır, b) 2 numaralı mıcır. 34
Şekil 3.5. Beton üretiminde kullanılan kum. 34
Şekil 3.6. Beton üretiminde kullanılan çimento. 35
Şekil 3.7. Beton üretiminde kullanılan betoniyer. 35
Şekil 3.8. Basınç dayanımı testlerinde kullanılan kompressometre. 36
Şekil 3.9. Basınç dayanımı testlerinde kullanılan gerinim ölçer. 36
Şekil 3.10. Basınç dayanımı testlerinde kullanılan veri toplama ünitesi. 37
Şekil 3.11. Oluşturulan betonun görüntüsü. 38
Şekil 3.12. Çökme deneyi görüntüsü. 39
Şekil 3.13. Silindir beton numunelerin görüntüsü. 39

Şekil 3.14. Silindir beton numunelerin kür havuzundaki görüntüsü..... 40
Şekil 3.15. Lifli polimer kumaş ile sarılmış olan beton numuneler..... 40
Şekil 3.16. Basınç dayanımı deneyi ile ilgili görüntü..... 41
Şekil 3.17. Yarmada çekme dayanımı deneyi ile ilgili görüntü..... 41
Şekil 3.18. Eğilme dayanımı deneyi ile ilgili görüntü..... 42
Şekil 3.19. Çökme değeri–PET yüzdesi grafiği..... 43
Şekil 3.20. Yoğunluk–PET yüzdesi grafiği..... 44
Şekil 3.21. FRP kullanılmayan numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için basınç dayanımı deneylerinden elden edilen gerilme-gerinim grafikleri.. 45
Şekil 3.22. FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için basınç dayanımı deneylerinden elden edilen gerilme-gerinim grafikleri..... 46
Şekil 3.23. FRP kullanılmayan numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için eğilme dayanımı deneylerinden elden edilen gerilme-gerinim grafikleri. 48
Şekil 3.24. FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için eğilme dayanımı deneylerinden elden edilen gerilme-gerinim grafikleri..... 49
Şekil 4.1. FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için basınç dayanımı deneylerinden elden edilen gerilme-gerinim grafikleri. 55
Şekil 4.2. FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için eğilme dayanımı deneylerinden elden edilen gerilme-gerinim grafikleri. 56
Şekil 5.1. Basınç dayanımı oranı–PET yüzdesi grafiği..... 61
Şekil 5.2. Basınç dayanımı modellerinin R^2 ve MABE karşılaştırması..... 64
Şekil 5.3. Çekme dayanımı oranı–PET yüzdesi grafiği..... 64
Şekil 5.4. Çekme dayanımı ile PET yüzdesi arasındaki bağlantı modellerinin R^2 ve MABE karşılaştırması..... 66
Şekil 5.5. Çekme dayanımı–basınç dayanımı grafiği..... 67
Şekil 5.6. Çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki bağlantı modellerinin R^2 ve MABE karşılaştırması..... 69
Şekil 5.7. Eğilme dayanımı–PET yüzdesi grafiği..... 70
Şekil 5.8. Eğilme dayanımı–basınç dayanımı grafiği..... 71
Şekil 5.9. Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki bağlantı modellerinin R^2 ve MABE karşılaştırması..... 73
Şekil 5.10. Elastisite modülü–PET yüzdesi grafiği..... 73
Şekil 5.11. Elastisite modülü–basınç dayanımı grafiği..... 75
Şekil 5.12. Elastisite modülü ile basınç dayanımı arasındaki bağlantı modellerinin R^2 ve MABE karşılaştırması..... 76
Şekil 5.13. FRP etkisinde basınç dayanımı için deneysel veriler ve model tahminleri. 78
Şekil 5.14. FRP etkisinde basınç dayanımı modellerinin MABE ve MAPE karşılaştırması..... 79
Şekil 5.15. FRP etkisinde nihai gerinim için deneysel veriler ve model tahminleri.. 79
Şekil 5.16. FRP etkisinde nihai gerinim modellerinin MABE ve MAPE karşılaştırması..... 81
Şekil 6.1. Betonarme kolonların kısa kenarı için donatı taslağı..... 84
Şekil 6.2. Betonarme kolonların uzun kenarı için donatı taslağı..... 85
Şekil 6.3. Betonarme kolonların temel donatıları ve etriyeleri için donatı taslağı..... 85
Şekil 6.4. Betonarme kolonların üretiminde kullanılan donatılar..... 86
Şekil 6.5. Betonarme kolonların üretiminde kullanılan kalıplar..... 87
Şekil 6.6. Deneyler esnasında kullanılan yük hücresi..... 87

Şekil 6.7. Deneyler esnasında kullanılan potansiyometre. 88
Şekil 6.8. Deneyler esnasında kullanılan aktüatör. 88
Şekil 6.9. Deneyler esnasında kullanılan veri toplama ünitesi. 89
Şekil 6.10. Betonarme kolon temeli için donatı uygulaması. 89
Şekil 6.11. Betonarme kolon için donatı uygulaması. 90
Şekil 6.12. Betonarme kolon temeli için kalıp uygulaması. 90
Şekil 6.13. Betonarme kolonlarda gerinim ölçer uygulaması. 91
Şekil 6.14. Betonarme kolonların donatılarının filizlere yerleştirilmesi 91
Şekil 6.15. Betonarme kolonlar için kalıp uygulaması. 92
Şekil 6.16. Betonarme kolonlar için PET ikameli beton üretimi. 92
Şekil 6.17. Betonarme kolonlar için beton üretimi. 93
Şekil 6.18. Betonarme kolonlar için beton dökümü. 93
Şekil 6.19. Betonarme kolonlar için karbon lifli polimer uygulaması. 94
Şekil 6.20. Betonarme kolonlar için deney düzeneği. 95
Şekil 6.21. Betonarme kolonlar için tekrarlı yükleme protokolü 96
Şekil 6.22. Eşdeğer enerji yöntemi. 97
Şekil 6.23. Sekant rijitliği hesabı. 99
Şekil 6.24. Rijitlik katsayısı hesabı. 100
Şekil 6.25. Enerji sönümleme kapasitesi hesabı. 101
Şekil 6.26. CL-R-0-015 yatay yük-yer değiştirme grafiği. 102
Şekil 6.27. CL-R-0-015 zarf eğrisi. 102
Şekil 6.28. CL-R-0-015 numunesi deney sonrası görüntüleri. 103
Şekil 6.29. CL-R-0-015 numunesi sekant rijitliği grafiği. 104
Şekil 6.30. CL-R-0-015 numunesi sekant rijitlik oranı grafiği. 105
Şekil 6.31. CL-R-0-015 numunesi sönümlenen enerji grafiği. 106
Şekil 6.32. CL-R-0-015 numunesi kümülatif sönümlenen enerji grafiği. 106
Şekil 6.33. CL-R-0-030 yatay yük-yer değiştirme grafiği. 107
Şekil 6.34. CL-R-0-030 zarf eğrisi. 107
Şekil 6.35. CL-R-0-030 numunesi deney sonrası görüntüleri. 108
Şekil 6.36. CL-R-0-030 numunesi sekant rijitliği grafiği. 109
Şekil 6.37. CL-R-0-030 numunesi sekant rijitlik oranı grafiği. 110
Şekil 6.38. CL-R-0-030 numunesi sönümlenen enerji grafiği. 111
Şekil 6.39. CL-R-0-030 numunesi kümülatif sönümlenen enerji grafiği. 111
Şekil 6.40. CL-CFRP-0-015 yatay yük-yer değiştirme grafiği. 112
Şekil 6.41. CL-CFRP-0-015 zarf eğrisi. 112
Şekil 6.42. CL-CFRP-0-015 numunesi deney sonrası görüntüleri. 113
Şekil 6.43. CL-CFRP-0-015 numunesi sekant rijitliği grafiği. 114
Şekil 6.44. CL-CFRP-0-015 numunesi sekant rijitlik oranı grafiği. 115
Şekil 6.45. CL-CFRP-0-015 numunesi sönümlenen enerji grafiği. 116
Şekil 6.46. CL-CFRP-0-015 numunesi kümülatif sönümlenen enerji grafiği. 116
Şekil 6.47. CL-CFRP-0-030 yatay yük-yer değiştirme grafiği. 117
Şekil 6.48. CL-CFRP-0-030 zarf eğrisi. 117
Şekil 6.49. CL-CFRP-0-030 numunesi deney sonrası görüntüleri. 118
Şekil 6.50. CL-CFRP-0-030 numunesi sekant rijitliği grafiği. 119
Şekil 6.51. CL-CFRP-0-030 numunesi sekant rijitlik oranı grafiği. 120
Şekil 6.52. CL-CFRP-0-030 numunesi sönümlenen enerji grafiği. 121
Şekil 6.53. CL-CFRP-0-030 numunesi kümülatif sönümlenen enerji grafiği. 121
Şekil 6.54. CL-PET-10-015 yatay yük-yer değiştirme grafiği. 122
Şekil 6.55. CL-PET-10-015 zarf eğrisi. 122
Şekil 6.56. CL-PET-10-015 numunesi deney sonrası görüntüleri. 123

Şekil 6.57. CL-PET-10-015 numunesi sekant rijitliği grafiği. 124
Şekil 6.58. CL-PET-10-015 numunesi sekant rijitlik oranı grafiği. 125
Şekil 6.59. CL-PET-10-015 numunesi sönümlenen enerji grafiği. 126
Şekil 6.60. CL-PET-10-015 numunesi kümülatif sönümlenen enerji grafiği. 126
Şekil 6.61. CL-PET-10-030 yatay yük-yer değiştirme grafiği. 127
Şekil 6.62. CL-PET-10-030 zarf eğrisi. 127
Şekil 6.63. CL-PET-10-030 numunesi deney sonrası görüntüleri. 128
Şekil 6.64. CL-PET-10-030 numunesi sekant rijitliği grafiği. 129
Şekil 6.65. CL-PET-10-030 numunesi sekant rijitlik oranı grafiği. 130
Şekil 6.66. CL-PET-10-030 numunesi sönümlenen enerji grafiği. 131
Şekil 6.67. CL-PET-10-030 numunesi kümülatif sönümlenen enerji grafiği. 131
Şekil 6.68. CL-PET-CFRP-10-015 yatay yük-yer değiştirme grafiği. 132
Şekil 6.69. CL-PET-CFRP-10-015 zarf eğrisi. 132
Şekil 6.70. CL-PET-CFRP-10-015 numunesi deney sonrası görüntüleri. 133
Şekil 6.71. CL-PET-CFRP-10-015 numunesi sekant rijitliği grafiği. 134
Şekil 6.72. CL-PET-CFRP-10-015 numunesi sekant rijitlik oranı grafiği. 135
Şekil 6.73. CL-PET-CFRP-10-015 numunesi sönümlenen enerji grafiği. 136
Şekil 6.74. CL-PET-CFRP-10-015 numunesi kümülatif sönümlenen enerji grafiği. 136
Şekil 6.75. CL-PET-CFRP-10-030 yatay yük-yer değiştirme grafiği. 137
Şekil 6.76. CL-PET-CFRP-10-030 zarf eğrisi. 137
Şekil 6.77. CL-PET-CFRP-10-030 numunesi deney sonrası görüntüleri. 138
Şekil 6.78. CL-PET-CFRP-10-030 numunesi sekant rijitliği grafiği. 139
Şekil 6.79. CL-PET-CFRP-10-030 numunesi sekant rijitlik oranı grafiği. 140
Şekil 6.80. CL-PET-CFRP-10-030 numunesi sönümlenen enerji grafiği. 141
Şekil 6.81. CL-PET-CFRP-10-030 numunesi kümülatif sönümlenen enerji grafiği. 141
Şekil 6.82. CFRP sargı kullanılmayan silindir numunelerin grafikleri. 142
Şekil 6.83. CFRP sargı kullanılan silindir numunelerin grafikleri. 143
Şekil 6.84. Donatı çekme deneyi görüntüleri. 144
Şekil 6.85. Donatı çekme deneyi grafikleri. 144
Şekil 7.1. Tüm kolon numunelerinin zarf eğrileri. 147
Şekil 7.2. CL-R-0-015 ve CL-PET-10-015 zarf eğrisi karşılaştırması. 148
Şekil 7.3. CL-R-0-030 ve CL-PET-10-030 zarf eğrisi karşılaştırması. 149
Şekil 7.4. CL-CFRP-0-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 zarf eğrisi karşılaştırması. 150
Şekil 7.5. CL-CFRP-0-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 zarf eğrisi karşılaştırması. 151
Şekil 7.6. Maksimum yük değerlerine PET ikamesinin etkisi. 152
Şekil 7.7. Süneklik katsayısı değerlerine PET ikamesinin etkisi. 152
Şekil 7.8. CL-R-0-015 ve CL-CFRP-0-015 zarf eğrisi karşılaştırması. 153
Şekil 7.9. CL-R-0-030 ve CL-CFRP-0-030 zarf eğrisi karşılaştırması. 154
Şekil 7.10. CL-PET-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 zarf eğrisi karşılaştırması. 155
Şekil 7.11. CL-PET-10-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 zarf eğrisi karşılaştırması. 156
Şekil 7.12. Maksimum yük değerlerine karbon lifli polimer sargının etkisi. 157
Şekil 7.13. Süneklik katsayısı değerlerine karbon lifli polimer sargının etkisi. 157
Şekil 7.14. CL-R-0-015 ve CL-R-0-030 zarf eğrisi karşılaştırması. 158
Şekil 7.15. CL-CFRP-0-015 ve CL-CFRP-0-030 zarf eğrisi karşılaştırması. 159
Şekil 7.16. CL-PET-10-015 ve CL-PET-10-030 zarf eğrisi karşılaştırması. 160
Şekil 7.17. CL-PET-CFRP-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-030 zarf eğrisi karşılaştırması. 161
Şekil 7.18. Maksimum yük değerlerine eksenel yük düzeyinin etkisi. 162

Şekil 7.19. Süneklik katsayısı değerlerine eksenel yük düzeyinin etkisi..... 162
Şekil 7.20. Tüm kolon numunelerinin sekant rijitlikleri..... 163
Şekil 7.21. Akma rijitliği değerlerine PET ikamesinin etkisi..... 164
Şekil 7.22. Nihai rijitlik değerlerine PET ikamesinin etkisi..... 165
Şekil 7.23. Rijitlik katsayısı değerlerine PET ikamesinin etkisi..... 165
Şekil 7.24. CL-R-0-015 ve CL-PET-10-015 sekant rijitliği karşılaştırması..... 166
Şekil 7.25. CL-R-0-030 ve CL-PET-10-030 sekant rijitliği karşılaştırması..... 167
Şekil 7.26. CL-CFRP-0-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 sekant rijitliği karşılaştırması. 168
Şekil 7.27. CL-CFRP-0-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 sekant rijitliği karşılaştırması. 169
Şekil 7.28. Sekant rijitlik oranına PET ikamesinin etkisi..... 170
Şekil 7.29. Akma rijitliği değerlerine karbon lifli polimer sargının etkisi..... 172
Şekil 7.30. Nihai rijitlik değerlerine karbon lifli polimer sargının etkisi..... 172
Şekil 7.31. Rijitlik katsayısı değerlerine karbon lifli polimer sargının etkisi..... 173
Şekil 7.32. CL-R-0-015 ve CL-CFRP-0-015 sekant rijitliği karşılaştırması..... 173
Şekil 7.33. CL-R-0-030 ve CL-CFRP-0-030 sekant rijitliği karşılaştırması..... 174
Şekil 7.34. CL-PET-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 sekant rijitliği karşılaştırması. 175
Şekil 7.35. CL-PET-10-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 sekant rijitliği karşılaştırması. 176
Şekil 7.36. Sekant rijitlik oranına karbon lifli polimer sargının etkisi..... 178
Şekil 7.37. Akma rijitliği değerlerine eksenel yük düzeyinin etkisi..... 180
Şekil 7.38. Nihai rijitlik değerlerine eksenel yük düzeyinin etkisi..... 180
Şekil 7.39. Rijitlik katsayısı değerlerine eksenel yük düzeyinin etkisi..... 181
Şekil 7.40. CL-R-0-015 ve CL-R-0-030 sekant rijitliği karşılaştırması..... 181
Şekil 7.41. CL-CFRP-0-015 ve CL-CFRP-0-030 sekant rijitliği karşılaştırması..... 182
Şekil 7.42. CL-PET-10-015 ve CL-PET-10-030 sekant rijitliği karşılaştırması..... 183
Şekil 7.43. CL-PET-CFRP-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-030 sekant rijitliği karşılaştırması..... 184
Şekil 7.44. Sekant rijitlik oranına eksenel yük düzeyinin etkisi..... 186
Şekil 7.45. Tüm kolon numunelerinin sönümledikleri kümülatif enerji değerleri..... 187
Şekil 7.46. Kümülatif enerji değerlerine PET ikamesinin etkisi..... 188
Şekil 7.47. CL-R-0-015 ve CL-PET-10-015 sönümlenen enerji karşılaştırması..... 189
Şekil 7.48. CL-R-0-015 ve CL-PET-10-015 kümülatif enerji karşılaştırması..... 189
Şekil 7.49. CL-R-0-030 ve CL-PET-10-030 sönümlenen enerji karşılaştırması..... 190
Şekil 7.50. CL-R-0-030 ve CL-PET-10-030 kümülatif enerji karşılaştırması..... 191
Şekil 7.51. CL-CFRP-0-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 sönümlenen enerji karşılaştırması..... 192
Şekil 7.52. CL-CFRP-0-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 kümülatif enerji karşılaştırması..... 192
Şekil 7.53. CL-CFRP-0-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 sönümlenen enerji karşılaştırması..... 193
Şekil 7.54. CL-CFRP-0-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 kümülatif enerji karşılaştırması..... 194
Şekil 7.55. Kümülatif enerji değerlerine karbon lifli polimer sargının etkisi..... 195
Şekil 7.56. CL-R-0-015 ve CL-CFRP-0-015 sönümlenen enerji karşılaştırması..... 196
Şekil 7.57. CL-R-0-015 ve CL-CFRP-0-015 kümülatif enerji karşılaştırması..... 196
Şekil 7.58. CL-R-0-030 ve CL-CFRP-0-030 sönümlenen enerji karşılaştırması..... 197
Şekil 7.59. CL-R-0-030 ve CL-CFRP-0-030 kümülatif enerji karşılaştırması..... 198

Şekil 7.60. CL-PET-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 sönümlenen enerji karşılaştırması.....199
Şekil 7.61. CL-PET-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 kümülatif enerji karşılaştırması.....199
Şekil 7.62. CL-PET-10-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 sönümlenen enerji karşılaştırması.....200
Şekil 7.63. CL-PET-10-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 kümülatif enerji karşılaştırması.....201
Şekil 7.64. Kümülatif enerji değerlerine eksenel yük düzeyinin etkisi. 202
Şekil 7.65. CL-R-0-015 ve CL-R-0-030 sönümlenen enerji karşılaştırması. 203
Şekil 7.66. CL-R-0-015 ve CL-R-0-030 kümülatif enerji karşılaştırması. 203
Şekil 7.67. CL-CFRP-0-015 ve CL-CFRP-0-030 sönümlenen enerji karşılaştırması. 204
Şekil 7.68. CL-CFRP-0-015 ve CL-CFRP-0-030 kümülatif enerji karşılaştırması. 205
Şekil 7.69. CL-PET-10-015 ve CL-PET-10-030 sönümlenen enerji karşılaştırması. 206
Şekil 7.70. CL-PET-10-015 ve CL-PET-10-030 kümülatif enerji karşılaştırması. . 206
Şekil 7.71. CL-PET-CFRP-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-030 sönümlenen enerji karşılaştırması.....207
Şekil 7.72. CL-PET-CFRP-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-030 kümülatif enerji karşılaştırması.....208
Şekil 7.73. Değişken açılı kafes-kemer modeli: (a) betonarme kolonun konfigürasyonu, (b) değişken açılı çatlak deseni, (c) değişken açılı kafesin diferansiyel elemanı, (d) ankastre-ankastre uçlu kolonlar için kemer modeli, (e) ankastre-sabit uçlu kolonlar için kemer modeli (Yu ve ark, 2019). ..209
Şekil 7.74. Tüm kolon numunelerin maksimum kesme kuvvetleri ve modellerin tahminleri. 216
Şekil 7.75. Tüm kolon numuneleri için kesme dayanımı modellerinin performansı. 217
Şekil 7.76. PET ikamesi yapılmayan kolon numunelerin maksimum kesme kuvvetleri ve modellerin tahminleri. 218
Şekil 7.77. PET ikamesi yapılmayan kolon numuneleri için kesme dayanımı modellerinin performansı. 219
Şekil 7.78. PET ikamesi yapılan kolon numunelerin maksimum kesme kuvvetleri ve modellerin tahminleri. 220
Şekil 7.79. PET ikamesi yapılan kolon numuneleri için kesme dayanımı modellerinin performansı.....221
Şekil 7.80. Karbon lifli polimer sargı kullanılmayan kolon numunelerin maksimum kesme kuvvetleri ve modellerin tahminleri. 222
Şekil 7.81. Karbon lifli polimer sargı kullanılmayan kolon numuneleri için kesme dayanımı modellerinin performansı. 223
Şekil 7.82. Karbon lifli polimer sargı kullanılan kolon numunelerin maksimum kesme kuvvetleri ve modellerin tahminleri. 224
Şekil 7.83. Karbon lifli polimer sargı kullanılan kolon numuneleri için kesme dayanımı modellerinin performansı. 225
Şekil 7.84. Eksenel kuvvet oranı 0.15 olan kolon numunelerin maksimum kesme kuvvetleri ve modellerin tahminleri. 226
Şekil 7.85. Eksenel kuvvet oranı 0.15 olan kolon numuneleri için kesme dayanımı modellerinin performansı. 227

Şekil 7.86. Eksenel kuvvet oranı 0.30 olan kolon numunelerin maksimum kesme kuvvetleri ve modellerin tahminleri. 228
Şekil 7.87. Eksenel kuvvet oranı 0.30 olan kolon numuneleri için kesme dayanımı modellerinin performansı. 229

ATIK PLASTİK İKAMESİNİN VE CFRP SARGININ BETONARME KOLONLARIN TEKRARLI YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞINA ETKİSİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında PET atıkların geri dönüşümü yapılarak beton içerisinde ince agrega yerine ikame edilmesinin betonun çeşitli mekanik özellikleri üzerine etkileri ve betonarme kolonların betonunda PET ikamesi bulunmasının tekrarlı yükler altındaki davranışına olan etkileri incelenmiştir. Bununla birlikte karbon ve cam lifli polimerler kullanılarak sargılamanın etkileri test edilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında betonun içerisindeki kumun hacimce %10, %20 ve %30'u PET granül malzeme ile ikame edilmiştir. İkame yapılmamış referans beton ve PET ikamesi yapılmış beton numuneler üzerinde çökme, yoğunluk, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda PET ikamesinin betonun çökme, yoğunluk, elastisite modülü, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı değerlerini belirli oranlarda düşürdüğü görülmüştür. Bu sebeple çalışmanın ikinci aşamasında en iyi sonuçları veren ikame yüzdesine sahip olan %10 PET ikameli beton karbon ve cam lifli polimer ile sarılarak güçlendirilmiş ve aynı deneyler tekrarlanmıştır. Sargılama işlemi sonucunda PET ikamesinden dolayı oluşan zararın fazlasıyla telafi edilebildiği görülmüştür. Bununla birlikte bu çalışmada betonda ince agrega yerine hacimce veya ağırlıkça PET ikamesinin yapıldığı çalışmaların deneysel verileri bir araya getirilmiş ve kapsamlı bir veri tabanı sunulmuştur. Çalışmada yapılan deneylerin ve literatürde yer alan verilerin sonuçları göz önüne alınarak PET ikameli beton için model önerilerinde bulunulmuştur. Çalışmanın önerdiği modeller daha önce önerilmiş modellerle birlikte uygulanabilirlik kontrolüne girmişlerdir. Benzer şekilde literatürde sargılı beton için yer alan model önerileri çalışmadaki deneysel veriler ile test edilmiş ve PET ikameli betona uygunluğu tartışılmıştır. Çalışmanın üçüncü aşamasında PET ikamesi yapı malzemesi boyutundan yapı elemanı boyutuna taşınmış ve PET ikameli betondan üretilen betonarme kolonlar oluşturulmuştur. Kolonlar birbirlerinden PET ikamesinin varlığına, karbon lifli polimer kullanımına ve eksenel yük düzeylerine göre ayrıştırılmıştır. Oluşturulan kolonlar yatay tekrarlı yükler altında test edilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen yatay yük-yer değiştirme eğrileri analiz edilmiştir. Betonarme kolonların taşıdıkları maksimum yatay yükler, süneklik katsayıları, rijitlik değerleri, sönümledikleri enerji değerleri belirlenmiştir. Betonarme kolonların betonunda %10 PET ikamesinin yapılması, yatay tekrarlı yükler altında kolonların maksimum yatay yükleri, rijitlik ve sönümleme enerjilerinde hafif olumsuz değişikliklere yol açsa da genel davranışları benzerlik göstermiştir. Eksenel yük düzeyinin artması, kolonların maksimum yatay yükleri ve rijitlik değerlerinde artış sağlamış olsa da süneklik ve sönümlenen enerji değerlerinde ciddi azalmalara neden olmuştur. Karbon lifli polimer sargı kullanımı ise kolonların maksimum yatay yükleri, süneklik, rijitlik ve sönümlenen enerji değerlerinde artışa yol açarak kolonların deprem benzeri tekrarlı yükler altındaki davranışını önemli ölçüde iyileştirmiştir.

THE EFFECT OF WASTE PLASTIC REPLACEMENT AND CFRP WRAPPING ON THE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS UNDER CYCLIC LOADING

SUMMARY

This thesis examines the effects of substituting PET wastes for fine aggregate in concrete on various mechanical properties of concrete, as well as the impact of the presence of PET replacement in reinforced concrete columns under cyclic loading. Additionally, the effects of wrapping using carbon and glass fiber polymers have been tested.

Solid waste has emerged as one of the most pressing environmental challenges of our time, primarily due to its increasing volume and improper disposal methods. Among various types of waste, plastic stands out as a particularly problematic material. Its widespread use across industries and households, combined with its non-biodegradable nature, has resulted in a rapid accumulation of plastic waste in landfills, oceans, and urban environments. This proliferation of plastic waste not only degrades ecosystems but also poses serious threats to wildlife and human health.

In recent years, the urgency of effective waste management strategies has intensified. One of the most viable and sustainable approaches to addressing the plastic waste crisis is through recycling and reusing plastic materials. By diverting plastic waste from landfills and repurposing it for new applications, we can significantly reduce environmental pollution and conserve natural resources.

A promising innovation in this regard is the incorporation of plastic waste into concrete. Utilizing plastic as a partial replacement for traditional aggregates or as reinforcement in concrete not only offers a cost-effective solution for the construction industry but also serves as an environmentally responsible method of waste disposal. This practice reduces the demand for virgin materials, lowers carbon emissions associated with concrete production, and helps to manage plastic waste in a sustainable manner.

Developing and adopting such sustainable solutions is essential in mitigating the adverse environmental impacts of plastic waste. Through research, innovation, and policy support, plastic waste can be transformed from an environmental liability into a valuable resource, contributing to a more sustainable and circular economy.

In recent years, researchers have focused on the use of recycled plastics in concrete. Incorporating plastic waste into concrete mixtures offers a range of environmental and economic benefits, primarily by diverting plastic materials from landfills and reducing the reliance on natural aggregates, which are finite and often energy-intensive to extract.

One of the key advantages of using recycled plastics in concrete is the potential improvement in certain material properties. Depending on the type and proportion of plastic used, concrete mixtures can exhibit enhanced characteristics such as reduced

density, increased ductility, improved thermal insulation, and better resistance to chemical attacks. These modifications can be particularly beneficial in specific applications, such as lightweight concrete for non-load-bearing structures, insulation layers, or construction in seismic zones where ductility and energy absorption are crucial.

The use of recycled plastic aggregates also contributes to a significant reduction in the environmental footprint of the construction industry. By minimizing the extraction and processing of natural aggregates, this practice reduces greenhouse gas emissions and conserves valuable natural resources. Additionally, it promotes circular economy principles by reintroducing waste materials into the production cycle, thus improving overall resource efficiency.

Among the various types of plastics suitable for incorporation into concrete, polyethylene terephthalate (PET) stands out due to its widespread availability, high recycling potential, and favorable physical properties. PET, commonly found in beverage bottles and packaging materials, can be processed into granules, flakes or fibers and used as partial replacements for traditional aggregates or reinforcement in concrete. Its use not only enhances sustainability but also offers a cost-effective alternative to conventional materials, potentially lowering construction costs without compromising performance.

Overall, the integration of recycled plastics into concrete technology represents a promising advancement in sustainable construction. This innovative approach not only contributes to reducing environmental pollution and alleviating the burden on landfills but also aligns with the global movement toward greener, more cost-efficient building practices.

Studies on replacing PET waste in concrete have generally focused on cube or cylinder samples. While these initial investigations provide valuable insight, they do not fully capture the performance of PET-based concrete in structural elements subjected to real-world loading conditions. In modern construction, reinforced concrete (RC) structures are widely used due to their strength, versatility, and durability. Therefore, it is essential to investigate the compatibility of PET-modified concrete with steel reinforcement, particularly in structural members that play a key role in ensuring the integrity of buildings, such as columns.

The application of PET waste in reinforced concrete elements introduces new variables that could influence the interaction between concrete and steel reinforcement. Specifically, the behavior of reinforced concrete columns incorporating PET waste under axial, lateral, and seismic loads may differ from that of conventional concrete columns. As columns are critical load-bearing elements in any structural system—especially during seismic events—their performance under earthquake loading is of paramount importance. Inadequate reinforcement detailing, combined with low ductility in the concrete matrix, can lead to severe damage or collapse during seismic activity.

To address these vulnerabilities, numerous studies have explored various strengthening techniques aimed at enhancing the seismic performance of RC columns. Among these, the use of Fiber Reinforced Polymer (FRP) systems has gained significant attention in both research and practical applications. FRP materials, known for their high strength-to-weight ratio, corrosion resistance, and ease of installation, offer a promising alternative to traditional retrofitting methods. When applied as external confinement through wrapping, FRP restricts the lateral expansion of the

concrete core under load, thereby increasing confinement pressure. This confinement not only improves the compressive strength and ductility of the column but also enhances its energy dissipation capacity during seismic events.

The integration of FRP systems in retrofitting strategies has been shown to significantly improve both the strength and deformation capacity of RC columns, making them more resilient to earthquake-induced forces. As the construction industry continues to seek sustainable and resilient solutions, the combined use of recycled PET waste in concrete and advanced strengthening systems such as FRP presents a unique opportunity. This approach not only promotes environmental sustainability by reducing plastic waste but also contributes to the development of earthquake-resistant structures with improved long-term performance.

In the first phase of the study, 10%, 20%, and 30% of the sand by volume in the concrete was replaced with PET granule material. Experiments were conducted on both the reference concrete without any replacement and the concrete samples with PET replacement, including slump, density, compressive strength, splitting tensile strength, and flexural strength tests. The results of the experiments showed that the PET replacement reduced the values of slump, density, elasticity modulus, compressive strength, splitting tensile strength, and flexural strength of the concrete by certain percentages.

It is considered that the decrease in slump values due to the increase in the PET replacement ratio in concrete may pose a disadvantage for the workability of fresh concrete. However, it has been concluded that this reduction in density could contribute to reducing the weight of the structure or achieving lightweight concrete when the concrete is used structurally.

The PET replacement in concrete has decreased the modulus of elasticity, compressive strength, split tensile strength, and flexural strength, while increasing the ultimate strain values. Therefore, it has been concluded that PET replacement can be used in situations where displacement demand is required, but it is not suitable for increasing strength.

In the second phase of the study, the concrete with 10% PET replacement, which yielded the best results, was strengthened by wrapping with carbon and glass fiber polymers, and the same tests were repeated. As a result of the wrapping process, the damage caused by the PET replacement was significantly compensated.

In the concrete material tests, the reduction in compressive, split tensile, and flexural strengths due to PET replacement was compensated for by using FRP, even surpassing the reference strength. Thus, it has been observed that using PET as a fine aggregate replacement within the concrete and FRP as a wrapping material outside the concrete is a beneficial method for obtaining concrete that is both lighter and stronger.

Furthermore, this study has compiled experimental data from studies where PET replacement was made by volume or weight in place of fine aggregates in concrete, providing a comprehensive database. Based on the results of the experiments conducted in this study and the data in the literature, model suggestions for PET-replaced concrete have been proposed. The models suggested in this study were subjected to applicability tests alongside previously proposed models. Similarly, the model suggestions for wrapped concrete in the literature were tested with the experimental data from this study, and their suitability for PET-replaced concrete was discussed.

In the third phase of the study, the PET replacement was scaled up from the material size to the structural element size, and reinforced concrete columns were produced from PET-replaced concrete. The columns were categorized based on the presence of PET replacement, the use of carbon fiber polymer, and axial load levels. The created columns were tested under horizontal cyclic loading. The horizontal load-displacement curves obtained from the experiments were analyzed. The maximum horizontal loads carried by the reinforced concrete columns, their ductility coefficients, stiffness values, and the energy they dissipated were determined.

When 10% PET replacement was used in the concrete of reinforced concrete columns tested under earthquake-like horizontal cyclic loads, a slight negative trend was observed in the maximum horizontal loads, stiffness values, and energy dissipation. However, their overall behavior remained similar.

An increase in the axial load level of the reinforced concrete columns tested under horizontal cyclic loads led to an increase in the maximum horizontal loads and stiffness values, but it caused significant decreases in ductility and dissipated energy values. This limited the displacement capacity of the columns and led to a more brittle behavior.

The use of carbon fiber polymer wrapping around the reinforced concrete columns resulted in increases in the maximum horizontal loads, ductility coefficients, stiffness values, and energy dissipation, providing positive results in all aspects. While the carbon fiber polymer wrapping caused slight increases in the maximum horizontal loads and stiffness values, it significantly enhanced the columns' behavior under earthquake-like cyclic loading by providing substantial increases in ductility and energy dissipation values.

1. GİRİŞ

Katı atık, çevreyi olumsuz etkileyen en önemli faktörlerden biridir (Almeshal ve ark, 2020). Üretim süreçlerinden, hizmet endüstrilerinden ve belediye atıklarından çok sayıda katı atık üretilir. İnsanların çevre konusundaki farkındalığının artmasıyla birlikte, oluşan atıkların bertarafı ile ilgili endişeler de artmıştır. Katı atık yönetimi, dünya genelinde giderek önem kazanmıştır (Siddique ve ark, 2008). Bu hususta sorunlar, atık geri dönüşümünün zorluğu ve sınırlı yeniden kullanımı gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır (Almeshal ve ark, 2020). Düzenli depolama için yeterli yerlerin kıtlığı ve sürekli artan maliyeti nedeniyle, atıkların tekrar kullanımı bertaraf için çekici bir alternatif haline gelmiştir. Hacimli atıkların yeniden kullanımı, bertaraf sorununu çözmek için en iyi çevresel alternatif olarak kabul edilmektedir. Atık ürünlerin betonda kullanılması betonu ekonomik hale getirmekle beraber, bertaraf problemlerinin çözümüne yardımcı olur. Böyle bir atık, çeşitli uygulamalarda kullanılabilen plastiktir (Siddique ve ark, 2008).

Plastik, güçlü bir çevresel etkiye sahip önemli bir katı atık türüdür (Almeshal ve ark, 2020). Plastikler ucuz, hafif, çok yönlü ve kolay erişilebilir malzemelerdir. Plastiğin kullanımı son 50 yılda katlanarak artmış ve günlük hayatımızın gerekli bir yönü haline gelmiştir (Almohana ve ark, 2022). Plastik malzemelerin sürekli olarak üretimi ve atık haline dönüşmesi çevre kirliliği üzerinde ciddi bir etkiye neden olmaktadır (Jain ve ark, 2021). Polietilen tereftalat (PET) şişeler ve kutular gibi plastik atıklar çoğunlukla tek kullanım döngüsünden sonra atılır ve bu da çevre ve atık yönetimi için ciddi endişeler yaratır (Saxena ve ark, 2018). Tüketilen her tür plastik, atık haline gelir. Birkaç ton plastik atık bir kerede tam olarak geri dönüştürülemediğinden, depolama için geniş alanlar gerekir (Sharma ve Bansal, 2016). Plastik atık, bozunmama ve düşük biyobozunurluk nedeniyle dünyadaki en önemli atık malzeme türlerinden biridir (Bahij ve ark, 2020). Plastiklerin biyolojik olarak parçalanamayan karakteri, dünya çapındaki bilim adamlarını ve çevrecileri endişelendirmektedir (Basha ve ark, 2020).

21. yüzyıl, farklı sektörlerin çok büyük miktarlarda plastik ürettiği ve tükettiği bir "plastik çağ" olarak nitelendirilebilir. Buna paralel olarak plastik atık üretim hızı da

artmakta ve halk sağlığı ve ekosistem üzerinde ciddi sorunlara neden olmaktadır (Adela ve ark, 2020). Plastik nehirleri, karaları ve okyanusları kirlettiğinden, atık plastiğin bolluğu çevrenin sürdürülebilirliği için önemli bir sorundur (Babafemi ve ark, 2018). Plastik atıkların bertarafı için güvenli ve çevre dostu bir çözüm bulmak için çeşitli araştırmalar yapılmıştır (Bahij ve ark, 2020). Çevreyi baltalamaya yol açan plastikle ilgili atık oluşumundaki artış, araştırmacıları plastik atığı beton üretiminde sürdürülebilir bir malzeme olarak kullanmaya teşvik etmiştir (Almohana ve ark, 2022).

1.1. PET Atıklar ve Beton

Araştırmacılar son zamanlarda ekolojik olarak kabul edilebilir bir yapı malzemesi olarak betonda geri dönüştürülebilir plastiklerin kullanılmasıyla ilgilenmişlerdir (Ahmad ve ark, 2022). Çevre sorunlarını ortadan kaldırmak veya azaltmak için uzun hizmet ömrü ve daha düşük ağırlığı nedeniyle farklı plastik türleri beton karışımlarına dahil edilmektedir (Bahij ve ark, 2020). Plastik atıkların geri dönüştürülerek beton veya harç gibi malzemelerde kullanılması, ekonomik ve ekolojik avantajları nedeniyle plastik atıkların bertaraf edilmesi için en iyi çözümlerden biri olarak görünmektedir (Saikia ve De Brito, 2012). Plastiğin çok yönlü davranışı (hafif, esnek, güçlü, neme dayanıklı ve ucuz), ona beton gibi birçok mevcut kompozit malzemenin içerisinde kullanılma veya alternatifi olma özelliği kazandırmıştır (Babafemi ve ark, 2018). Beton karışımındaki atık ve geri dönüştürülmüş plastik malzemelerin çevre dostu bir yapı malzemesi olarak yeniden kullanılması son zamanlarda araştırmacıların dikkatini çekmiş ve atık içeren beton ve geri dönüştürülmüş plastik malzemelerin davranışını bildiren çok sayıda çalışma yayınlanmıştır (Gu ve Ozbakkaloglu, 2016). Betonun daha uzun bir hizmet ömrüne sahip olması nedeniyle plastiklerin çevre ile doğrudan temasını önlemek için betona çeşitli plastik formları dahil edilmiştir (Sharma ve Bansal, 2016).

Plastik atıkların yapı malzemelerinin üretiminde agrega olarak yeniden kullanılması, çevrenin korunmasına ve sürdürülebilir kalkınmanın sağlanmasına katkı verebilecek bir hadisedir (Belmokaddem ve ark, 2020). Son yıllarda, alternatif bir agrega malzemesi olarak geri dönüştürülmüş plastik agrega kullanımının hem betonun hem de plastik atıkların çevresel etkisini azalttığı düşünülmektedir. Geri dönüştürülmüş plastik agregalı beton, artık inşaat sektöründe kaynak verimliliğine katkıda bulunabilecek oldukça umut verici bir teknoloji olarak biliniyor (Hameed ve Ahmed,

2019). Doğal agregaların kısmen veya tamamen ikamesi olarak betonda geri dönüştürülmüş plastiğin kullanılmasının, güvenli bir şekilde bertaraf edilmesiyle ilgili endişeleri çözebileceği ve doğal agrega kaynaklarını koruyabileceği düşünülmektedir (Basha ve ark, 2020).

Geri dönüştürülmüş plastikler kullanılarak yeni inşaat malzemelerinin geliştirilmesi hem inşaat hem de plastik geri dönüşüm endüstrileri için önemlidir (Siddique ve ark, 2008). Plastik atıkların inşaat ürünlerinde kullanılması çevre kirliliğini azaltırken inşaat ve bertaraf maliyetlerini de en aza indirir (Jain ve ark, 2021).

Polietilen tereftalat (PET), dünyadaki plastikler arasında büyük öneme sahip olan bir polimerdir. Termoplastik geri dönüştürülebilirliği onu çeşitli uygulamalar için ilk tercih haline getirmektedir (Raheem ve ark, 2019). Polyester bir plastik olan polietilen tereftalat (PET), içeceklerde en yaygın kullanılan ambalaj malzemelerinden biridir. Mükemmel şeffaflığı, hafifliği, gaz ve su bariyeri özellikleri, darbe dayanımı, UV direnci ve kırılmazlığı (cam şişeye kıyasla) nedeniyle, içecek ambalajı için PET şişelerin üretimi ve kullanımı dünya çapında sürekli olarak arttı (Benyathiar ve ark, 2022). Üretim ve kullanımdaki bu artışla birlikte PET için geri dönüşüm çözümleri üretilmeye başlandı. PET, günümüzde geri dönüşüm oranı en yüksek olan plastik türü olarak görülmektedir. (Burrows ve ark, 2022; Kawecki ve ark, 2021; Merrington, 2017; Rahimi & García, 2017).

1.2. Betonarme Kolonlarda Sismik Yükleme ve Güçlendirme

Betonun içerisinde PET atıkların ikamesine dayanan çalışmaların genellikle küp numuneler veya silindir numuneler üzerine yoğunlaştığı görülmüştür. Günümüzde betonarme yapıların yaygınlığı göz önüne alındığında PET atıkların ikamesi ile oluşturulan betonun, donatı ile uyumu önem arz etmektedir. Bu nedenle PET atıkların donatılı beton üzerindeki etkisi sorgulanmalıdır. PET atık ilaveli betonun klasik basınç dayanımı testleri, yarmada çekme dayanımı testleri ve çeşitli malzeme testlerinin yanı sıra betonarme yapı elemanlarının yapısal davranışlarına nasıl etki edeceğini araştıran testlerin de yapılması gerekmektedir.

Ana düşey elemanlar olarak kolonlar, binaların sismik performansı için kritik unsurlardır (Wang ve ark, 2018). Betonarme kolonlar hem yerçekimi hem de yanal yükleri taşıyarak betonarme yapıların deprem direncinde çekirdek rol oynayan en önemli elemanlardır (Dai ve ark, 2021). Binaların, köprülerin ve yer altı yapılarının

başta gelen düşey ve yanal yük taşıyıcı elemanları olan betonarme kolonlar, kullanılabilirlik ve depremin hafifletilmesinde en etkili yapı elamanlarıdır (Ma ve Gong, 2018). Deprem vakalarının çoğunda, betonarme binaların göçmesi esas olarak kolonların göçmesinden kaynaklanır (Wang ve ark, 2018). Çok yönlü deprem hareketleri göz önüne alındığında, betonarme yapıların kilit taşı olan kolonlar, özellikle bir çerçeve yapısının veya köprü ayağının köşe ve yan kolonları, eksenel kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momentleri ve burulma momentlerinin bir kombinasyonuna maruz kalırlar (Huang ve ark, 2019). Bu nedenle, betonarme kolonların sismik performansı üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Betonarme kolonların en yaygın göçme veya ciddi hasar nedenlerinin enine donatı ve süneklik eksikliği, yetersiz kesme veya eğilme kapasitesi ve güçlü kiriş zayıf kolon mekanizması olduğu bulunmuştur (Wang ve ark, 2018). Deprem sırasında kolonların yıkılması, tüm yapının ciddi şekilde hasar görmesine, hatta çökmesine neden olabilmekte, can kayıplarına ve önemli ekonomik kayıplara yol açabilmektedir (Huang ve ark, 2019).

Betonarme kolonlar, eğilme, kesme veya eğilme-kesme göçme modlarında yenilirler. Bu üç yenilme modunun davranışları farklıdır, dolayısıyla sismik performansları da farklıdır. Spesifik olarak, kesme kırılması, kolonun boyuna donatıların akmasından sonra enerji dağılımı yoluyla genel yapıyı desteklemeye devam edemediği ve sonunda tüm yapının çökmesine yol açan kırılgan bir şekilde meydana gelir. Bu nedenle, sismik tasarımda kesme yenilmesinden kaçınılmalı ve sünekliği eğilme yenilmesinden daha kötü olduğu için eğilme-kesme yenilmesi kontrol altında tutulmalıdır. Bir kolonun sünekliğini sağlamak için, eksenel yük oranı genellikle sınırlıdır, bu da daha büyük bir enine kesite yol açar. Ayrıca yapıların yükseklik sınırlaması ve geniş kesit alanı nedeniyle kesme kırılması veya eğilme-kesme kırılması meydana gelmesi muhtemeldir (Ma ve Gong, 2018).

Mevcut betonarme yapılar, büyük bir deprem durumunda genellikle hasara veya çökmeye karşı savunmasızdır ve deprem eylemleri ve sismik tasarım hakkındaki bilgiler geliştikçe, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) gibi yeni tasarım kodları ve bina standartları ortaya çıkmaktadır. Bu revize edilmiş kodların ve yönergelerin uygulanmasının sonucunda, genellikle, yapının tasarlandığı ve inşa edildiği dönemin tasarım koduna göre doğru bir şekilde tasarlanmış olsa bile, mevcut yapının değerlendirilen kapasitesinin deprem yüküne yeterince direnmek için yetersiz

olduğu belirlenir. Yeni geliştirilen yönetmelikler ve standartlar tarafından belirlenen kriterleri karşılamak üzere mevcut binaların sismik kapasitesini artırmak için farklı yaklaşımlar mevcuttur. Yeni sismik gereklilik, örneğin mevcut binanın içine veya çevresine yeni perde duvarların dahil edilmesi ile genel yapı performansının artırılması sonucunda karşılanabilir. Çeşitli diğer yaklaşımlar, yapıya dahil edilen ardgerme çubukları ile mevcut yapısal elemanların sismik kapasitesini arttırmak, kolonları çelik çaprazlarla kaplamak veya ek bir betonarme sargı ile kolonun enine kesitini arttırmak olabilir (Del Rey Castillo ve ark, 2018).

Deprem yüklerini sürdürebilmek adına yapıların genel güvenliği için betonarme elemanların elastik olmayan şekil değiştirebilirliği esastır. Betonarme kesitlerin istenen deforme olabilirliği, genellikle betonun enine donatı yoluyla uygun şekilde hapsedilmesiyle elde edilir (Rajput ve Sharma, 2018). Açıkçası, betonarme kolonların özelliklerini iyileştirmek için çekirdek beton üzerinde daha güçlü bir sınırlama sağlayabilecek yakın aralıklı enine etriyelerin yerleştirilmesi çok etkili bir yöntemdir. Ancak çok yoğun etriyeler hem çelik donatı malzemesini hem de imalat masraflarını artırmasının yanında inşaatlarda iş gücü zorluklarına neden olacaktır (Xu ve ark, 2017).

Mevcut betonarme yapılarını güçlendirmek için giderek daha fazla kullanılan bir teknik, Fiber Takviyeli Polimer (FRP) sistemlerinin kullanılmasıdır. FRP sistemlerinin ana avantajı, FRP malzemelerinin düşük kütle ve yüksek çekme kapasitesi özelliği ile uygun şekilde kurulduğunda daha fazla dayanıklılık sağlayabilmesidir. FRP levhalar, betonarme yapı elemanının dış yüzeyine yapıştırılan kompozit bir matris oluşturmak için epoksi reçineleri ile doyurulur (Del Rey Castillo ve ark, 2018). FRP'ler, aşındırıcı olmayan özellikleri ve ultra yüksek mukavemet/ağırlık oranları nedeniyle yeni yapıların inşasında ve eski yapıların rehabilitasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır (Yuan ve ark, 2019).

Eski tasarım yönetmeliğine göre tasarlanan yapıların kesme kapasitelerinin güçlendirilmesi gerekmekte ve nispeten yüksek kesme kapasitesine sahip yapılarda, büyük sismik hareketlere dayanmak için sünekliğin arttırılması gerekmektedir. Betonarme kolonların fiber malzeme mantolaması ile güçlendirilmesinin bu iki talebi verimli bir şekilde karşılayabildiği kanıtlanmıştır. Güçlendirme şemasında fiber malzemenin kullanımı, fiberin çeliğe kıyasla avantajları nedeniyle birçok durumda çeliğe tercih edilir. Elyafın yüksek mukavemet-ağırlık oranı, korozyona karşı direnci

ve kolay taşıma ve montajı, elyaf takviyeli polimer (FRP) ceketleri güçlendirme için tercih edilen malzeme haline getirir (Anggawidjaja ve ark, 2006).

FRP kompozitlerin dış yüzeye yapıştırılması, istenen performans seviyelerine ulaşmanın güvenilir bir yolu olarak kabul edilir, çünkü beton lineer olmayan bir şekilde genişlediğinde kararsız çatlak ilerlemesi etkin bir şekilde kontrol edilir. Bir beton çekirdeğin iç durumu ve bir sınırlama malzemesinin kararsız genleşmeyi sınırlamadaki etkinliği, beton çekirdeğin Poisson oranı, genleşme hızı ve hacimsel gerinim gibi genleşme özellikleri dikkate alınarak daha iyi incelenebilir. Kuşatılmış betonun Poisson oranı, harici FRP sınırlamasından önemli ölçüde etkilenir. Neredeyse kuşatılmamış dayanıma ulaştıktan sonra, iç mikro çatlakların oluşmasıyla şiddetli bir şekilde artar ve hemen bir tepe değerine ulaşır. Bu istikrarsızlık daha sonra FRP etkili sınırlaması arttıkça geri kazanılır, bu da onu sabit bir düşük değere geri getirir (Pimanmas ve Saleem, 2018). Sonuç olarak, FRP sargısı beton çekirdeğe içe doğru basınç uygular, bu da sonunda hapsetme mekanizmasını etkinleştirir ve beton çekirdeğin dengesiz yanal genleşmesini kısıtlar (Saleem ve ark, 2018).

Mevcut birçok betonarme kolon, eski uygulama kurallarına göre tasarlandıkları için sismik yüklemenin mukavemet ve süneklik taleplerini karşılayamamaktadır. Yeterli enine donatının ve uygun sismik detaylandırmanın bulunmaması nedeniyle, bu standart altı betonarme kolonlar, büyük bir deprem sırasında sünek olmayan kesme kırılmasıyla, plastik mafsal bölgesinin sınırlama hatasıyla ve boyuna donatının bindirme ek yeri ayrılmasıyla karşılaşabilir. Sonuç olarak, modern depreme dayanıklılık düzenlemelerinin gerekliliklerini karşılamak için büyük mukavemet ve süneklik iyileştirmelerine ihtiyaç duyarlar. Son yıllarda FRP kompozitlerin dış sargı olarak kullanılması, FRP kompozitlerin yüksek dayanım-ağırlık oranı, korozif olmaması ve yapım kolaylığı nedeniyle mevcut betonarme yapıların güçlendirilmesi için çok etkili bir çözüm haline gelmiştir. En umut verici uygulamalardan biri, FRP kompozitlerini, betonarme kolonların sismik güçlendirmesi için ana liflerin etriye yönünde ilerlediği bir kılıf malzemesi olarak kullanmaktır. FRP ceketler, ek kesme kapasitesinin yanı sıra betona önemli ölçüde yanal sınırlama sağladığından, betonarme kolonların sismik direnci önemli ölçüde iyileştirilebilir. Geleneksel FRP'ler olarak sınıflandırılan karbon FRP (CFRP), cam FRP (GFRP) ve aramid FRP (AFRP), sismik güçlendirme uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadırlar (Dai ve Bai, 2014).

Son yıllarda, etriye yönünde harici olarak bağlanmış fiber takviyeli polimer (FRP) kompozitlerin kullanımının, betonarme kolonların sismik performansını iyileştirmek için etkili bir güçlendirme yöntemi olduğu bulunmuştur (Wang ve ark, 2018). Dünya çapındaki farklı standartlar, betonarme elemanlarının plastik mafsal bölgelerinde bu özel sınırlandırıcı takviyeyi tasarlamak için yönergeler ve stratejiler sağlamıştır. Geçmişte farklı yükleme rejimleri altında enine kuşatma donatısının çeşitli anahtar parametreleri çalışılmıştır. Bu yükleme rejimleri, yerçekimi yüklerini ve yanal yükleri simüle eden monoton ve sismik yüklemeleri içermektedir (Rajput ve Sharma, 2018).

1.3. Tezin Amacı ve Özgün Değeri

Depreme dayanıklı yapı tasarımı gereğince betonarme yapılar deprem gibi güçlü bir sismik yükleme etkisi altında taşıyıcı elemanlarında belirgin çatlaklar oluşup ağır hasarlar alsa bile yıkılmayacak şekilde tasarlanırlar. Ülke genelinde, yürürlükteki deprem yönetmeliği şartlarını taşımayan betonarme yapıların çokluğu dikkat çekmektedir. Projesi yönetmelik şartlarını sağlayacak şekilde hazırlanmış olsa dahi, betonarme yapılar, üretimi esnasında yapılan çeşitli uygulama hataları nedeniyle güçlü bir depremde göçmeye meyillidirler. Yönetmeliğin gerekli değerlerini sağlayamayan betonarme yapı elemanları, durağan halde üzerlerindeki yükleri taşısa da deprem esnasında görevlerini yapamamaktadırlar. Yapıların taşıyıcı elemanlarında ani şekilde oluşan gevrek kırılmaların ve göçmelerin önlenebilmesi için yeterli sünekliğe ve yer değişikliği yapabilme yeteneğine sahip yapı elemanlarına ihtiyaç vardır.

Yapıların sünek davranışını oluşturabilmek için yönetmelik gereğince kolon elemanlar, kiriş elemanlardan güçlü olacak şekilde tasarlanır. Depremin etkisiyle birlikte alınacak hasarların kolonlardan önce kirişlerde alınması sonucunda enerjinin belirli oranlarda tüketilmesi ve yapının taşıyıcılığını devam ettirebilmesi istenir. Bu şekilde göçme mekanizmalarında oluşacak istenmeyen durumların önüne geçilmektedir. Özellikle kolon elemanlar betonarme yapıların depreme karşı dayanıklılığında önemli bir konuma sahiptir. Yapılması planlanan veya inşası tamamlanmış yapılarda kolon elemanların depreme karşı dayanıklı hale getirilmesi önem arz etmektedir. Kolon elemanlarda yapılacak düzenlemelerle betonarme yapılar depreme karşı daha dirençli hale getirebilmektedir.

Son yıllarda dünya genelinde PET malzemelerin üretimi, kullanımı ve tüketimi giderek artmıştır. Buna paralel olarak PET atık miktarı da sürekli olarak artmaktadır.

Bu durum insan ve çevre sağlığı üzerinde hayati problemlere sebebiyet vermektedir. PET'le ilgili atık oluşumundaki artış ve betonarme yapıların depreme karşı dayanıksızlığı göz önüne alındığında, plastiğin inşaat sektörüne entegre edilmesi hem insan hem de çevre sağlığı için umut verici bir çözüm olarak görülmektedir.

Bu çalışmanın amacı, PET atıkların geri dönüşümünün yapılması ile betonarme kolonların sismik performansını arttırmaktır.

Bu doğrultuda çalışmanın hedefleri;

- PET atıkları granül hale getirip yapım aşamasındaki kolonların betonunda agrega olarak kullanarak daha hafif beton elde etmek
- Betondaki çatlakların oluşup ilerlemesi sırasında PET atık katkılarını bir çatlak tutucu gibi çalıştırarak daha sünek beton elde etmek
- Betonun çökme derinliğini ve yoğunluğunu azaltmak
- Betonu hafifleştirerek daha az iş gücü ile daha hızlı bir şekilde kullanılabilmek
- PET atığı betonda agrega ikamesi olarak yeniden kullanarak, malzeme maliyetini azaltmak ve PET atıkların neden olduğu bazı katı atık sorunlarını çözmek
- Betonda geri dönüştürülmüş PET malzemeler kullanarak daha sürdürülebilir bir inşaat endüstrisine önemli ölçüde katkıda bulunmak
- Elde edilen PET katkılı betonun, en önemli taşıyıcı yapı elemanlarından biri olan kolonların sismik davranışına olan etkisini incelemek
- Betonarme kolonları lifli polimer kumaş ile sararak betonarme yapıların yer değiştirme kapasitelerini artırmak
- Tekrarlı yükleme altındaki kolonun hacimsel olarak genişlemesini sınırlandırmak
- Betonarme kolonları lifli kumaşlar ile sararak, içerisindeki donatıları çeşitli kimyasal ve fiziksel etkilere karşı daha dirençli hale getirip korozyonun önüne geçmek
- Betonarme kolonların içerisinde PET atık ve dışarısında lifli kumaş kullanarak, kolonların dayanım ve şekil değiştirme özelliklerinden ödün

vermeden ağırlıklarını azaltarak kolonları deprem kuvvetlerine karşı avantajlı duruma geçirmek

olarak sıralanabilir.

Bu tezin bilimsel ve teknolojik olarak özgün değeri şu başlıklar altında açıklanabilir:

- Tez kapsamında PET atıkların ikamesi ile oluşturulan betonun malzeme deneylerinin yanında donatı ile uyumu göz önünde bulundurularak betonarme yapı elemanları içerisinde kullanımının etkileri incelenecektir. Daha önce yapılmış çalışmaların çoğu malzeme deneyleri üzerine yapılmış çalışmalardır. Yapılacak çalışma bu konuda literatürde yeni bir araştırma kolu oluşturacaktır.
- Betonarme bir yapının en önemli taşıyıcı elemanlarından biri olan kolonların içerisinde PET atıkları kullanarak kolonların yapısal davranışları incelenecektir. Kolonlar depreme benzeştirilen tekrarlı yükler altında test edilecek ve bu sayede oluşabilecek depremlerde PET ikamesi yapılmış kolonların depreme karşı verecekleri olası tepkiler hakkında bilgi edinilecektir. Literatürde kolonların tekrarlı yükler altındaki davranışını inceleyen çalışmalar oldukça fazladır. Fakat betonunda PET atıklar kullanılarak oluşturulan kolonları inceleyen çalışmaların sayısı oldukça azdır. Yapılacak çalışma bu konuda literatüre bir yenilik getirecektir.
- Tez, PET atık ikamelerinin kolonların yük taşıma kapasitesini, rijitliğini ve sünekliğini nasıl etkilediğini açıklayan yeni teoriler geliştirilmesine katkıda bulunacaktır.

Betonarme kolonlarda hem betonun içerisinde granül ikamesi olarak PET kullanılması hem de kolonun çevresinin lifli polimer kumaşlar ile sarılması, literatürde yer alan uygulamaları birleştiren yeni bir uygulama biçimi olacaktır. Betonarme kolonlarda uygulanacak olan bu yeni uygulama biçimi literatürde yapılabilecek benzeri çalışmalarla birlikte sürdürebilir inşaat uygulamalarının gelişimine katkıda bulunacaktır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde yapılmış olan çalışmalar içerikleri dikkate alınarak üç farklı başlık halinde oluşturulmuştur.

2.1. PET Atıklar ve Beton Literatür Özeti

Yapılan bir çalışma Almeshal ve ark. (2020), betonda kumun kısmi ikamesi olarak polietilen tereftalatın (PET) kullanılmasının etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. Bu malzemenin betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. PET içeren altı beton karışımından oluşan bir grup, kumun kısmi ikamesi olarak %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 ikame seviyeleri ile hazırlanmıştır. Taze ve sertleşmiş betonun işlenebilirlik, birim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, çekme dayanımı, darbe hızı ve yangına dayanıklılık davranışı açısından davranışını belirlemek için beton dökülmüştür. Deneysel sonuçlar, birim ağırlıkta azalma olduğunu, kum ikamesinin betonun mekanik özelliklerine değişen oranlarda zarar verdiğini, PET atıkların belirli oranlarda bertaraf edilebileceğini ve bu nedenle endüstriyel kullanımda etkin bir şekilde uygulanabileceğini göstermiştir.



Şekil 2.1. Almeshal ve ark. (2020) çalışmasına ait görseller.

Diğer bir çalışma Saxena ve ark. (2018), PET şişelerin parçalanarak betonda agrega (ince ve kaba) olarak ağırlığına göre %5, %10, %15 ve %20 olarak kullanıldığı deneysel bir çalışmayı rapor etmektedir. PET atık içeren betonun basınç dayanımı, darbe dayanımı ve enerji emme kapasitesi gibi beton parametreleri incelenmiştir. Ayrıca, PET atığı içeren betonun artık basınç dayanımı, 300°C ve 600°C yüksek

sıcaklıklara maruz kalma açısından incelenmiştir. Test sonuçlarının analizi sonucunda, atık PET agregası içeren betonun daha düşük basınç dayanımı gösterdiği anlaşılmıştır. Ancak, kontrol betonu ile karşılaştırıldığında PET katkılı beton durumunda darbe yüküne karşı daha iyi direnç gösterildiği görülmüştür.



Şekil 2.2. Saxena ve ark. (2018) çalışmasına ait görseller.

Diğer bir çalışmada Hameed ve Ahmed (2019), geri dönüştürülmüş Polietilen tereftalat (PET) pul agregalar kullanılarak üretilen betonun özelliklerine ilişkin deneysel veriler sunulmaktadır. Portland çimentosunun ağırlığına göre farklı PET içeriklerine (%1, %3, %5, %7, %10) sahip beş grup beton üretilmiştir. Geri dönüştürülmüş PET agrega içeriğinin her partinin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve sertleşmiş yoğunluğu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, %1 oranında PET kullanımının, referans gruba (atıksız yapılan) kıyasla basınç dayanımını %58 oranında artırdığını göstermiştir. Eğilme mukavemeti sonuçları, referans grup ile karşılaştırıldığında %1 ve %3 oranında PET kullanımının eğilme mukavemeti değerlerini sırasıyla %23.11 ve %25.59 artırdığını göstermiştir. Ayrıca, PET'in %1 oranının, %130'luk artış oranıyla optimum yarmada çekme mukavemeti değerini verdiği anlaşılmıştır. Yoğunluk değerlerinin, PET içeriği yüzdesinin artmasıyla belirgin bir şekilde azaldığı, özellikle PET'in %10 kullanımında %14 azalmaya yaklaştığı görülmüştür.

2.2. Betonarme Kolonlarda Sismik Yükleme ve Güçlendirme Literatür Özeti

Betonarme kolonlarda sismik yükleme ve güçlendirme ile ilgili çalışmalar, FRP sargısı bulunmayan kolonlar ve FRP sargısı bulunan kolonlar olmak üzere iki gruba ayrılmıştır.

2.2.1. FRP sargısı olmayan kolonların sismik yük çalışma sonuçları

Yapılan bir çalışma Huang ve ark. (2019), kombine çevrimsel eğilme-kesme-burulma yüklerine maruz kalan kare betonarme kolonların davranışı üzerine deneysel bir araştırma sunmaktadır. Tam olarak benzer yapısal özelliklere sahip dört adet tam ölçekli kare betonarme kolon, dört tip yükleme koşulu altında test edilmiştir. Kombine yüklemelerin arıza modu, histeretik yük-yer değiştirme tepkisi, taşıma kapasitesi, enerji tüketimi, süneklik ve plastik mafsal özellikleri üzerindeki etkileri tartışılmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, birleşik yüklemelerin taşıma kapasitesini azalttığı ve arıza modlarını ve deformasyon özelliklerini değiştirdiği sonucuna varılmıştır. Plastik mafsal oluşmadan önce yer değiştirme dağılımı doğrusallık göstermiştir. Akma sonrasında parabolik dağılıma dönüşmüş ve plastik mafsal oluştuktan sonra plastik mafsal alanı artmıştır. Dikey eksantrik yükleme, yapısal burulmaya neden olmuş ve plastik mafsal uzunluğunun artmasına neden olmuştur. Yatay torkun etkisi altında kolonun burulma hasarı çok önemli olmuş ve hasarlı alan kolon yüksekliği boyunca dağılmıştır.

Diğer bir çalışma Tian ve ark. (2021), yeni bir kompozit kolon, yani beton dolgulu ultra yüksek performanslı beton (UHPC) boru şekilli (CFUT) kolon üzerinde deneysel ve sayısal bir araştırma sunmaktadır. Sismik performans üzerindeki etkiyi araştırmak için bir kontrol betonarme kolonu ve farklı kolon parametrelerine sahip üç CFUT kolonu, kombine sabit eksenel sıkıştırma ve yanal döngüsel yükleme altında test edildi. Test sonuçları, UHPC ceketlerin ve çekirdek betonun iyi sinerji çalışma performansının, UHPC ceketlerin yük taşıma kapasitelerine sürekli bir katkı yapmasına izin verdiğini gösterdi. Betonarme kolonla karşılaştırıldığında, CFUT kolonu, ilk yanal rijitlik ve yanal yük taşıma kapasitesinde önemli iyileştirmeler ile iyi bir sismik performansa sahipti. Çelik lif köprüleme etkisinden kaynaklanan geniş çaplı çoklu çatlama davranışıyla, CFUT kolonları, azalan kalıntı sürüklenme oranlarıyla birlikte gelişmiş deformasyon kapasitesi de sergiledi. Ayrıca, kompozit kolonların tepkisini simüle etmek için bir sonlu elemanlar (FE) modeli de geliştirilmiştir. Deneysel ve simüle edilmiş yük-yer değiştirme eğrileri iyi uyum sağlamış ve kompozit kolonların yüke karşı deformasyon davranışı düzgün bir şekilde yakalanabilmiştir.

Diğer bir çalışmada Zhang ve ark. (2020), boyuna donatı mukavemet derecesi, etriye aralığı, beton mukavemeti ve eksenel yük oranının (ALR) yüksek mukavemetli beton (HSC) kolonların sismik davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için, 600 MPa

nominal akma mukavemetine sahip yüksek mukavemetli çelik donatılarla (HSSB) veya geleneksel çelik donatılarla güçlendirilmiş yedi adet tam ölçekli kare HSC kolon, sabit eksenel yük ve döngüsel yanal yük altında test edilmiştir. Ayrıca, ABAQUS programında karşılık gelen doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Kolon tepe deformasyonu ve farklı hizmet durumlarındaki yanal yük, rijitlik bozulması, taşıma kapasitesinin azalması ve boyuna ve enine donatı gerilmesi tartışılmıştır. Test sonucu, etriye olarak nominal akma dayanımı 400 MPa olan çelik donatıların kullanılmasının HSC kolonları için daha iyi bir seçim olduğunu ve ALR'nin yüksek dayanımlı boyuna donatının maksimum noktasından önce basma veya çekme akma gerinimine ulaşıp ulaşamayacağını belirleyen önemli bir faktör olduğunu göstermektedir. HSSB'yi boyuna donatı (eşdeğer hacim değişimi) olarak almak, HSC kolonlarının sismik davranışını büyük ölçüde geliştirir. Gerinim gradyanının basınçlı betonun gerilme-gerinim ilişkisi üzerindeki etkisi dikkate alındıktan sonra, Razvi ve Saatcioğlu tarafından kurulan modele dayalı olarak sonlu elemanlar analizine (FEA) uygun bir sınırlı gerinim gradyan modeli (CSGM) oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar modelinin (FEM) farklı hizmet durumlarında deformasyon ve yanal yüke ilişkin spesifik doğrulaması, daha fazla parametre analizi için sunulmuştur. Yer değiştirme süneklik faktörünün eğilimi, sayısal analiz bölümünde ayrıntılı olarak incelenmiştir. Uygun ALR ve etriye karakteristik değeri ile, HSSB ile güçlendirilmiş HSC kolonları, çoğu kodun süneklik talebini karşılayabilen 4'ten daha yüksek bir yer değiştirme sünekliği sunabilmektedir.

Diğer bir çalışmada Dai ve ark. (2021), düşük ve yüksek eksenel kuvvetlerle tasarlanmış korozyona uğramış betonarme kolonların sismik performansı deneysel olarak incelenmiştir. Bunu yapmak için, test numuneleri olarak on adet betonarme kolonu tasarlanmış ve imal edilmiştir. Düşük ve yüksek eksenel yük oranlarına (ALR'ler), yani sırasıyla 0.1 ve 0.45'e karşılık gelen iki gruba ayrıldılar. Her kolon grubu, korozyona uğramamış bir kolondan ve artan korozyon oranları %2, %5, %10 ve %20 olan dört paslanmış kolondan oluşuyordu. Kolon numunelerinin her birinin sismik performansı, göçme modları, histerezis ve zarf eğrileri, süneklik, rijitlik ve enerji dağılımından kaynaklanan yarı statik döngüsel yükler altında test edildi. Sonuçlar, eksenel yük seviyesinin korozyona uğramış betonarme kolonların sismik performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Yüksek ALR ile tasarlanan ciddi şekilde aşınmış betonarme kolonu, donatı korozyonunun ve eksenel yüklerin

zararlı ve birleştirici etkisini gösteren kırılgan bir modda başarısız olmuştur. Son olarak, korozyona uğramamış kolonların kayma mukavemetini tahmin etmek için yaygın olarak kullanılan altı kayma mukavemeti modeli, beton ve donatı malzemelerinin bozulmasını hesaba katarak korozyona uğramış kolonlar için uygulanmıştır. Tahmin sonuçları, FEMA 273 tarafından önerilen modelin, korozyona uğramış kolonların kayma mukavemetini tahmin etmede dikkate alınan modeller arasında en yüksek doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, aşınmış kolonların döngüsel yükler altında doğrusal olmayan davranışı üzerindeki aks yüklerinin etkisini ortaya koymaktadır. Sonuçlar, mühendislerin aşınmış kolonların sismik performansını anlamalarına yardımcı olabilir.

Diğer bir çalışmada Li ve ark. (2018), korozyona uğramış etriyelerle çevrelenmiş beton kolonların sismik davranışlarını anlamak için, sekiz adet korozyona uğramış betonarme kolon üzerinde mekanik özelliklerini ve göçme mekanizmalarını incelemek üzere düşük ters çevrimli yükleme testleri yapılmıştır. Taşıma kapasitesi, histerezis özellikleri, süneklik, mukavemet azalması, rijitlik bozulması ve enerji dağılımı gibi sismik performans göstergeleri üzerindeki etki, üzengi demiri çapı ve etriye aralığı değişiklikleri gibi parametrelere dayalı olarak karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlar, korozyona uğramış etriyelerin sağladığı beton tutuculuğunun azaldığını, bunun da sismik performansın düşmesine neden olduğunu ve etriye korozyonunun artmasıyla kolonların yenilme sınırı yer değiştirmesinin azaldığını göstermiştir. Histerezis eğrisinin sıkıştırma fenomeni kademeli olarak artmış, mukavemet ve sertliğin zayıflama derecesi artmış ve aynı kontrol yer değiştirmesi altında birikmiş enerji artarken süneklik ve enerji dağıtma kapasitesi azalmıştır. Korozyona uğramış etriyelerle çevrelenmiş betonarme kolonların yanal dayanımını tahmin etmeye yönelik bir yöntem, etriye demiri korozyonunun etkisini göz önünde bulunduran modifikasyonlarla birlikte, geleneksel betonarme kolonlar için eksenel-kesme-eğilme etkileşimi yaklaşımına dayalı olarak sunulmuştur. Test sonuçları ile teorik değerler arasında iyi bir uyum sağlanmıştır.

Diğer bir çalışmada Yang ve ark. (2016) gelgit bölgesi veya sıçrama bölgesinin durumu olarak kabul edilen korozyona uğramış betonarme kolonların histerik davranışları incelenmiştir. Deniz ortamında klorür iyonunun sızdığı betonarme kolonlar, sismik yükleme altında çok hassastır. Deneyler, sabit bir düşey yük ile birleştirilmiş döngüsel yanal yükler altında farklı maksimum inşaat çeliği korozyon

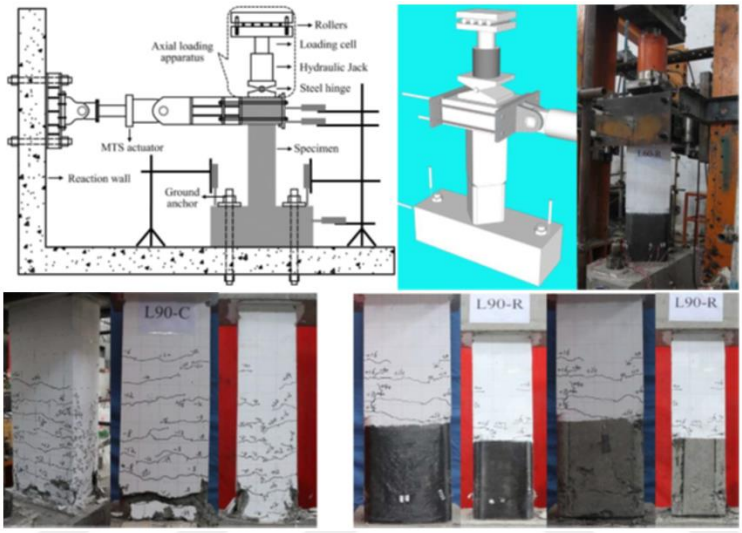
miktarlarına sahip beş korozyona uğramış betonarme kolon grubu için tasarlanmıştır. Çevre koşullarına benzer istenen miktarda inşaat çeliği korozyonu elde etmek için geleneksel ıslatma yönteminin yerini yeni bir sarma yöntemi almıştır. Sonuçlar, korozyona uğramış betonarme kolonun eğilme dayanımının, dairesel sertliğinin, sünekliğinin ve enerji emiliminin, inşaat çeliğinin maksimum korozyon miktarının artmasıyla azaldığını göstermiştir. Maksimum korozyon miktarının %13.25 ve genleşme çatlağı genişliğinin 1.2 mm olması iki önemli kritik parametre olmuştur.

Diğer bir çalışma Liao ve ark. (2017), farklı enine donatı detaylandırma düzenlerine sahip yüksek mukavemetli betonarme kolonların döngüsel davranışına ilişkin deneysel bir çalışma sunmaktadır. Üç yüksek mukavemetli betonarme kolon, sırasıyla geleneksel kapalı çemberler, alın kaynaklı çemberler ve çapraz bağları olan tek kapalı çember olmak üzere farklı enine donatı detaylandırma konfigürasyonlarından oluşuyordu. Kolonlar, basınç dayanımı 70 MPa olan yüksek dayanımlı betondan ve boyuna donatı için sırasıyla 685 MPa ve 785 MPa akma gerilmesi olan yüksek dayanımlı çelikten yapılmıştır. Enine detaylandırmanın yeterliliğini doğrulamak için $0.3A_gf_c'$'lik yüksek eksenel sıkıştırma yüküne tabi döngüsel yer değiştirme statik testleri yapılmıştır. ACI 318-14'e uygun geleneksel kapalı çemberli kolon ile alın kaynaklı çemberli kolonun performansı hemen hemen aynıydı ve ACI 374'ün gerektirdiği performans kriterlerini karşılıyordu. ACI 318-11'e göre tasarlanan çapraz bağları olan tek kapalı çember, sünek bir betonarme kolon kadar iyi performans göstermedi. Bu sonuçlar, kuşatma için ACI 318-14 minimum gerekliliklerine uyulması gerektiğini kanıtlıyor. Ek olarak, kaynak yerinde herhangi bir kırılma gözlenmediğinden, alın kaynaklı çemberler bir kolonun enine takviyesi olarak kabul edilebilir. Betonarme kolonlar için mevcut eğilme ve kesme tasarım denklemleri tartışılmış ve test sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2.2.2. FRP sargılı kolonların sismik yük çalışma sonuçları

Yapılan bir çalışma Wang ve ark. (2018), yanal yükleme yönlerinin kolonların sismik performansı üzerindeki etkisine vurgu yaparak hem güçlendirme yapılmamış hem de karbon FRP (CFRP) ile güçlendirilmiş dikdörtgen betonarme kolonlar üzerinde deneysel bir araştırma sunmaktadır. Toplam on büyük ölçekli konsol dikdörtgen betonarme kolonu inşa edildi ve bunlardan beşi, potansiyel plastik mafsal bölgelerinde CFRP kaplamalarla güçlendirildi. Her numunenin genel performansı, hasar gelişimi, yanal yük-yer değiştirme histerik davranışı, yanal dayanım, süneklik kapasitesi, rijitlik

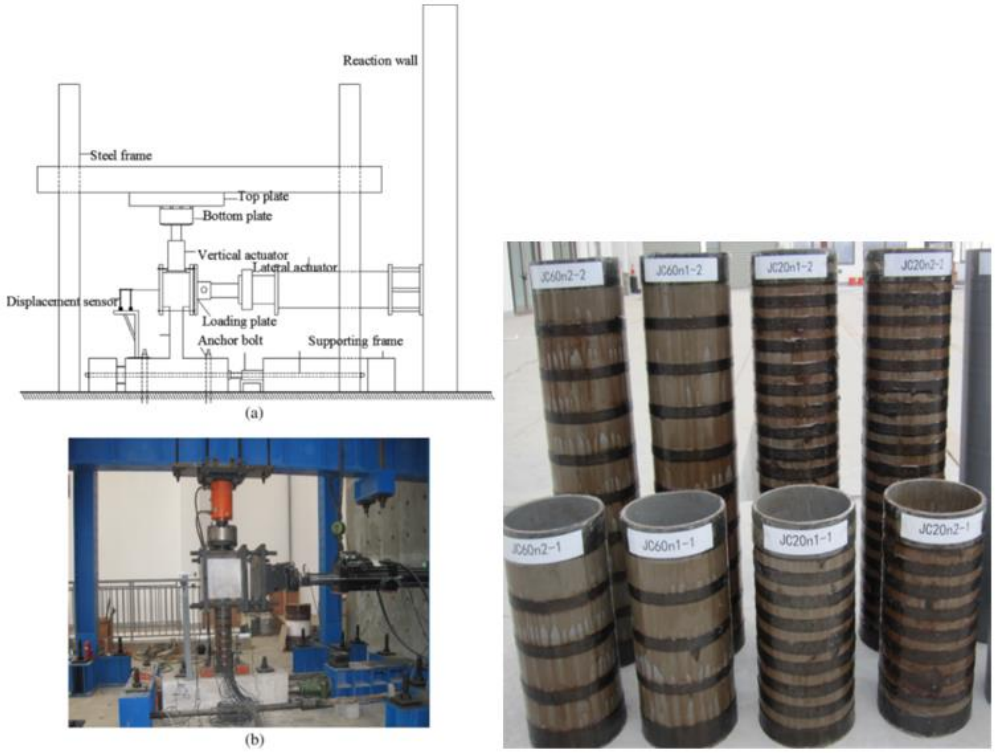
bozulması ve enerji dağılımı açısından incelendi. Yanal yükleme yönünün hem güçlendirme yapılmamış hem de CFRP ile güçlendirilmiş dikdörtgen betonarme kolonların sismik performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Dikdörtgen betonarme kolonların sismik performansı, yükleme yönündeki değişkenliğe rağmen, CFRP ile güçlendirildikten sonra açıkça iyileştirildi. Bununla birlikte, CFRP güçlendirme stratejisinin etkinliğinin, yanal yükleme yönü açısının artmasıyla azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 2.3. Wang ve ark. (2018) çalışmasına ait görseller.

Diğer bir çalışma Yu ve ark. (2018), düşük döngüsel yüklemeye maruz kalan CFRP ile çevrelenmiş betonarme kolonların göçme modu, nihai taşıma kapasitesi ve süneklik kapasitesi üzerine deneysel bir çalışma sunmuştur. Analizde eksenel sıkıştırma oranı, kesme açıklığı oranı ve CFRP şeritlerinin çember aralığı gibi çeşitli parametreler dikkate alınmıştır. Sonuçlar, düşük eksenel sıkıştırma oranındaki tüm kolonların eğilerek yenildiğini göstermiştir. Yüksek eksenel sıkıştırma oranında geniş çember aralığına sahip uzun ve kısa kolonlar eğilme kesmesiyle yenilirken, yüksek eksenel sıkıştırma oranında küçük çember aralığına sahip kısa kolonlar kesmeyle yenildi. Eksenel sıkıştırma oranı arttıkça veya kesme açıklığı oranı azaldıkça nihai taşıma kapasitesi artarken, CFRP şeritlerinin çember aralığı arttıkça nihai taşıma kapasitesi azaldı. Kolonun alt kısmında yer alan nihai birim şekil değiştirmeler, eksenel sıkıştırma oranı arttıkça artarken, kesme açıklığı oranı arttıkça nihai birim şekil değiştirmeler azalmaktadır. CFRP şeritlerin çember aralığı azaldıkça CFRP şeritlerin sınırlayıcı etkisi kademeli olarak arttı. Süneklik kapasitesi, eksenel sıkıştırma oranı

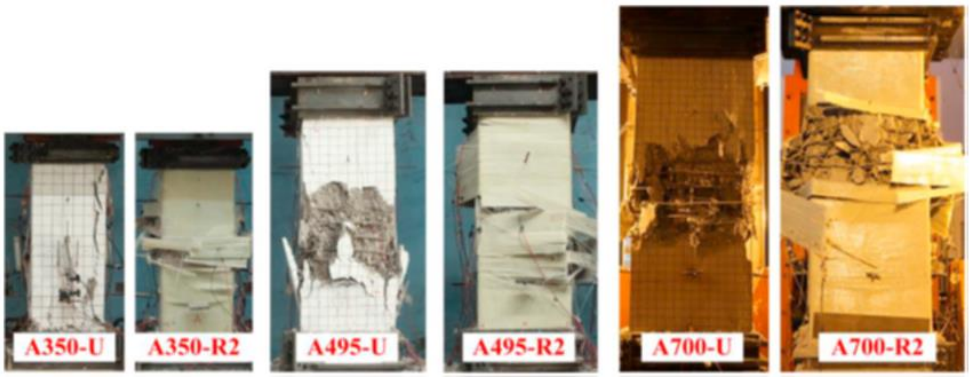
veya kesme açıklığı oranı arttıkça azalırken, CFRP şeritlerin çember aralığı arttıkça süneklik kapasitesi artmaktadır.



Şekil 2.4. Yu ve ark. (2018) çalışmasına ait görseller.

Diğer bir çalışmada Wang ve ark. (2017a), toplam 11 büyük ölçekli konsol kare betonarme kolon inşa edildi ve bunlardan dokuzu, kolon uçlarında karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP) sargılarla güçlendirildi. Bu kolonlar daha sonra birleşik sabit eksenel sıkıştırma ve döngüsel yanal yükler altında test edildi. Testlerdeki değişkenler eksenel sıkıştırma oranını, CFRP sargılarının kalınlığını ve kolon boyutunu içermektedir. Test edilen kolonların arıza modları, histerik tepkileri, enerji dağılımı, rijitlik bozulması ve eşdeğer viskoz sönüm oranı sunuldu ve yorumlandı. Test sonuçları, sünek olmayan betonarme kolonların süneklik ve enerji dağıtma kapasitelerinin, CFRP sargılaması sonucunda kolonların potansiyel plastik mafsal bölgeleri ile önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermiştir. Güçlendirilmiş kolonların, çok yüksek bir eksenel sıkıştırma seviyesi (0.75) altında test edildiklerinde bile tatmin edici sismik performans sergiledikleri bulundu. Test sonuçlarına dayanarak, kolonların efektif rijitliği ve boşaltma rijitliğindeki bozulma tartışılmış ve lineer olmayan regresyon analizi yoluyla ampirik denklemler önerilmiştir.

Diğer bir çalışma Wang ve ark. (2022), sabit eksenel sıkıştırma ile birlikte hem monoton eksenel sıkıştırma yükü hem de döngüsel yanal yük altında test edilen 350 mm, 495 mm ve 700 mm kenar uzunluklarına sahip 17 GFRP sarılmış kare betonarme kolon numunesinin deneysel sonuçlarını göstermektedir. Sonuçlar, FRP hapsetme etkisinin hem eksenel sıkıştırmada hem de döngüsel yüklemede kolon boyutundan oldukça etkilendiğini göstermektedir. Mevcut hükümlerin uygulama aralığını genişletmek için yönetmeliklerde sütun boyutunun etkisinin daha fazla dikkate alınması önerilmektedir. Harici FRP sargıları tarafından sağlanan hapsetme etkisi, yük taşıma kapasitesi ve süneklik dahil olmak üzere monotonik eksenel yük ve döngüsel yanal yük altında küçük ölçekli kare betonarme kolonların yapısal davranışını açıkça artırabilir. Bununla birlikte, kolonların ölçeğinin artmasıyla FRP sargılarının sabit hacimsel oranı ile yük taşıma kapasitesindeki iyileşme önemli ölçüde azalırken süneklik ve enerji dağıtma kapasitesi ve eşdeğer viskoz sönüm oranı gibi diğer sismik performans hala geliştirilebilir. Artan eksenel sıkıştırma oranıyla (0.35'ten 0.65'e), FRP sarılı kolonların yanal yük taşıma kapasitesi artarken süneklik faktörü önemli ölçüde düştü. 0.65'lik nispeten büyük bir eksenel sıkıştırma oranına sahip bir numune için, FRP sargıları süneklik üzerinde oldukça sınırlı bir etki sergiler ve numunenin kırılma modu, bir bükülme kırılmasından bir sıkıştırma kırılması modeline dönüşür.

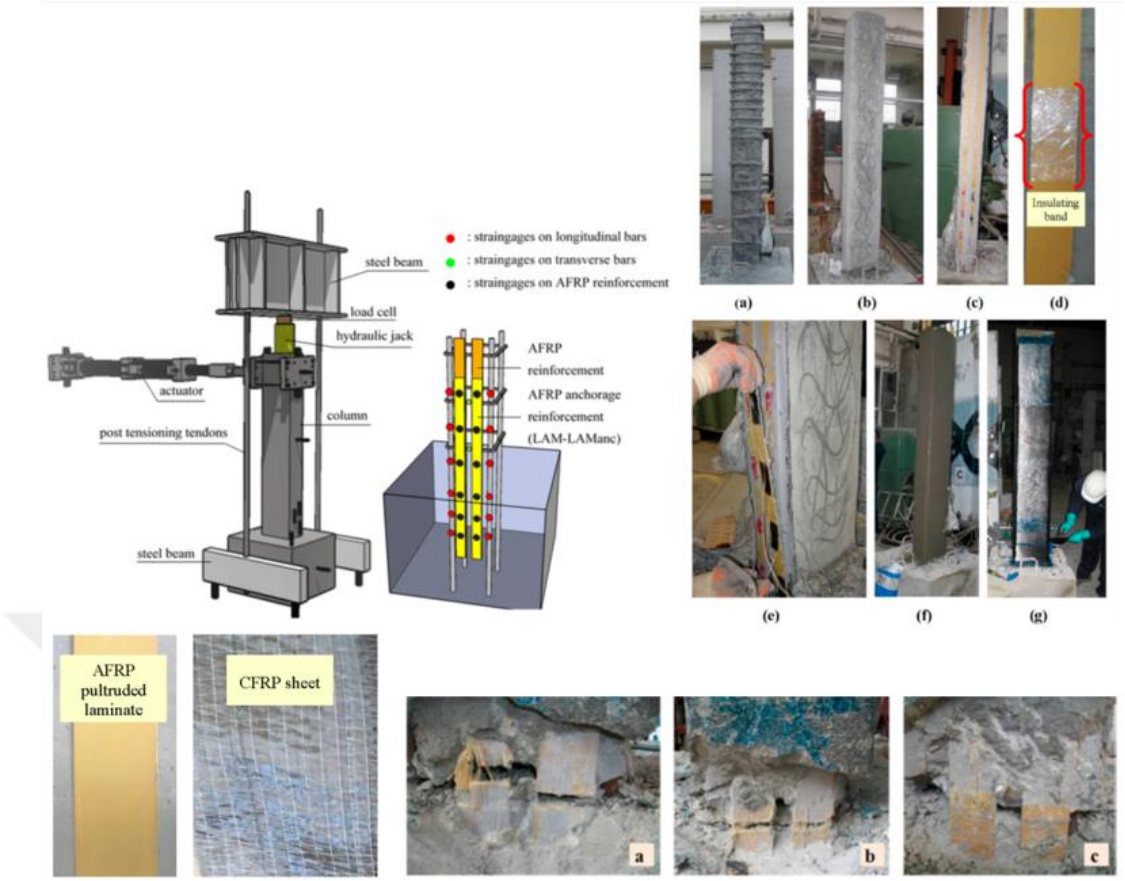


Şekil 2.5. Wang ve ark. (2022) çalışmasına ait görseller.

Diğer bir makalenin Choi ve ark. (2015) amacı, boyuna takviye bindirmeli eki olan betonarme kolonlar için cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) teller kullanan bir mantolama yöntemi önermektir. Bu çalışma için, 400 mm çapında ve 1400 mm yüksekliğinde, en-boy oranı 3.5 olan ikisi bindirmeli ve diğer ikisi sürekli uzunlamasına takviyeye sahip dört adet betonarme kolon hazırlandı. Her iki tipten birer numune, 1 mm çapındaki GFRP tellerle kaplanmıştır. GFRP teller, her kolonun

sarılması sırasında küçük bir kuvvetle gerildi. Ceket, kolonun eğilme momentinin değişimi boyunca basamaklı katmanlardan oluşuyordu. Kolonların tepesine döngüsel yanal kuvvet uygulanmış ve eğilme testleri sırasında kolonların üst yer değiştirmesi ve buna karşılık gelen kuvvet ölçülmüştür. Bu çalışma, test edilen dört kolonun başarısızlığını dikkate aldı ve daha sonraki kuvvetle yer değiştirme davranışlarını analiz etti. Ek olarak, zorunlu yer değiştirme eğrilerinin etkin rijitlikleri değerlendirildi. GFRP tel sargı ceketi, bindirmeli kolonda bindirmeli takviyenin ayrılmasını önledi ve uzunlamasına takviyenin burkulmasını geciktirdi. Ceket, sürekli donatı kolonunu, donatının burkulmasına ve betonun dökülmesine ve böylece kolonda indüklenen kesme kırılmasına karşı korumuştur. GFRP tel sargı ceketi, referanslara kıyasla her iki ceketli kolonun göçme ötelenmesini artırdı.

Diğer bir çalışmada Seyhan ve ark. (2015), temel amaç, kolonların orijinal boyutlarını arttırmadan gömülü uzunlamasına fiber takviyeli polimer donatı ile güçlendirilmiş standart altı betonarme kolonların eğilme sismik performansını araştırmaktır. Deneysel çalışmada, referans ve güçlendirilmiş kolonlar sabit düşey ve ters çevrimli yanal yükler altında test edilmiştir. Aramid elyaf takviyeli polimer (AFRP) takviyenin temele üç farklı bağlantı yöntemi deneysel olarak incelenmiştir. Önerilen güçlendirme yöntemiyle yanal eğilme mukavemetinde önemli bir artış elde edildi. Ayrıca, güçlendirilmiş kolonların döngüsel yanal ötelenme kapasitelerinin %3 gibi yüksek olduğu gözlenmiş olup, bu sismik etkilere karşı oldukça tatmin edici sayılabilir. Deneysel verilerin analitik hesaplamalarla karşılaştırılması, eğilme güçlendirme tasarımı için beton ve fiber takviyeli polimer donatı arasında bileşik etkiyi varsayan geleneksel bir tasarım yaklaşımının kullanılabileceğini ortaya çıkardı. Deneysel sonuçlar ayrıca, uzunlamasına elyaf takviyeli polimer (FRP) takviyesi için gerinim sınırının, ters döngüsel yükleme koşulları durumunda dikkate değer ölçüde daha düşük olması gerektiğini göstermiştir.



Şekil 2.6. Seyhan ve ark. (2015) çalışmasına ait görseller.

2.3. Deney Düzenekleri Literatür Özeti

Tezin konusu kapsamında literatürde yapılmış olan çeşitli çalışmaların deneysel düzenekleri, yapılan deneylerde uyulan standartlar ve deneyler sonucunda elde edilen verilerden oluşturulan grafikler aşağıda verilmiştir.

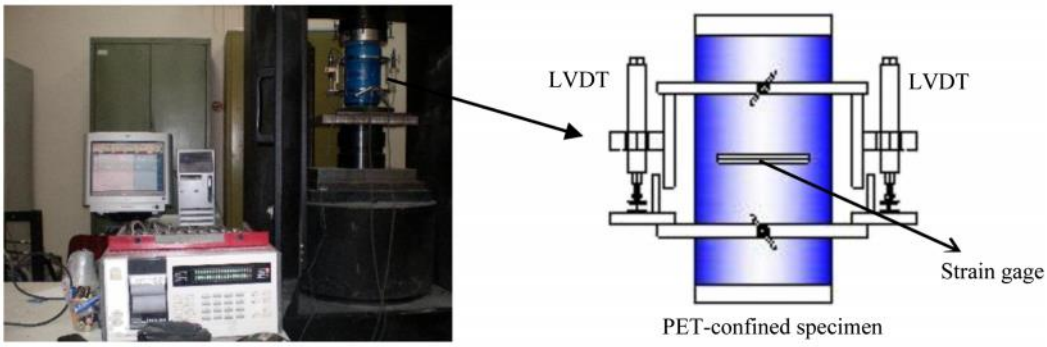
Tablo 2.1'de literatürdeki malzeme deneyleri için uyulan standartların güncel halleri ve deney düzeneği türleri verilmiştir.

Tablo 2.1. Literatürdeki malzeme deneyleri.

Malzeme deneyi	Uyulan standartlar	Deney düzeneği türleri
Basınç dayanımı (Compressive strength)	ASTM C39/C39M-21 EN 12390-3	Basınç dayanımı makinesi testi (Compressive strength machine test)
Yarmada çekme dayanımı (Split tensile strength)	ASTM C496/C496M-17 EN 12390-6	Yarmada çekme dayanımı makinesi testi (Split tensile strength machine test)
Eğilme dayanımı (Flexural strength)	ASTM C1609/C1609M-19A EN 12390-5:2019	3 noktalı eğilme dayanımı testi (Third point loading flexural strength test) 4 noktalı eğilme dayanımı testi (Four point loading flexural strength test)

Aşağıda daha önceki çalışmalara ait çeşitli deney düzenekleri ve elde edilen sonuçların grafikleri ile ilgili görseller verilmiştir.

Basınç dayanımı deney düzeneği ile ilgili çalışmalara Ispir (2015) ve Ahmad ve ark. (2021) ait görseller Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de verilmiştir.

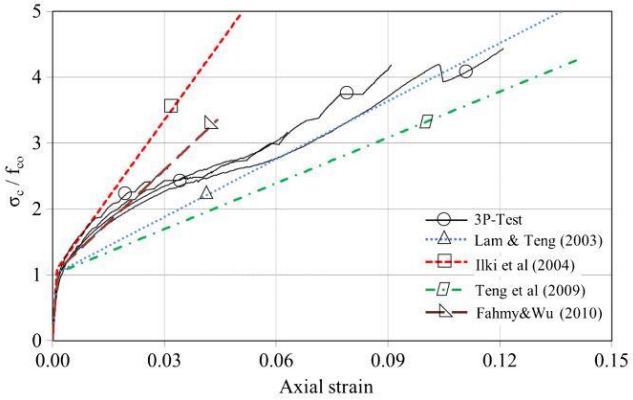


Şekil 2.7. Ispir (2015) çalışmasına ait görseller.



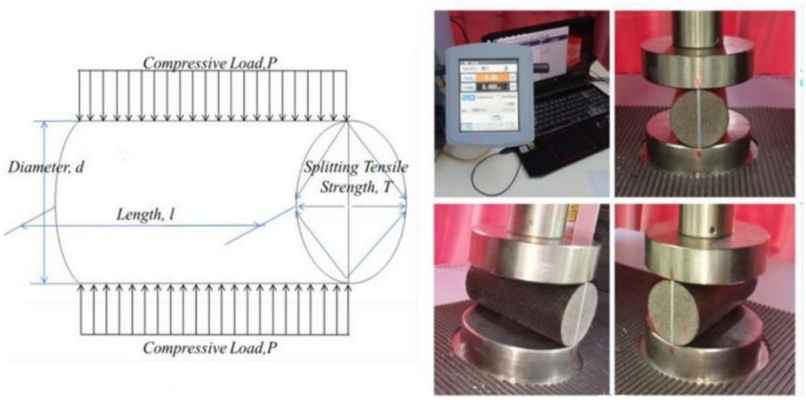
Şekil 2.8. Ahmad ve ark. (2021) çalışmasına ait görseller.

Basınç dayanımı deneyi ile ilgili Ispir (2015) çalışmasına ait elde edilen sonuçlar Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9. Ispir (2015) çalışmasına ait elde edilen sonuçların görseli.

Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği ile ilgili çalışmalara Manda ve ark. (2023) ve Yurt (2020) ait görseller Şekil 2.10 ve Şekil 2.11'de verilmiştir.

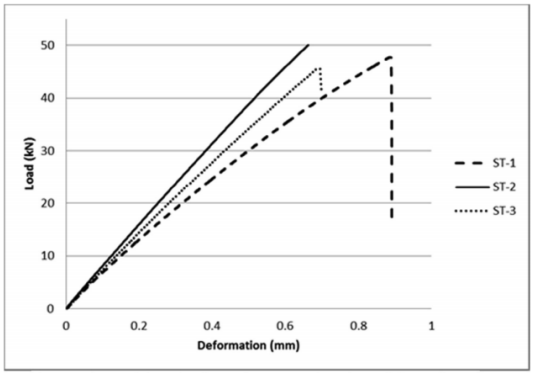


Şekil 2.10. Manda ve ark. (2023) çalışmasına ait görseller.



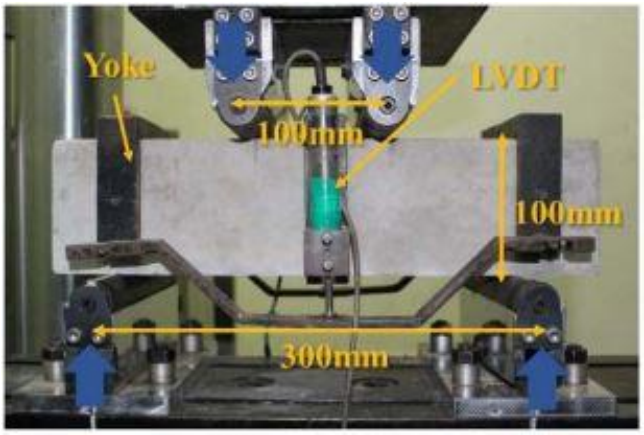
Şekil 2.11. Yurt (2020) çalışmasına ait görseller.

Yarmada çekme dayanımı deneyi ile ilgili Manda ve ark. (2023) çalışmasına ait elde edilen sonuçlar Şekil 2.12'de verilmiştir.



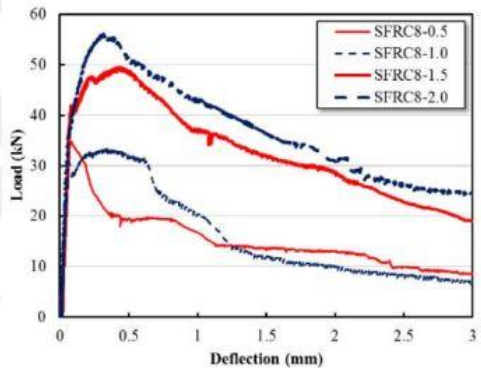
Şekil 2.12. Manda ve ark. (2023) çalışmasına ait elde edilen sonuçların görseli.

Eğilme dayanımı deney düzeneği ile ilgili Jang ve Yun (2018) çalışmasına ait görsel Şekil 2.13'te verilmiştir.



Şekil 2.13. Jang ve Yun (2018) çalışmasına ait görsel.

Eğilme dayanımı deneyi ile ilgili Jang ve Yun (2018) çalışmasına ait elde edilen sonuçlar Şekil 2.14'te verilmiştir.



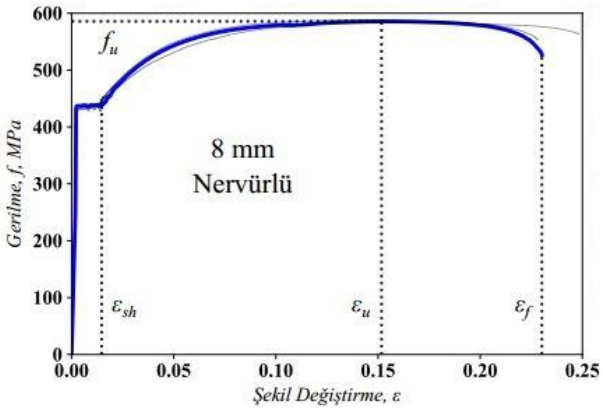
Şekil 2.14. Jang ve Yun (2018) çalışmasına ait elde edilen sonuçların görseli.

Donatı çekme deneyi ile ilgili çalışmaya Olabi (2021) ait görseller Şekil 2.15'te verilmiştir.



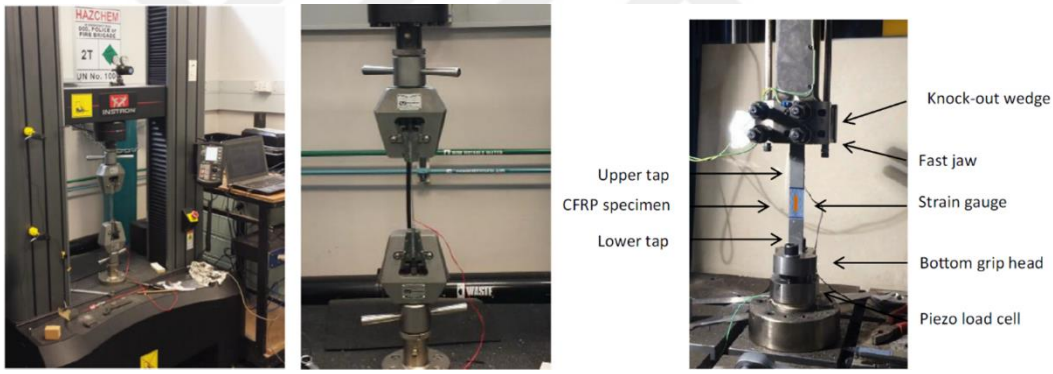
Şekil 2.15. Donatı çekme deneyi Olabi (2021) çalışmasına ait görseller.

Donatı çekme deneyi ile ilgili Olabi (2021) çalışmasına ait elde edilen sonuçlar Şekil 2.16'da verilmiştir.



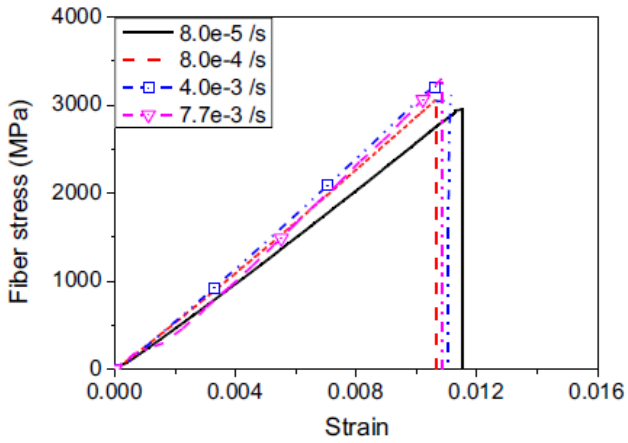
Şekil 2.16. Olabi (2021) çalışmasına ait elde edilen sonuçların görseli.

Lifli polimer kumaş çekme deneyi ile ilgili çalışmalara Zhang ve ark. (2016) ait görseller Şekil 2.17'de verilmiştir.



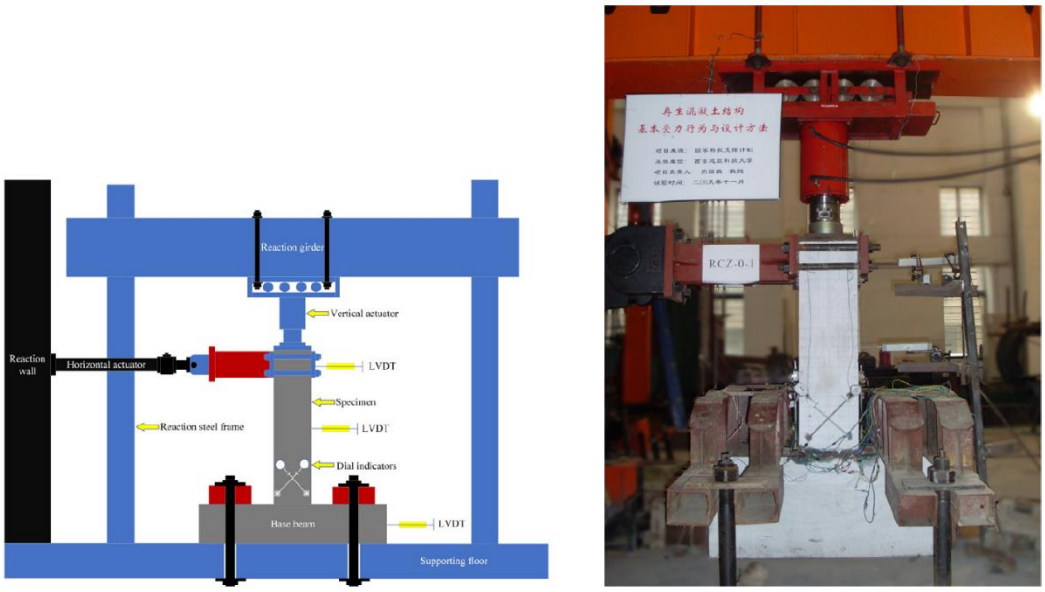
Şekil 2.17. Lifli polimer kumaş çekme deneyi Zhang ve ark. (2016) çalışmasına ait görseller.

Lifli polimer kumaş çekme deneyi ile ilgili Zhang ve ark. (2016) çalışmasına ait elde edilen sonuçlar Şekil 2.18'de verilmiştir.

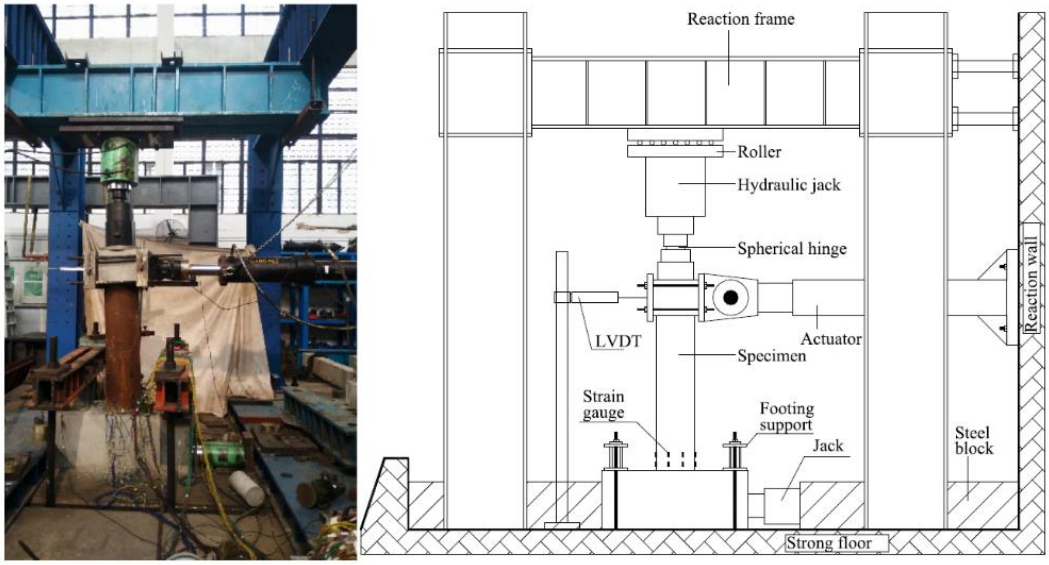


Şekil 2.18. Zhang ve ark. (2016) çalışmasına ait görsel.

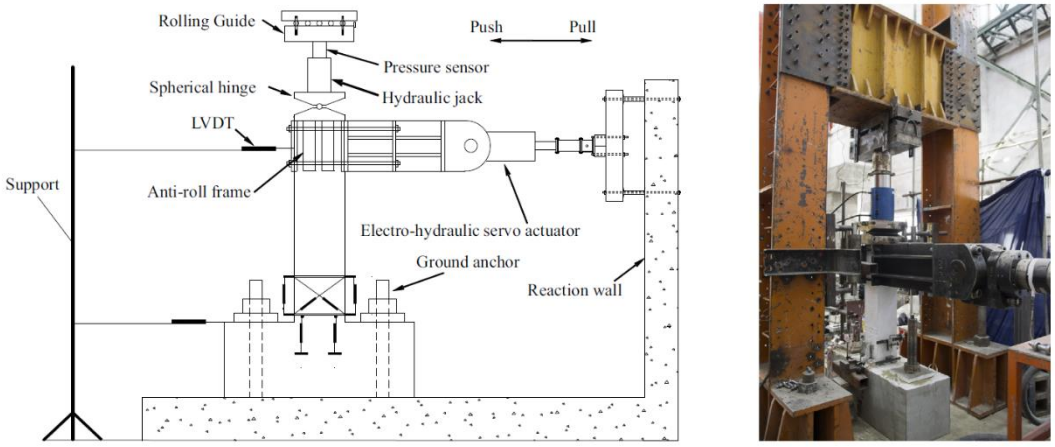
Betonarme kolonlarda tekrarlı yükleme deneyi ile ilgili çalışmalara Liu ve ark. (2019), He ve ark. (2018) ve Liu ve ark. (2018) ait görseller Şekil 2.19, Şekil 2.20 ve Şekil 2.21'de verilmiştir.



Şekil 2.19. Betonarme kolonlarda tekrarlı yükleme testi Liu ve ark. (2019) çalışmasına ait görseller.

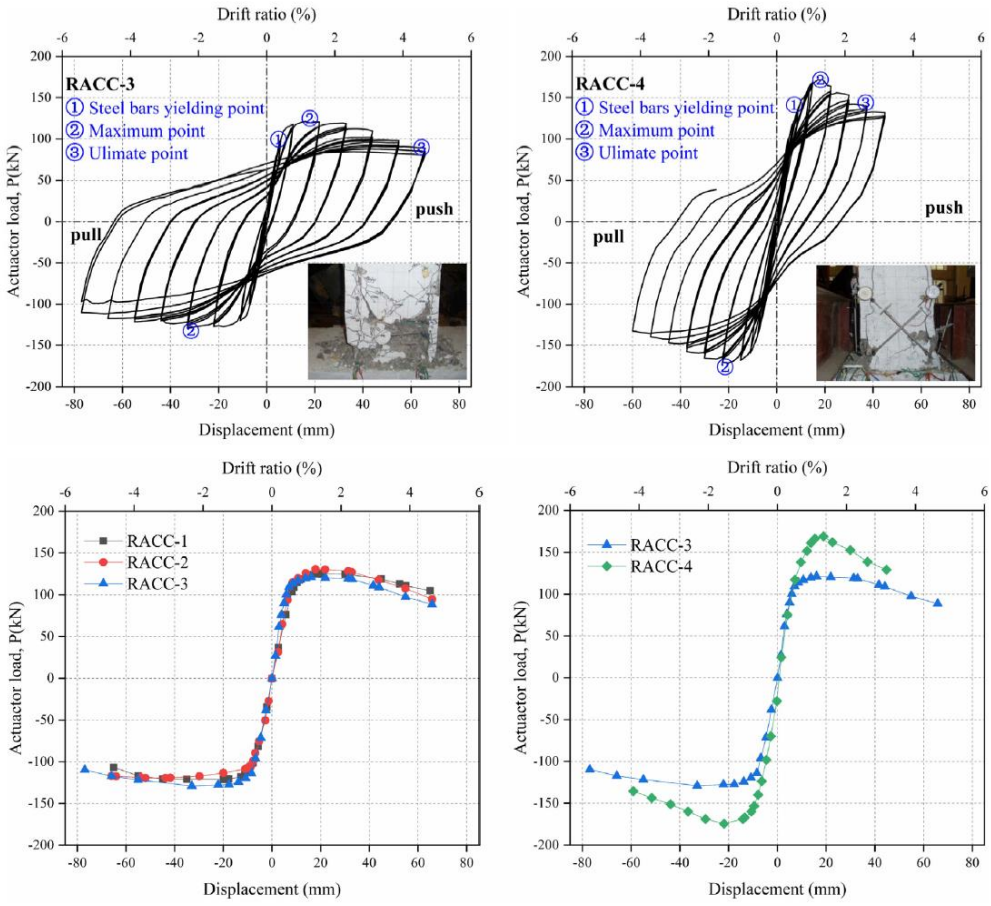


Şekil 2.20. Betonarme kolonlarda tekrarlı yükleme testi He ve ark. (2018) çalışmasına ait görseller.



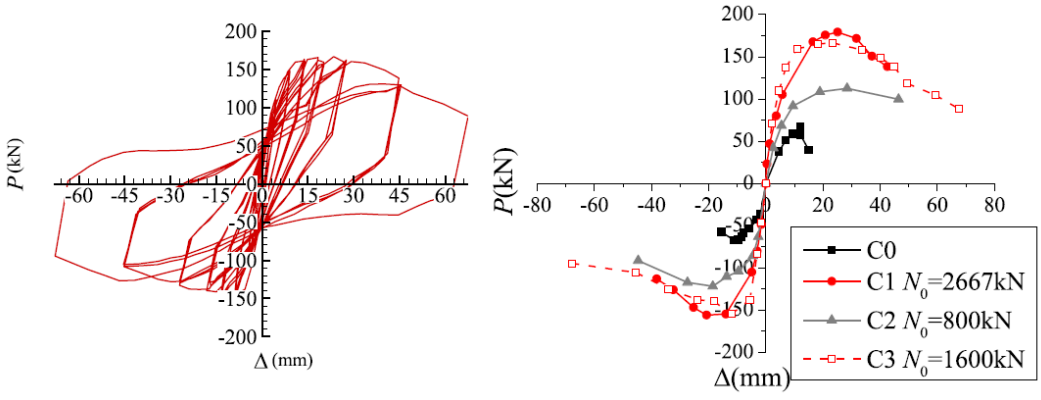
Şekil 2.21. Betonarme kolonlarda tekrarlı yükleme testi Liu ve ark. (2018) çalışmasına ait görseller.

Betonarme kolonlarda tekrarlı yükleme deneyi ile ilgili Liu ve ark. (2019) çalışmasına ait elde edilen sonuçlar Şekil 2.22'de verilmiştir.



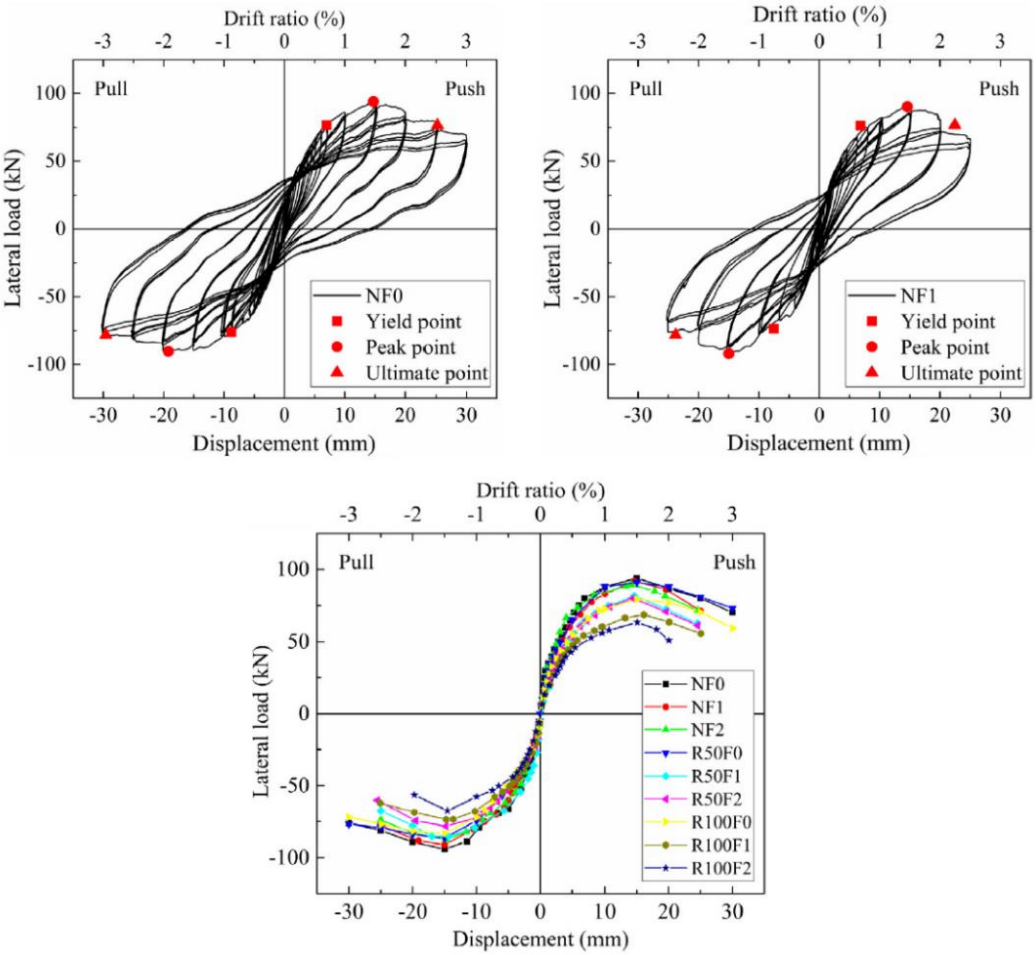
Şekil 2.22. Liu ve ark. (2019) çalışmasına ait görsel.

Betonarme kolonlarda tekrarlı yükleme deneyi ile ilgili He ve ark. (2018) çalışmasına ait elde edilen sonuçlar Şekil 2.23'te verilmiştir.



Şekil 2.23. He ve ark. (2018) çalışmasına ait görsel.

Betonarme kolonlarda tekrarlı yükleme deneyi ile ilgili Liu ve ark. (2018) çalışmasına ait elde edilen sonuçlar Şekil 2.24'te verilmiştir.



Şekil 2.24. Liu ve ark. (2019) çalışmasına ait görsel.

3. BETONDA PET İKAMESİ DENEYLERİ

Tez kapsamında 24 malzeme deneyi, 8 kolon deneyi olmak üzere toplam 32 deney gerçekleştirilmiştir. İlk olarak 18 malzeme deneyi yapılmış ve deneylerden çıkan sonuca göre 6 malzeme deneyi daha yapılmıştır. 8 kolon deneyinin bazı numunelerinin özelliklerinin belirlenmesinde malzeme deneylerinden çıkan sonuçlardan faydalanılmıştır.

3.1. Betonda PET İkamesi Deneyleri İçin Tasarım

Çalışma kapsamında PET ikame maddesi içeren beton numuneler ve çevresi lifli polimer kumaşla çevrili beton numuneler oluşturulmuştur. Bu numuneler çeşitli testlere maruz bırakılmış ve alınan sonuçlar yorumlanmıştır. Oluşturulan beton numunelerin özellikleri ve isimlendirilmesi Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Betonda PET ikamesi deneyleri isimlendirmesi.

İkame maddesi	İkame maddesi yüzdesi	Tabii olunacak deney	Numune ismi
-	0	Basınç dayanımı	CS-R-0
PET	10	Basınç dayanımı	CS-PET-10
PET	20	Basınç dayanımı	CS-PET-20
PET	30	Basınç dayanımı	CS-PET-30
CFRP	0	Basınç dayanımı	CS-CFRP-0
GFRP	0	Basınç dayanımı	CS-GFRP-0
-	0	Yarmada çekme dayanımı	STS-R-0
PET	10	Yarmada çekme dayanımı	STS-PET-10
PET	20	Yarmada çekme dayanımı	STS-PET-20
PET	30	Yarmada çekme dayanımı	STS-PET-30
CFRP	0	Yarmada çekme dayanımı	STS-CFRP-0
GFRP	0	Yarmada çekme dayanımı	STS-GFRP-0
-	0	Eğilme dayanımı	FS-R-0
PET	10	Eğilme dayanımı	FS-PET-10
PET	20	Eğilme dayanımı	FS-PET-20
PET	30	Eğilme dayanımı	FS-PET-30
CFRP	0	Eğilme dayanımı	FS-CFRP-0
GFRP	0	Eğilme dayanımı	FS-GFRP-0

3.2. Betonda PET İkamesi Deneyleri İçin Materyal

Çalışma kapsamında oluşturulacak beton için yeteri kadar mıcır, çimento ve kum tedarik edilmiştir. Oluşturulacak olan betonun içerisine ince agrega olarak katılacak olan granül geri dönüştürülmüş PET atıklar ve betonun çevresini saracak olan lifli polimer kumaşlar tedarik edilmiştir. Lifli polimer kumaşları beton çevresine

uygulayabilmek için epoksi temin edilmiştir. Deney numunelerinin üretilmesinde ve testlerin yapılmasında kullanılan materyaller ile ilgili detaylar aşağıda verilmiştir.

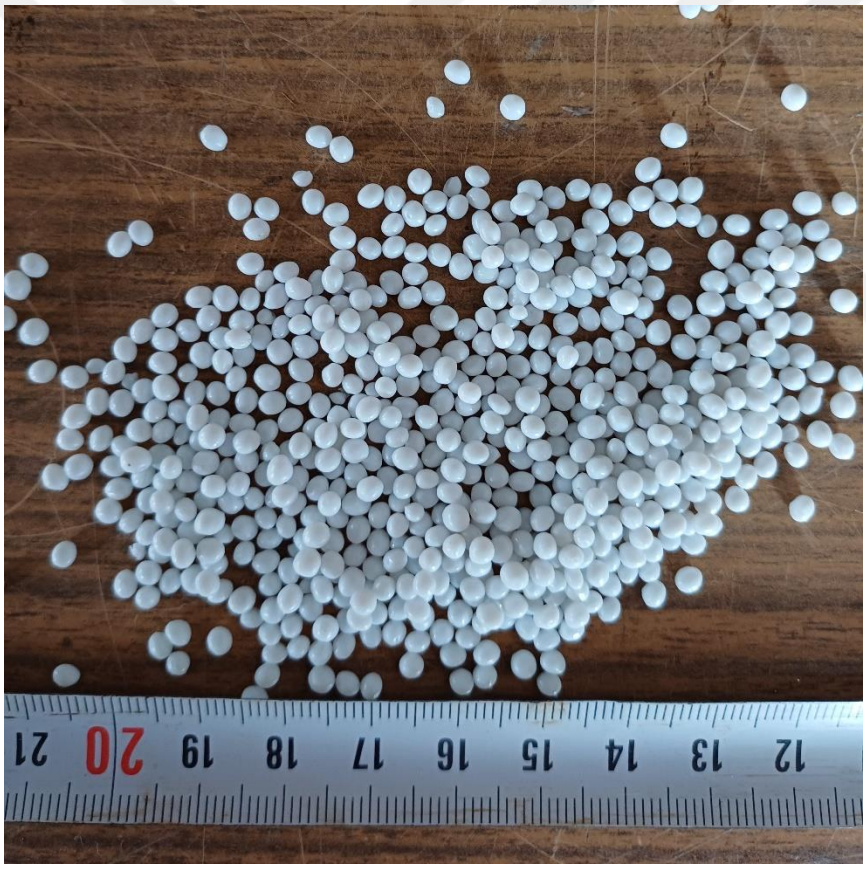
3.2.1. PET granüller

Araştırmada kullanılan PET Türkiye'de bulunan bir plastik geri dönüşüm firmasından tedarik edilmiştir. Kullanılan granül malzemenin yoğunluğu ve boyutu Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Granül malzeme özellikleri.

Granül malzeme	Yoğunluk (kg/m^3)	Boyut (mm)
PET	1280	2

Kullanılan granül malzemelerin görüntüsü Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. PET granüller.

3.2.2. Lifli polimer kumaşlar

Çalışmada numunelerin çevresini saracak şekilde CFRP ve GFRP lifli polimer kumaşları kullanılmıştır. CFRP ve GFRP görüntüleri Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. FRP tipleri: a) CFRP, b) GFRP.

3.2.3. Epoksi

Araştırmada numunelerin çevresini saracak olan lifli kumaşlar ile numune betonunun aderansını sağlayacak olan yapıştırıcı malzeme olarak epoksi kullanılmıştır. Epoksi malzemenin görüntüsü Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. FRP sarma işleminde kullanılan epoksi.

3.2.4. Mıcır

Çalışmada beton üretimi için 1 ve 2 numaralı mıcır kullanılmıştır. Üretim alanına getirilen mıcırların görüntüsü Şekil 3.4'te verilmiştir.



a) b)

Şekil 3.4. Mıcırlar: a) 1 numaralı mıcır, b) 2 numaralı mıcır.

3.2.5. Kum

Araştırmada beton üretimi için yeteri kadar kum tedarik edilmiştir. Çeşitli oranlarda granül PET atıkla ikame edilen kumun görüntüsü Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Beton üretiminde kullanılan kum.

3.2.6. Çimento

Çalışmada beton üretimi için Marmara Çimento CEM I 42.5 R çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun görüntüsü Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Beton üretiminde kullanılan çimento.

3.2.7. Betoniyer

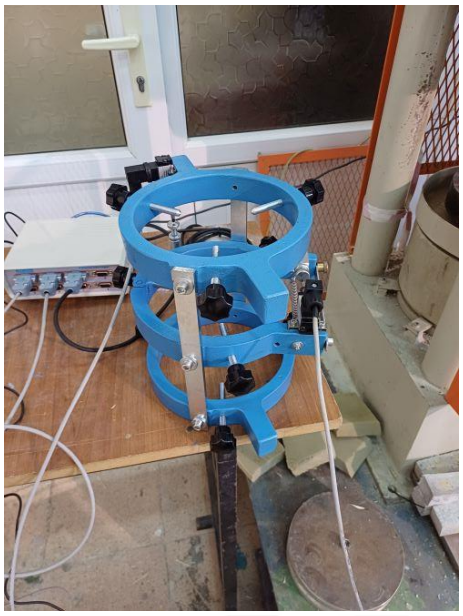
Araştırmada mıcır, kum, granül ikame, çimento, akışkanlaştırıcı ve yeteri kadar suyun karıştırılarak beton elde edilmesi betoniyer yardımıyla yapılmıştır. Betoniyere ait görüntü Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Beton üretiminde kullanılan betoniyer.

3.2.8. Kompressometre

Basınç dayanımı testlerinde üzerinde yatayda veya düşeyde yer değiştirme değerlerinin okunabilmesi için lineer potansiyometre cihazları bulunan ve betona sabitlenerek kullanılan kompressometre kullanılmıştır. Kompressometrenin görüntüsü Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Basınç dayanımı testlerinde kullanılan kompressometre.

3.2.9. Gerinim ölçer

Araştırmada numuneler içerisinde birim şekil değişikliği değerlerinin okunabilmesi için gerinim ölçerler (strain gauge) kullanılmıştır. Gerinim ölçerlerin görüntüsü Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Basınç dayanımı testlerinde kullanılan gerinim ölçer.

3.2.10. Veri toplama ünitesi

Basınç dayanımı testleri sırasında elde edilen yük ve yer değiştirme değerlerini eşzamanlı olarak bilgisayar ortamına aktaran statik veri toplama ünitesi kullanılmıştır. Statik veri toplama ünitesinin görüntüsü Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Basınç dayanımı testlerinde kullanılan veri toplama ünitesi.

3.3. Betonda PET İkamesi Deneyleri İçin Metot

Tez kapsamında betonda PET ikamesi deneyleri için kullanılan beton numunelerin üretimi, PET ikame maddesi yüzdelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. PET ikame malzemesi bulunmayan beton numuneler, basınç ve yarmada çekme dayanımı testleri için her biri 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde silindir numuneler olarak oluşturulmuşlardır. Eğilme dayanımı testleri için ise 10x10 cm en kesit boyutlarına ve 40 cm uzunluğa sahip numuneler üretilmiştir. İkamesiz referans beton numuneler oluşturulurken hedef dayanım olarak 25 Mpa belirlenmiştir. Buna bağlı olarak ikamesiz referans betonda kullanılan malzemelerin 1 m^3 için tarifi Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. 1 m^3 referans beton tarifi.

Malzeme	Kütle (kg)
Mıcır No.1	530
Mıcır No.2	530
Kum	730
Çimento	390
Su	195

10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğindeki silindir numuneler 1570.796 cm^3 yani yaklaşık olarak 0.001571 m^3 hacme sahiptir. Beton tarifinden hareketle her bir ikamesiz referans basınç ve yarmada çekme deneyi numunesi için yaklaşık olarak 1.67 kg 1 ve 2 numaralı mıcır, 1.15 kg kum ve 0.61 kg çimento kullanılmıştır. Eğilme deneylerinde ise her bir ikamesiz referans numune için yaklaşık olarak 4.24 kg 1 ve 2 numaralı mıcır, 2.92 kg kum ve 1.56 kg çimento kullanılmıştır.

Beton içerisindeki kum yerine farklı oranlarda PET atıkların ikamesi hacimsel olarak gerçekleştirilmiştir. Beton numuneler oluşturulurken kumun hacimce %10, %20 ve %30'u belirlenmiş ve PET granül malzeme ile ikame edilmiştir. Karışımdaki diğer bileşenler sabit tutularak ikameli beton numuneler elde edilmiştir.

Her bir numune için ayrı ayrı olarak karışım bileşenleri betoniyer içerisine atılmış ve yaklaşık 2 dakika boyunca betoniyer çalıştırılmıştır. Betoniyer ile karılarak oluşturulan betonun görüntüsü Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Oluşturulan betonun görüntüsü.

Betoniyerde oluşturulan betonlar çökme deneyine tabii tutulmuştur. Çökme deneyine başlamadan önce deneyin altında bulunan levha, deney hunisi ve deneyde kullanılan şiş kirlerden arındırılmış ve temizlenmiştir. Ardından betoniyerde üretilmiş olan beton malalar kullanılarak deney hunisine aktarılmıştır. Deney hunisinin yarısı beton ile doldurulduktan sonra doldurma işlemine ara verilmiş ve 25 defa deney şişi beton içerisine batırılmıştır. Bu işlemin ardından betonla doldurma işlemi deney hunisinin tamamı dolana kadar devam etmiş ve doldurma işlemi tamamlanınca 25 defa deney şişi tekrar beton içerisine batırılmıştır. Deney hunisinin üst seviyesi tesviye edilmiş ve huni yukarı doğru çekilerek beton serbest bırakılmıştır. Serbest kalan beton farklı yüksekliklerde çökmüştür. Deney hunisinin üst seviyesi ile betonun üst seviyesi arasındaki fark betonun çökme değerini vermiştir. Çökme deneyinin görüntüsü Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Çökme deneyi görüntüsü.

Betoniyerde oluşturulan betonlar basınç ve yarmada çekme deneyleri için silindir numune kalıplarına, eğilme deneyi için ise hazırlanmış olan kalıpların içerisine doldurularak priz almaya bırakılmıştır. Şekil 3.13'te kalıplara doldurulan betonların görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.13. Silindir beton numunelerin görüntüsü.

Prizini almış ve sertleşmiş olan betonlar kalıplardan çıkarılarak 28 gün boyunca duracakları kür havuzuna yerleştirilmişlerdir. Şekil 3.14'te kür havuzundaki betonların görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.14. Silindir beton numunelerin kür havuzundaki görüntüsü.

Deney numuneleri kür havuzunda 28 gün bekletildikten sonra çıkarılmıştır. Lifli polimer kumaşla çevrelenecek olan numuneler ayrılmış ve yüzeyleri temizlenerek epoksi uygulanmıştır. Ardından lifli polimer kumaşlar numunelerin çevresine yapıştırılmıştır. Lifli polimer kumaş uygulaması planlanan tüm beton numunelerde lifli polimer kumaş numunenin çevresinin tamamı boyunca uygulanmış ve 10 cm bindirme yapılmıştır. Lifli polimer kumaş ile ilgili sarılan beton numunelerden bazılarının görüntüleri Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.15. Lifli polimer kumaş ile sarılmış olan beton numuneler.

Malzeme deneyleri Sakarya Üniversitesi ve Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi laboratuvar imkanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı deneyinde silindir numuneler, eksenel ve yatay yönde şekil değişikliklerini ölçebilen potansiyometrelere sahip kompressometrelere yerleştirilmişlerdir. Numunelerin üzerine strain gaugeler yerleştirilmiştir. Numuneler kompressometreler ile birlikte hidrolik basınç makinesine alınarak 0.5 MPa hızla eksenel yönde yüklenmişlerdir.

Basınç dayanımı deneyleri için hazırlanan deney düzeneğinin görüntüsü Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16. Basınç dayanımı deneyi ile ilgili görüntü.

Yarmada çekme deneyinde silindir numuneler çekme kuvvetine maruz kalacak şekilde kafes mekanizması oluşturulmuştur. Numuneler basınç makinesine yatay olarak yerleştirilmiş ve 0.5 MPa hızla yüklenmişlerdir. Yarmada çekme dayanımı deneyleri için hazırlanan deney düzeneğinin görüntüsü Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.17. Yarmada çekme dayanımı deneyi ile ilgili görüntü.

Eğilme dayanımı deneyinde prizmatik numuneler 3 noktalı eğilme deneyine tabii tutulmuş ve yükleme hızı 5mm/dk olarak belirlenmiştir. Eğilme dayanımı deneyleri için hazırlanan deney düzeneğinin görüntüsü Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.18. Eğilme dayanımı deneyi ile ilgili görüntü.

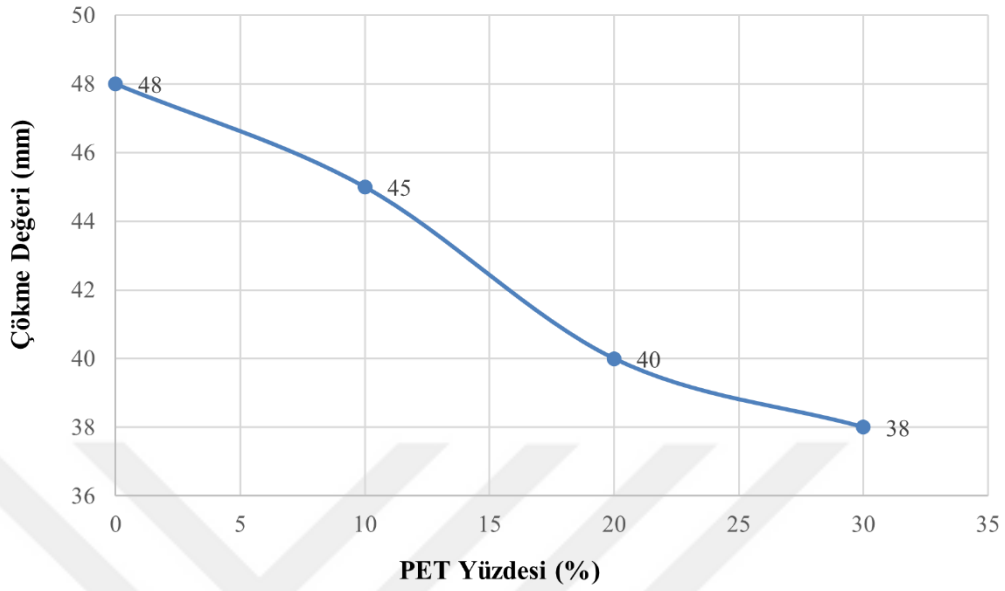
3.4. Betonda PET İkamesi Deneyleri İçin Deney Sonuçları

Tez kapsamında betonda PET ikamesi deneylerinde, farklı oranlarda PET ikame yüzdelerine sahip numuneler ile lifli polimer kumaşlarla donatılmış beton numuneler üretilmiştir. Bu numuneler, basınç dayanımı, çekme dayanımı ve eğilme dayanımı deneylerine tabii tutulmuş ve PET ikameli betonun mekanik özellikleri incelenmiştir. Deneylerden alınan veriler ile numuneler için gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri oluşturulmuş ve elastisite modülleri hesaplanmıştır. Ayrıca numunelerin yoğunlukları bulunmuş ve beton taze haldeyken çökme değerleri ölçülmüştür.

3.4.1. Çökme değerleri

Şekil 3.19'da yapılan çökme deneyleri sonuçları verilmiştir. Referans betonda çökme değeri 48 mm olarak ölçülmüştür. PET ikame oranı arttıkça çökme değerinde kademeli olarak düşüşler gözlenmiştir. Çökme değeri %10 PET ikamesi durumda %6.25

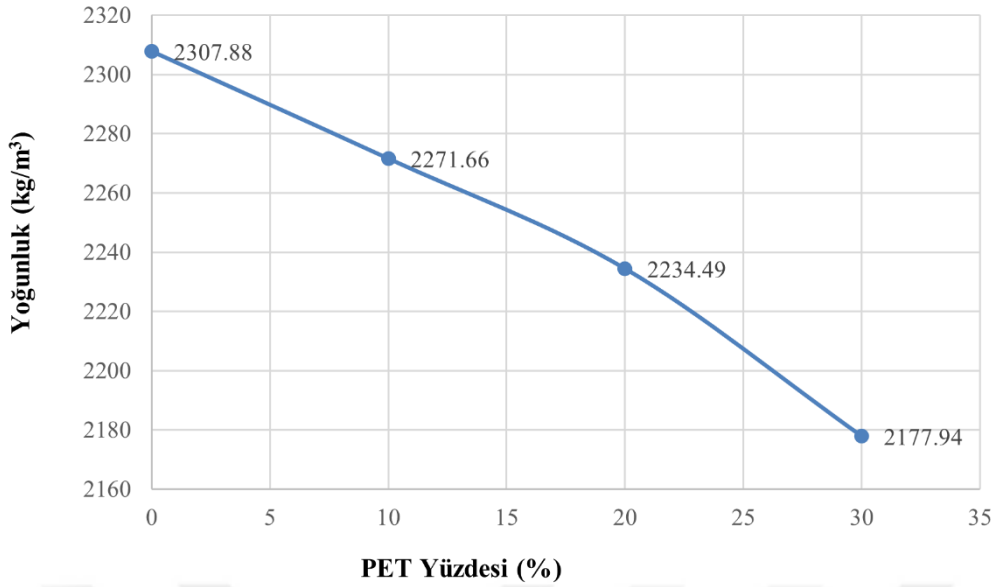
düşerek 45 mm değerine, %20 PET ikamesi durumda %16.67 düşerek 40 mm değerine, %30 PET ikamesi durumda %20.83 düşerek 38 mm değerine ulaşmıştır.



Şekil 3.19. Çökme değeri–PET yüzdesi grafiği.

3.4.2. Yoğunluk değerleri

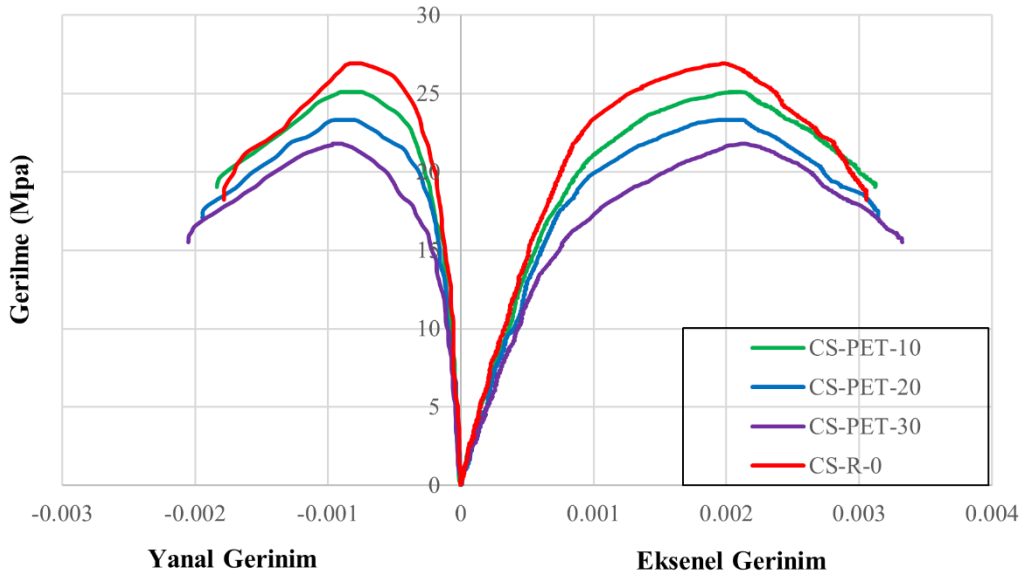
Şekil 3.20'de yapılan yoğunluk deneyleri sonuçları verilmiştir. Referans betonda yoğunluk değeri 2307.88 kg/m^3 olarak ölçülmüştür. PET ikame oranı arttıkça yoğunluk değerinde kademeli olarak düşüşler gözlenmiştir. Yoğunluk değeri %10 PET ikamesi durumda %1.57 düşerek 2271.66 kg/m^3 değerine, %20 PET ikamesi durumda %3.18 düşerek 2234.49 kg/m^3 değerine, %30 PET ikamesi durumda %5.63 düşerek 2177.94 kg/m^3 değerine ulaşmıştır.



Şekil 3.20. Yoğunluk–PET yüzdesi grafiği.

3.4.3. Betonda PET ikamesi deneyleri için basınç dayanımı deneyi sonuçları

Şekil 3.21'de FRP kullanılmayan numuneler üzerinde yapılan betonda PET ikamesi deneyleri için basınç dayanımı deneyleri sonucunda elde edilen grafikler verilmiştir. Referans betonda basınç dayanımı 26.91 MPa olarak ölçülmüştür. PET ikame oranı arttıkça basınç dayanımında düşüşler meydana gelmiştir. Basınç dayanımı %10 PET ikamesi durumda %6.68 düşerek 25.11 MPa değerine, %20 PET ikamesi durumda %13.36 düşerek 23.31 MPa değerine, %30 PET ikamesi durumda %18.99 düşerek 21.80 MPa değerine ulaşmıştır. Eksenel ve yanal gerinim değerleri, basınç dayanımının tersine olacak şekilde PET ikame oranının artmasıyla artmıştır. Eksenel gerinim değerleri %10, %20 ve %30 ikame durumu için sırasıyla %2.83, %7.58 ve %7.92 artmıştır. Yanal gerinim değerlerinde ise bu oranlar %2.95, %14.71 ve %21.50 olmuştur.



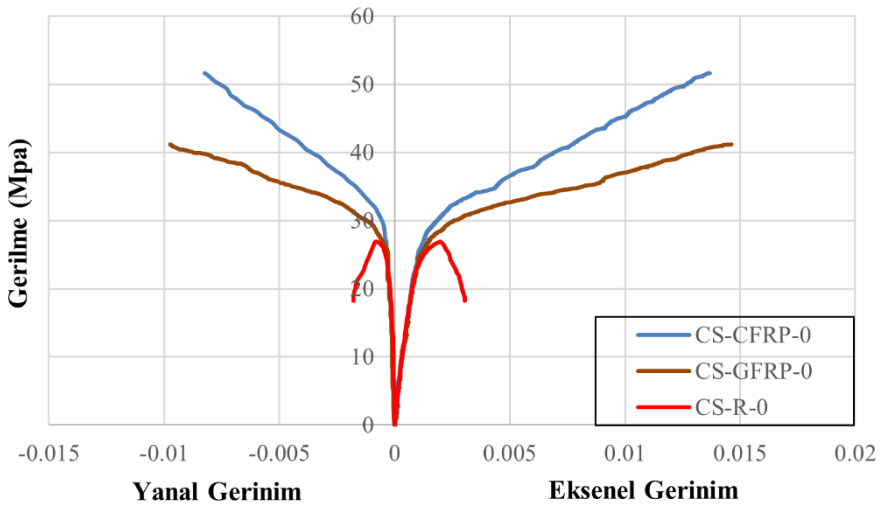
Şekil 3.21. FRP kullanılmayan numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için basınç dayanımı deneylerinden elden edilen gerilme-gerinim grafikleri.

FRP kullanılmayan numuneler üzerinde yapılan betonda PET ikamesi deneyleri için basınç deneylerinden elde edilen maksimum basınç dayanımları (f'_{co}), maksimum basınç dayanımındaki eksenel gerinim (ε_{co}) ve yanal gerinim (ε_{lo}) değerleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4. FRP kullanılmayan numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için basınç dayanımı deneyi sonuçları.

Numune ismi	Maksimum basınç dayanımı (MPa) (f'_{co})	Maksimum basınç dayanımındaki eksenel gerinim (ε_{co})	Maksimum basınç dayanımındaki yanal gerinim (ε_{lo})
CS-R-0	26.91	0.001967	0.000747
CS-PET-10	25.11	0.002023	0.000769
CS-PET-20	23.31	0.002116	0.000857
CS-PET-30	21.80	0.002123	0.000908

Şekil 3.22'de FRP kullanılan numunelerin ve referans numunenin betonda PET ikamesi deneyleri için basınç dayanımı deneylerinden elde edilen gerilme-gerinim grafikleri verilmiştir. Referans numunenin etrafına sarılan lifli polimer kumaşlar basınç dayanımında ve gerinim değerlerinde oldukça büyük bir etkiye sebep olmuştur. Referans numunenin dayanım değeri etrafına CFRP sarılması durumunda 26.91'den 1.92 katına çıkarak 51.63 değerine ulaşmıştır. GFRP sarılması durumunda 1.53 katına çıkarak 41.22 değerine ulaşmıştır. Eksenel gerinim değerleri CFRP sarılması durumunda 6.96 katına, GFRP sarılması durumda 7.43 katına çıkmıştır. Yanal gerinim değerleri ise CFRP ve GFRP için sırasıyla 11.03 ve 13.04 katına çıkmıştır.



Şekil 3.22. FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için basınç dayanımı deneylerinden elden edilen gerilme-gerinim grafikleri.

FRP kullanılan numuneler üzerinde yapılan betonda PET ikamesi deneyleri için basınç deneylerinden elde edilen maksimum basınç dayanımları (f'_{cc}), maksimum basınç dayanımındaki eksenel gerinim (ε_{cu}) ve yanal gerinim (ε_{lu}) değerleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5. FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için basınç dayanımı deneyi sonuçları.

Numune ismi	f'_{co} (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ε_{co}	ε_{cu}	ε_{lo}	ε_{lu}
CS-CFRP-0	26.91	51.63	0.001967	0.013691	0.000747	0.008236
CS-GFRP-0	26.91	41.22	0.001967	0.014616	0.000747	0.009741

3.4.4. Betonda PET ikamesi deneyleri için yarmada çekme dayanımı deneyi sonuçları

Tablo 3.6'da yapılan betonda PET ikamesi deneyleri için yarmada çekme dayanımı deneyinin sonuçları verilmiştir. Referans betonun yarmada çekme dayanımı 2.46 MPa olarak bulunmuştur. PET ikame oranının artması yarmada çekme dayanımı değerinde düşüşlere sebep olmuştur. Yarmada çekme dayanımı değeri %10 PET ikamesi durumda %4.47 düşerek 2.35 MPa değerine, %20 PET ikamesi durumda %8.93 düşerek 2.24 MPa değerine, %30 PET ikamesi durumda %12.11 düşerek 2.16 MPa değerine ulaşmıştır. FRP kullanımının olumlu etkisi basınç dayanımı testlerinde olduğu gibi yarmada çekme dayanım testlerinde de görülmüştür. Referans numunenin yarmada çekme dayanımı CFRP kullanılması sayesinde 3.61 MPa değerine, GFRP kullanılması sayesinde 3.16 MPa değerine ulaşmıştır.

Tablo 3.6. Numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için yarmada çekme dayanımı deneyi sonuçları.

Numune ismi	Yarmada çekme dayanımı (MPa)
CS-R-0	2.46
CS-PET-10	2.35
CS-PET-20	2.24
CS-PET-30	2.16
CS-CFRP-0	3.61
CS-GFRP-0	3.16

3.4.5. Betonda PET ikamesi deneyleri için eğilme dayanımı deneyi sonuçları

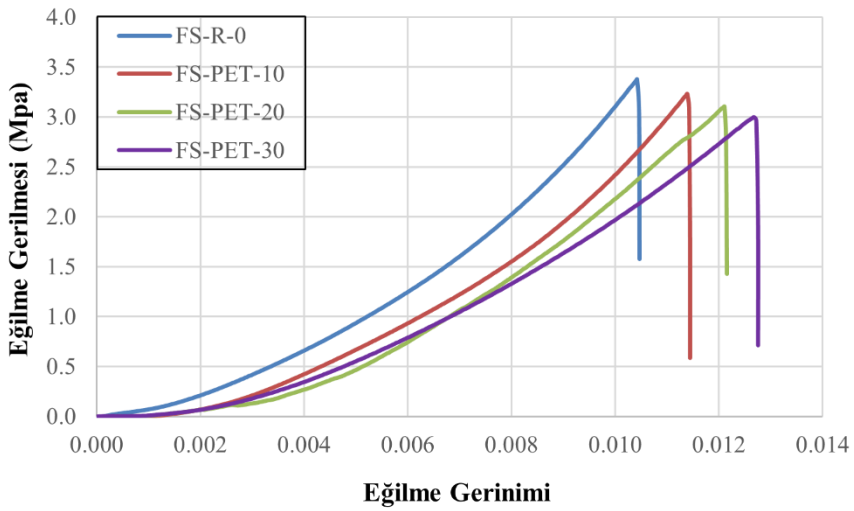
Eğilme dayanımı deneylerinden elde edilen veriler ile bir ekseni eğilme gerilmesi olan diğer ekseni eğilme gerinimi olan grafikler oluşturulmuştur. Eğilme gerilmesinin formülü Denklem 3.1'de, eğilme geriniminin formülü Denklem 3.2'de verilmiştir.

$$f_r = \frac{3FL}{2bd^2} \tag{3.1}$$

$$\varepsilon_r = \frac{6\mathrm{Dd}}{L^2} \tag{3.2}$$

Denklem 3.1 ve Denklem 3.2'de f_r numunelerin eğilme dayanımını, ε_r numunelerin eğilme gerinimini, F yükü, L mesnetler arasındaki mesafeyi, b numunelerin genişliğini, d numunelerin yüksekliğini, D numunelerin deplasmanını temsil etmektedir.

Şekil 3.23'te FRP kullanılmayan numuneler üzerinde yapılan betonda PET ikamesi deneyleri için eğilme dayanımı deneyleri sonucunda elde edilen grafikler verilmiştir. Referans betonda eğilme dayanımı 3.37 MPa olarak ölçülmüştür. PET ikame oranı arttıkça eğilme dayanımında düşüşler meydana gelmiştir. Eğilme dayanımı %10 PET ikamesi durumda %4.18 düşerek 3.23 MPa değerine, %20 PET ikamesi durumda %7.98 düşerek 3.10 MPa değerine, %30 PET ikamesi durumda %11.17 düşerek 3.00 MPa değerine ulaşmıştır. Maksimum gerinim değerleri PET ikame oranının artmasıyla artmıştır. Maksimum gerinim %10, %20 ve %30 ikame durumları için sırasıyla %9.36, %16.16 ve %21.90 artmıştır.



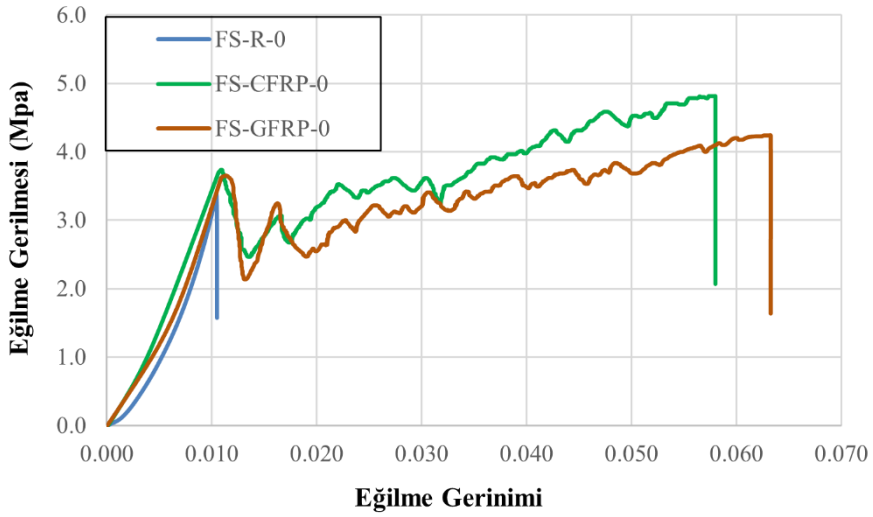
Şekil 3.23. FRP kullanılmayan numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için eğilme dayanımı deneylerinden elden edilen gerilme-gerinim grafikleri.

Tablo 3.7'de FRP kullanılmayan numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için eğilme dayanımı deneylerinden elde edilen maksimum eğilme dayanımları ve maksimum gerinim değerleri verilmiştir.

Tablo 3.7. FRP kullanılmayan numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için eğilme dayanımı deneyi sonuçları.

Numune ismi	Maksimum eğilme dayanımı (MPa)	Maksimum eğilme gerinimi
CS-R-0	3.37	0.010467
CS-PET-10	3.23	0.011447
CS-PET-20	3.10	0.012158
CS-PET-30	3.00	0.012759

Şekil 3.24'te FRP kullanılan numuneler ve referans numunenin betonda PET ikamesi deneyleri için eğilme deneyinden elde edilen eğilme gerilmesi-eğilme gerinimi grafikleri verilmiştir. Referans numunenin eğilme dayanımı değeri etrafına CFRP sarılması durumunda 1.43 katına çıkarak 4.81 MPa değerine ulaşmıştır. GFRP sarılması durumunda 1.26 katına çıkarak 4.24 MPa değerine ulaşmıştır. Maximum eğilme gerinimi değerleri ise CFRP sarılması durumunda 5.54 katına, GFRP sarılması durumda 6.04 katına çıkmıştır.



Şekil 3.24. FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için eğilme dayanımı deneylerinden elden edilen gerilme-gerinim grafikleri.

Tablo 3.8'de FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için eğilme dayanımı deneylerinden elde edilen maksimum eğilme dayanımları ve maksimum gerinim değerleri verilmiştir.

Tablo 3.8. FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için eğilme dayanımı deneyi sonuçları.

Numune ismi	Maksimum eğilme dayanımı (MPa)	Maksimum eğilme gerinimi
CS-CFRP-0	4.81	0.058003
CS-GFRP-0	4.24	0.063253

3.4.6. Betonda PET ikamesi deneyleri için elastisite modülü ve poisson oranı değerleri

Tablo 3.9'da betonda PET ikamesi deneyleri için basınç dayanımı deneyinin grafiklerinden elde edilen numunelerin elastisite modülleri (E_1) verilmiştir. Referans betonun elastisite modülü 30574.17 MPa olarak bulunmuştur. PET ikame oranının artması elastisite modülünü düşürmüştür. Elastisite modülü %10 PET ikamesi durumda %10.96 düşerek 27221.85 MPa değerine, %20 PET ikamesi durumda %18.03 düşerek 25061.49 MPa değerine, %30 PET ikamesi durumda %30.27 düşerek 21320.87 MPa değerine ulaşmıştır. Referans numunenin elastisite modülü CFRP kullanılmasıyla 30985.95 MPa değerine, GFRP kullanılmasıyla 30743.93 MPa değerine ulaşmıştır. Grafiğin ikinci kısmındaki eğimler (E_2) ise CFRP kullanılması durumunda 1867.04, GFRP kullanılması durumunda 1027.18 değerinde olmuştur.

Tablo 3.9. Numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için basınç dayanımı deneylerinden elde edilen elastisite modülü değerleri.

Numune ismi	Elastisite modülü (MPa) (E_1)	Grafiğin ikinci kısmındaki eğim (MPa) (E_2)
CS-R-0	30574.17	-
CS-PET-10	27221.85	-
CS-PET-20	25061.49	-
CS-PET-30	21320.87	-
CS-CFRP-0	30985.95	1867.04
CS-GFRP-0	30743.93	1027.18

Numunelerin poisson oranlarının (ν) elde edilmesinde kullanılan değerler elastisite modülünün tayinindekine benzer şekilde basınç dayanımı deneyinin grafiklerinden elde edilmiştir. Numunelerin basınç dayanımlarının %40'ına karşılık gelen eksenel ve yanal gerinim değerleri kullanılarak poisson oranları belirlenmiştir. Tablo 3.10'da betonda PET ikamesi deneyleri için basınç dayanımı deneyinin grafiklerinden elde edilen numunelerin poisson oranları verilmiştir.

Tablo 3.10. Numunelerin betonda PET ikamesi deneyleri için basınç dayanımı deneylerinden elde edilen poisson oranı değerleri.

Numune ismi	Maksimum basınç dayanımı (MPa) (f'_{co})	Maksimum basınç dayanımının %40'ı (MPa)	Maksimum basınç dayanımının %40'ındaki yanal gerinim	Maksimum basınç dayanımının %40'ındaki eksenel gerinim	Poisson oranı (ν)
CS-R-0	26.91	10.76	0.00006833	0.00035203	0.194107
CS-PET-10	25.11	10.04	0.00007194	0.00036898	0.194967
CS-PET-20	23.31	9.33	0.00007322	0.00037211	0.196780
CS-PET-30	21.80	8.72	0.00008079	0.00040895	0.197558
CS-CFRP-0	28.93*	11.57	0.00007005	0.00037349	0.187560
CS-GFRP-0	28.02*	11.21	0.00006993	0.00036456	0.191813

*Grafiğin birinci eğimi dikkate alındığında elde edilen maksimum basınç dayanımı.

4. BETONDA PET İKAMESİ VE FRP SARGI DENEYLERİ

18 adet betonda PET ikamesi deneylerinden elde edilen sonuçlar, ikame maddesinin yüzdeleri göz önüne alınarak yorumlanmış ve 6 adet betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri gerçekleştirilmiştir.

4.1. Betonda PET İkamesi ve FRP Sargı Deneyleri İçin Tasarım

Betonda PET ikamesi deneyleri için basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımı deneylerinden alınan veriler çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan TOPSIS metodu kullanılarak optimize edilmiştir.

TOPSIS metodu, çok kriterli karar verme problemlerinde alternatiflerin sıralanması ve en uygun seçeneğin belirlenmesi için kullanılan güçlü bir analiz aracıdır. TOPSIS metodunun işlem adımlarının sonucunda ikame maddesi için metodun önerdiği en uygun yüzde belirlenmiştir. Belirlenen yüzdeye sahip numunelerin etrafları lifli polimerler ile sarılarak hem PET granül ikameli hem de lifli polimerler ile sarılan yeni deney numuneleri oluşturulmuştur. TOPSIS metodu birkaç adımdan oluşmaktadır. Uygulama adımları aşağıda verilmiştir (Hwang ve Yoon, 1981).

TOPSIS metodunda birinci adımı satırları karar seçenekleri olan, sütunları ise değerlendirme kriterleri olan karar matrisini oluşturmaktır.

Karar matrisi Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Karar matrisi.

İkame maddesi yüzdesi	Basınç dayanımı	Yarmada çekme dayanımı	Eğilme dayanımı
10	25.11	2.35	3.23
20	23.31	2.24	3.10
30	21.80	2.16	3.00

İkinci adım olarak karar matrisindeki değerlendirmeye esas olan sütunlardaki değerlerin kareleri alınır ve toplamın karekökü elde edilir. Değerlendirmeye esas olan sütundaki değer, karelerin toplamının karekökünden çıkan değere bölünür. Bu şekilde elde edilen matrise normalize karar matrisi denir.

Normalize karar matrisi Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Normalize karar matrisi.

İkame maddesi yüzdesi	Basınç dayanımı	Yarmada çekme dayanımı	Eğilme dayanımı
10	0.618333	0.602649	0.599353
20	0.574008	0.57444	0.57523
30	0.536824	0.553924	0.556674

Üçüncü adımda değerlendirmeye esas olan sütunlar için ağırlık değerleri belirlenir. Ve sütundaki değerler ağırlık değerleriyle çarpılarak ağırlıklı normalize karar matrisi elde edilir. Ağırlık normalize karar matrisi Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Ağırlıklı normalize karar matrisi.

Ağırlık	0.5	0.2	0.3
İkame maddesi yüzdesi	Basınç dayanımı	Yarmada çekme dayanımı	Eğilme dayanımı
10	0.309166	0.12053	0.179806
20	0.287004	0.114888	0.172569
30	0.268412	0.110785	0.167002

Dördüncü adımda ağırlıklı normalize karar matrisindeki değerlendirmeye esas olan sütunlar için pozitif ideal çözüm değerleri ile negatif ideal çözüm değerleri bulunur. Pozitif ideal ve negatif ideal çözüm değerleri Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Pozitif ideal ve negatif ideal çözüm değerleri.

Ağırlık	0.5	0.2	0.3
İkame maddesi yüzdesi	Basınç dayanımı	Yarmada çekme dayanımı	Eğilme dayanımı
10	0.309166	0.12053	0.179806
20	0.287004	0.114888	0.172569
30	0.268412	0.110785	0.167002
Pozitif İdeal	0.309166	0.12053	0.179806
Negatif İdeal	0.268412	0.110785	0.167002

Beşinci adımda Tablo 4.4'te bulunan değerlendirmeye esas olan sütunlardaki değerler önce pozitif ideal çözüm değerlerinden çıkartılarak bulunan değerlerin karesi alınır. Ardından her bir karar seçeneğinin bulunduğu satırdaki kare değerleri kendi satırında toplanır. Bu şekilde karar seçenekleri için pozitif ideal çözüm değerlerine olan uzaklıklar bulunmuş olur. Daha sonra Tablo 4.4'te bulunan değerlendirmeye esas olan sütunlardaki değerler negatif ideal çözüm değerlerinden çıkartılarak bulunan değerlerin karesi alınır. Ardından her bir karar seçeneğinin bulunduğu satırdaki kare değerleri kendi satırında toplanır. Bu şekilde karar seçenekleri için negatif ideal çözüm değerlerine olan uzaklıklar bulunmuş olur. Pozitif ve negatif ideal çözüm değerlerine olan uzaklıklar Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5. Pozitif ideal ve negatif ideal çözüm değerlerine olan uzaklıklar.

İkame maddesi yüzdesi	Pozitif ideal çözüme uzaklık	Negatif ideal çözüme uzaklık
10	0	0.001672
20	0.000495	0.000347
30	0.001672	0

Altıncı adımda her bir karar seçeneğinin bulunduğu satırdaki negatif ideal çözüme uzaklık değerleri, negatif ve pozitif ideal çözüme olan uzaklık değerlerinin toplamına bölünerek bulunan değer kendi satırına yazılır. Bu şekilde ideal çözüme göreli yakınlık değerleri bulunmuş olur. İdeal çözüme göreli yakınlık değerleri Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6. İdeal çözüme göreli yakınlık değerleri.

İkame maddesi yüzdesi	İdeal çözüme göreli yakınlık
10	1
20	0.412437
30	0

Yapılan değerlendirmede tez kapsamında yapılmış olan PET atık ikameli beton numunelerin malzeme deneylerinde %10 ikame malzemesine sahip olan numunelerin ideal çözüme göreli olarak yakınlıkları daha yüksek olduğu için optimum ikame maddesi yüzdesi %10 olarak seçilmiştir.

Betonda PET ikamesi deneylerinin ardından yapılan betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneylerinde kullanılan hem granül ikameli hem de lifli polimerler ile sarılmış olan beton numunelerin isimlendirmesi Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.7. Betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri isimlendirmesi.

İkame maddesi	İkame maddesi yüzdesi	Tabii olunacak deney	Numune ismi
PET-CFRP	10	Basınç dayanımı	CS-PET-CFRP-10
PET-CFRP	10	Yarmada çekme dayanımı	STS-PET-CFRP-10
PET-CFRP	10	Eğilme dayanımı	FS-PET-CFRP-10
PET-GFRP	10	Basınç dayanımı	CS-PET-GFRP-10
PET-GFRP	10	Yarmada çekme dayanımı	STS-PET-GFRP-10
PET-GFRP	10	Eğilme dayanımı	FS-PET-GFRP-10

4.2. Betonda PET İkamesi ve FRP Sargı Deneyleri İçin Materyal

Betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneylerinde kullanılan deney materyalleri betonda PET ikamesi deneylerinde kullanılan deney materyalleri ile tamamen aynıdır. Bölüm 3.2'de verilen tüm detaylar betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için de geçerlidir.

4.3. Betonda PET İkamesi ve FRP Sargı Deneyleri İçin Metot

Betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneylerinde uygulanan deney metotları betonda PET ikamesi deneylerinde kullanılan deney metotları ile benzerlik göstermektedir. Bölüm 3.3'te verilen detaylar betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için de geçerlidir.

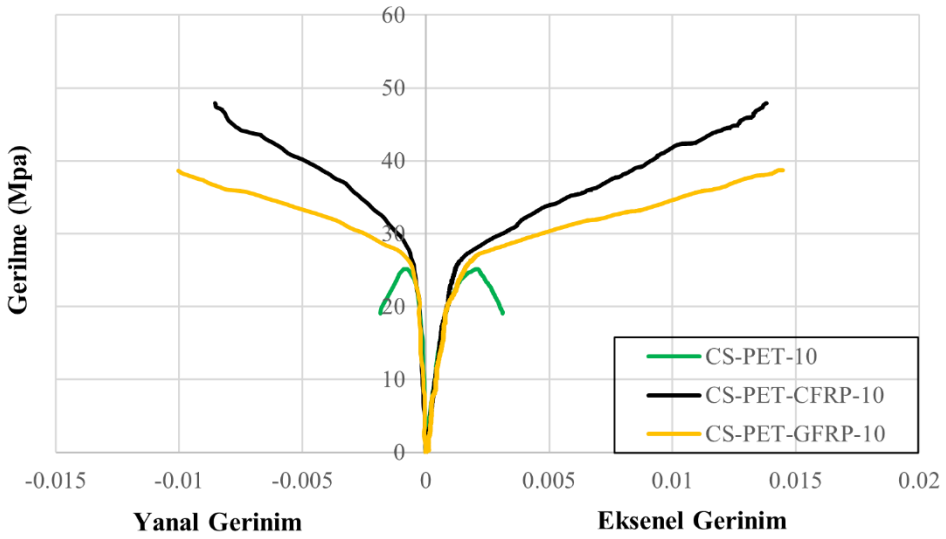
Betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneylerinde uygulanan deney düzenekleri betonda PET ikamesi deneylerinde kullanılan deney düzenekleri ile tamamen aynıdır. Bölüm 3.3'te verilen tüm detaylar betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için de geçerlidir.

4.4. Betonda PET İkamesi ve FRP Sargı Deneyleri İçin Deney Sonuçları

Tez kapsamında betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneylerinde, hem %10 PET ikamesi yüzdesine sahip hem de lifli polimer kumaşlarla sarılmış beton numuneler üretilmiştir. Bu numuneler, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı deneylerine tabii tutulmuş ve hem PET ikameli hem de lifli polimerler ile çevrelenmiş betonun mekanik özellikleri incelenmiştir. Deneylerden alınan veriler ile numuneler için gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri oluşturulmuş ve elastisite modülleri hesaplanmıştır.

4.4.1. Betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için basınç dayanımı deneyi sonuçları

Şekil 4.1'de %10 PET ikameli numunenin ve FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için basınç dayanımı testleri sonucunda elde edilen gerilme-gerinim grafikleri verilmiştir. %10 PET ikameli numunenin etrafına sarılan lifli polimer kumaşlar basınç dayanımında ve gerinim değerlerinde oldukça büyük bir etkiye sebep olmuştur. %10 PET ikameli numunenin dayanım değeri, referans numuneye göre düşük olmasına rağmen, etrafına sarılan CFRP ve GFRP ile referans numunenin dayanım değerinin üzerine çıkmıştır. %10 PET ikameli numunenin dayanım değeri etrafına CFRP sarılması durumunda 25.11'den 1.91 katına çıkarak 47.86 değerine ulaşmıştır. GFRP sarılması durumunda 1.54 katına çıkarak 38.66 değerine ulaşmıştır. Eksenel gerinim değerleri CFRP sarılması durumunda 6.83 katına, GFRP sarılması durumda 7.15 katına çıkmıştır. Yanal gerinim değerleri ise CFRP ve GFRP için sırasıyla 11.10 ve 13.04 katına çıkmıştır.



Şekil 4.1. FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için basınç dayanımı deneylerinden elden edilen gerilme-gerinim grafikleri.

FRP kullanılan numuneler üzerinde yapılan betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için basınç deneylerinden elde edilen maksimum basınç dayanımları (f'_{cc}), maksimum basınç dayanımındaki eksenel gerinim (ε_{cu}) ve yanal gerinim (ε_{lu}) değerleri Tablo 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.8. FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için basınç dayanımı deneyi sonuçları.

Numune ismi	f'_{co} (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ε_{co}	ε_{cu}	ε_{lo}	ε_{lu}
CS-PET-CFRP-10	25.11	47.86	0.002023	0.013819	0.000769	0.008538
CS-PET-GFRP-10	25.11	38.66	0.002023	0.014469	0.000769	0.010028

4.4.2. Betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için yarmada çekme dayanımı deneyi sonuçları

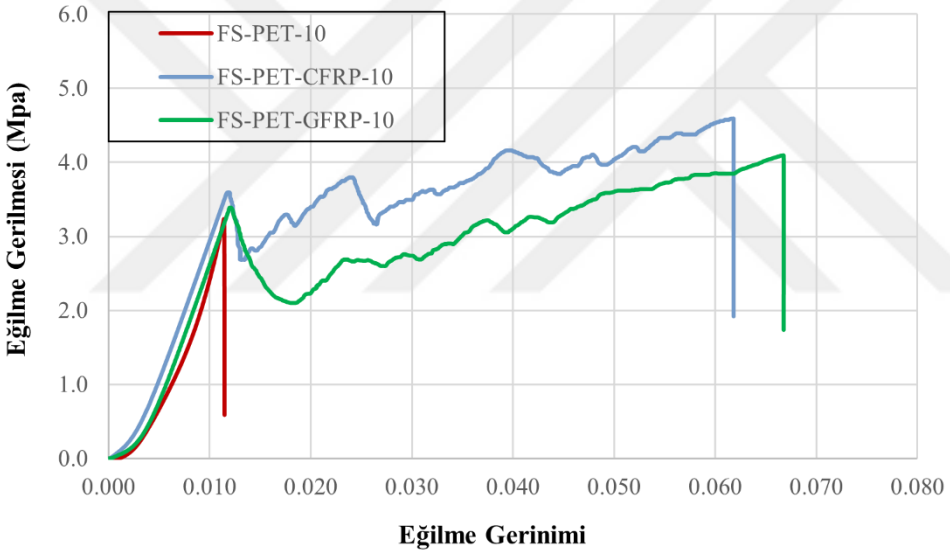
Tablo 4.9'da yapılan betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için yarmada çekme dayanımı deneyinin sonuçları verilmiştir. FRP kullanımının olumlu etkisi basınç dayanımı testlerinde olduğu gibi yarmada çekme dayanım testlerinde de görülmüştür. %10 PET ikameli numunelerin yarmada çekme dayanımları 2.35 MPa olarak bulunmuştu. Bu değer CFRP kullanılması sayesinde 3.45 MPa değerine, GFRP kullanılması sayesinde 3.04 MPa değerine ulaşmıştır.

Tablo 4.9. FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için yarmada çekme dayanımı deneyi sonuçları.

Numune ismi	Yarmada çekme dayanımı (MPa)
CS-PET-CFRP-10	3.45
CS-PET-GFRP-10	3.04

4.4.3. Betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için eğilme dayanımı deneyi sonuçları

Şekil 4.2'de %10 PET ikameli numunenin ve FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için eğilme dayanımı testleri sonucunda elde edilen eğilme gerilmesi-eğilme gerinimi grafikleri verilmiştir. %10 PET ikameli numune etrafına sarılan CFRP ve GFRP sayesinde basınç ve yarmada çekme dayanımında olduğu gibi eğilme dayanımında da referans numuneyi geçmeyi başarmıştır. %10 PET ikameli numunenin eğilme dayanım değeri etrafına CFRP sarılması durumunda 1.42 katına çıkarak 4.59 MPa değerine ulaşmıştır. GFRP sarılması durumunda 1.27 katına çıkarak 4.09 MPa değerine ulaşmıştır. Maksimum eğilme gerinimi değerleri ise CFRP sarılması durumunda 5.40 katına, GFRP sarılması durumda 5.84 katına çıkmıştır.



Şekil 4.2. FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için eğilme dayanımı deneylerinden elden edilen gerilme-gerinim grafikleri.

Tablo 4.10'da FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için eğilme dayanımı deneylerinden elde edilen maksimum eğilme dayanımı ve gerinimi değerleri verilmiştir.

Tablo 4.10. FRP kullanılan numunelerin betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için eğilme dayanımı deneyi sonuçları.

Numune ismi	Maksimum eğilme gerilmesi (MPa)	Maksimum eğilme gerinimi
CS-PET-CFRP-10	4.59	0.061819
CS-PET-GFRP-10	4.09	0.066795

4.4.4. Betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için elastisite modülü ve poisson oranı değerleri

Tablo 4.11'de betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için basınç dayanımı deneyinin grafiklerinden elde edilen numunelerin elastisite modülleri verilmiştir. FRP kullanımı %10 PET ikameli numunenin elastisite modülünü arttırmış fakat referans numunenin değeri yakalanamamıştır. %10 PET ikameli numunenin elastisite modülleri 27221.85 MPa değerinden CFRP kullanılmasıyla 27512.26 MPa değerine, GFRP kullanılmasıyla 27465.83 MPa değerine ulaşmıştır. Grafiğin ikinci kısmındaki eğimler ise CFRP kullanılması durumunda 1704.56, GFRP kullanılması durumunda 988.90 değerinde olmuştur.

Tablo 4.11. Numunelerin betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için basınç dayanımı deneylerinden elde edilen elastisite modülü değerleri.

Numune ismi	Elastisite modülü (MPa) (E_1)	Grafiğin ikinci kısmındaki eğim (MPa) (E_2)
CS-PET-CFRP-10	27512.26	1704.56
CS-PET-GFRP-10	27465.83	988.90

Numunelerin poisson oranlarının (ν) elde edilmesinde kullanılan değerler elastisite modülünün tayinindekine benzer şekilde basınç dayanımı deneyinin grafiklerindeki birinci eğim dikkate alınarak elde edilmiştir. Numunelerin basınç dayanımlarının %40'ına karşılık gelen eksenel ve yanal gerinim değerleri kullanılarak poisson oranları belirlenmiştir. Tablo 4.12'de betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için basınç dayanımı deneyinin grafiklerinden elde edilen numunelerin poisson oranları verilmiştir.

Tablo 4.12. Numunelerin betonda PET ikamesi ve FRP sargı deneyleri için basınç dayanımı deneylerinden elde edilen poisson oranı değerleri.

Numune ismi	Maksimum basınç dayanımı (MPa) (f'_{co})	Maksimum basınç dayanımının %40'ı (MPa)	Maksimum basınç dayanımının %40'ındaki yanal gerinim	Maksimum basınç dayanımının %40'ındaki eksenel gerinim	Poisson oranı (ν)
CS-PET-CFRP-10	27.02*	10.81	0.00007412	0.00039280	0.188687
CS-PET-GFRP-10	26.15*	10.46	0.00007326	0.00038090	0.192339

*Grafiğin birinci eğimi dikkate alındığında elde edilen maksimum basınç dayanımı.

5. MALZEME DENEYLERİ İÇİN VERİ TABANI VE MODEL GELİŞTİRME

Bu bölümde literatürden PET ikameli beton için deneysel veri tabanı toplanmış ve bu çalışmanın sonuçları veri tabanına eklenmiştir. Toplanan veri tabanı üzerinden PET ikameli betonun çeşitli özellikleri için model önerisinde bulunulmuştur. Önerilen geliştirilmiş modeller ve daha önce önerilmiş olan modellerin uygulanabilirliği kontrol edilmiştir. Tablo 5.1'de modellerin önerdiği sonuçların deneysel sonuçlar ile uyumunun nasıl olduğu hesaplamaya yarayan istatiksel metrikler ve bunların açıklamaları verilmiştir. Tablo 5.1'de R^2 (belirleme katsayısı), MABE (ortalama mutlak sapma hatası) ve MAPE (ortalama mutlak yüzde hatası) değerleri hesaplanırken exp_i deneysel sonuçları, mod_i modelin tahminini, $\overline{exp_i}$ deneysel sonuçların ortalamasını ifade etmektedir (Ağbulut ve ark, 2021; Bakır ve ark, 2022; Kazemi ve ark, 2024).

Tablo 5.1. İstatiksel metrikler.

Metrikler	Denklemler	Bilgi
R^2	$\left(\frac{\sum(exp_i - \overline{exp_i})\,(mod_i - \overline{mod_i})}{\sqrt{\sum(exp_i - \overline{exp_i})^2 \sum(mod_i - \overline{mod_i})^2}}\right)^2$	Bu yöntem, bir modelin ölçülen verileri ne kadar iyi tahmin ettiğini gösterir. R^2 değeri 0 ile 1 arasındadır. 1'e yakın bir değer daha iyi performansı gösterir.
MABE	$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\lvert mod_i - exp_i\rvert$	MABE korelasyonun kalitesini yansıtır. Sıfıra yakın bir değer tercih edilir. Tahmin modellerinin uzun vadeli performansına ilişkin fikir verir.
MAPE	$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left\lvert\frac{exp_i - mod_i}{exp_i}\right\rvert \times 100$	MAPE, gerçek veri değerlerine göre mutlak tahmin hatalarının ortalama yüzdesini ölçer. Daha düşük bir MAPE değeri daha iyi bir model performansını gösterir.

5.1. PET İkameli Beton

Çalışmada PET ikameli beton için elde edilen sonuçlar literatürde yer alan daha önceki deneysel veriler ile birleştirilmiş ve toplu şekilde EK A'da bulunan Tablo A.1'de verilmiştir. EK A'da bulunan Tablo A.1 oluşturulurken aşağıdaki ayrıntılar dikkate alınmıştır:

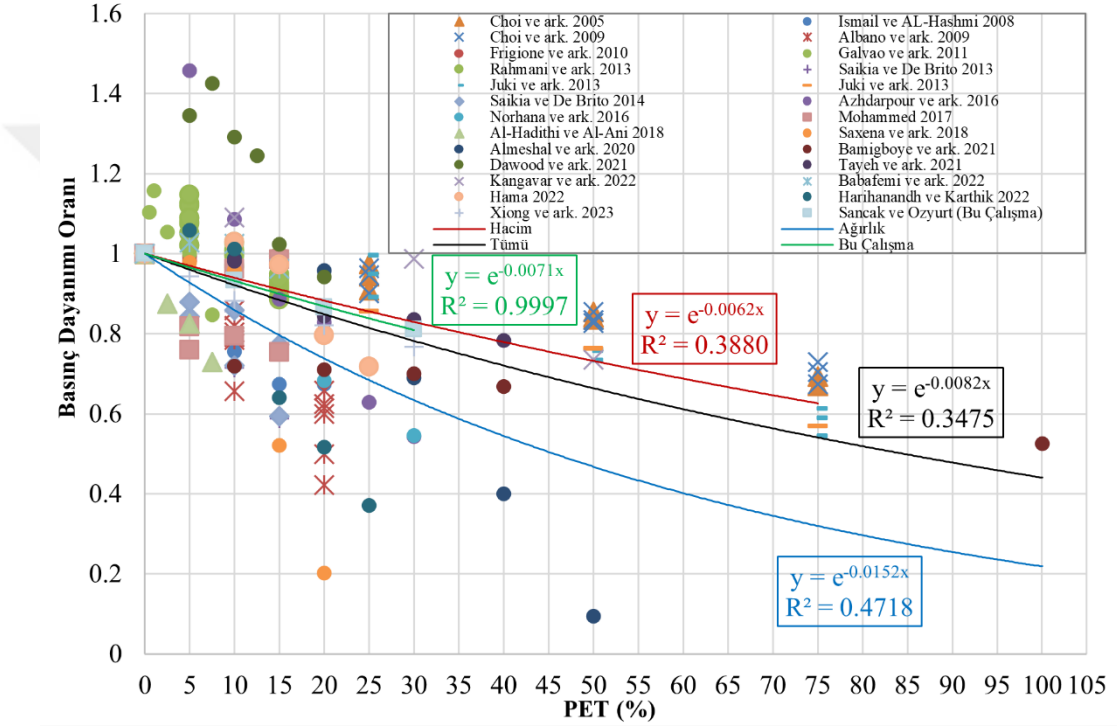
- Sadece ince agrega ikamesi yapılan çalışmalar dikkate alınmış, iri agrega ikamesi dikkate alınmamıştır
- Sadece granül halde ikame yapılan çalışmalar kullanılmış, fiber halde ikame yapılan çalışmalar kullanılmamıştır

- Sadece beton numuneler tabloya eklenmiş, harç numuneler ve kendiliğinden yerleşen beton numuneleri eklenmemiştir
- Sadece PET ikamesinin yapıldığı numuneler kullanılmış, herhangi bir diğer plastik türü kullanılmamıştır
- Yapılan ikameler hacimce ve ağırlıkça olmak üzere ikiye ayrılmıştır
- Deneyler gerçekleştirilirken kullanılan numune ebatlarına tabloda yer verilmiştir. Eğer numune ebatlarından bahsedilmemiş ve uyulan standarttan bahsedilmiş ise uyulan standart tabloya eklenmiştir
- Kullanılan PET malzemenin özgül ağırlığı (specific gravity) ve yoğunluğu (bulk density) tabloda yer almaktadır
- PET malzemenin boyutları tabloya eklenmiştir
- PET ikame yüzdesi tabloda yer almaktadır
- Oluşturulan betonun yoğunluk değerleri tabloda bulunmaktadır
- Eğer çalışma içerisinde taze (fresh) ve kuru yoğunluk (dry density) birlikte verilmiş ise sadece kuru yoğunluk alınmıştır
- Beton oluşturulurken kullanılan su/çimento (s/ç) oranı tabloda yer almaktadır
- Basınç, yarmada çekme ve eğilme deneyleri için sadece 28 günlük veriler toplanmış ve tabloya eklenmiştir
- Basınç ve yarmada çekme dayanımlarında eğer küp numuneler kullanılmış ise 0.8 ile çarpılarak silindir dayanımları bulunup tabloda ayrı bir sütuna yazılmıştır
- Numunelerin elastisite modülleri tabloda bulunmaktadır
- Slump deney sonuçları tabloda yer almaktadır.

Literatürde betonda PET ikamesini konu alan geçmiş yıllara ait çalışmaların bazılarında betonun mekanik özellikleri için modeller öne sürülmüştür. Oluşturulan deneysel veri tabanı içerisindeki değerler betonun çeşitli özellikler için öne sürülen modellerden esinlenerek grafikler haline getirilmiştir. Oluşturulan grafiklerden eğilim çizgisi aracılığıyla çeşitli denklemler elde edilmiş ve yeni geliştirilmiş modeller önerilmiştir. Önerilen modeller literatürdeki öne sürülen modeller ile birlikte analiz edilmiş ve uygulanabilirliği kontrol edilmiştir.

5.1.1. Basınç dayanımı için model geliştirme

EK A'da bulunan Tablo A.1'de literatür içerisindeki deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen basınç dayanımı değerleri verilmiştir. PET ikamesinin basınç dayanımı üzerindeki etkisini daha iyi görebilmek için PET ikameli numunelerin basınç dayanımları referans numunenin basınç dayanımına bölünmüştür. Bulunan basınç dayanımı oranlarını dikey eksen, PET ikame yüzdelerini yatay eksen kabul ederek verilerin basınç dayanımı grafiği oluşturulmuştur. Oluşturulan grafik Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Basınç dayanımı oranı–PET yüzdesi grafiği.

Grafik içerisinde eğilim çizgisi yardımıyla hacim ikamesi için, ağırlık ikamesi için, bu çalışmanın deneysel verileri için ve hepsi için model önerileri oluşturulmuştur. Eğilim çizgisinin üstel olarak çizilmesi halinde daha doğru sonuçlar alınabildiği görülmüştür. Daha önceki çalışmalarda önerilen modellerde çoğunlukla doğrusal denklemler verilmiştir. Bu durum dikkate alınarak tüm sonuçlar hem doğrusal hem de üstel olarak hesaplanmış ve geliştirilmiş modeller olarak önerilmiştir.

Tablo 5.2'de elde edilen denklemler ve geliştirilen modeller verilmiştir. Tablo 5.2'de f'_{cpet} PET ikameli betonun basınç dayanımını, f'_c ikamesiz betonun basınç dayanımını, $pet\%$ PET ikame yüzdesini ifade etmektedir.

Tablo 5.2. Basınç dayanımı için elde edilen denklemler ve önerilen geliştirilmiş modeller.

Veri tipi	Eğri tipi	Önerilen model	Veri sayısı	R^2	MABE	MAPE
Bu çalışmanın deneysel verisi	Üstel	$f'_{cpet} = (f'_c)\left(e^{-0.0071(pet\%)}\right)$	3	0.999	0.045	0.194
	Doğrusal	$f'_{cpet} = (f'_c)(1 - 0.0065(pet\%))$	3	0.997	0.097	0.423
Hacim ikamesi verisi	Üstel	$f'_{cpet} = (f'_c)\left(e^{-0.0062(pet\%)}\right)$	110	0.805	3.314	13.396
	Doğrusal	$f'_{cpet} = (f'_c)(1 - 0.0052(pet\%))$	110	0.802	3.318	13.519
Ağırlık ikamesi verisi	Üstel	$f'_{cpet} = (f'_c)\left(e^{-0.0152(pet\%)}\right)$	50	0.682	5.277	32.116
	Doğrusal	$f'_{cpet} = (f'_c)(1 - 0.0096(pet\%))$	50	0.619	5.274	35.261
Tüm veri	Üstel	$f'_{cpet} = (f'_c)\left(e^{-0.0082(pet\%)}\right)$	160	0.741	4.795	22.352
	Doğrusal	$f'_{cpet} = (f'_c)(1 - 0.0061(pet\%))$	160	0.733	4.728	22.814

Önerilen geliştirilmiş modeller literatürdeki PET ikameli betonun basınç dayanımının tahmini için önerilen diğer modeller ile birlikte uygulanabilirlik kontrolüne girmişlerdir. Modeller deneysel veri tabanındaki veriler kullanılarak istatiksel metrikler aracılığıyla kontrol edilmişlerdir.

Hesaplanan değerler ve modeller Tablo 5.3'te verilmiştir. Tablo 5.3'te γ_{cpet} PET ikameli betonun yoğunluğunu ifade etmektedir.

Literatürde önerilen bazı modellerde PET ikamesi granül değil fiber halde gerçekleştirilmiştir. Bazı modellerde ise ince agrega değil iri agrega ikamesi yapılmıştır. Bu modeller Tablo 5.3'te işaretlenerek gösterilmiştir.

Bazı modeller tahminlerinde PET ikameli betonun yoğunluk (γ_{cpet}) değerini kullanmışlardır. Veri tabanı içerisinde γ_{cpet} değeri belirtilmemiş çalışmalar olduğu için bu modellerdeki veri sayısı diğerlerine göre daha az olmuştur.

Bazı modellerde ise önerilen model belirli PET ikame oranları için geçerli olacak şekilde önerilmiştir. Meena ve Ramana (2022) model önerisini sadece %15 ikamesine kadar olan numuneler için geçerli olacak şekilde yaptığı için bu modeldeki veri sayısı da diğerlerine göre daha düşüktür.

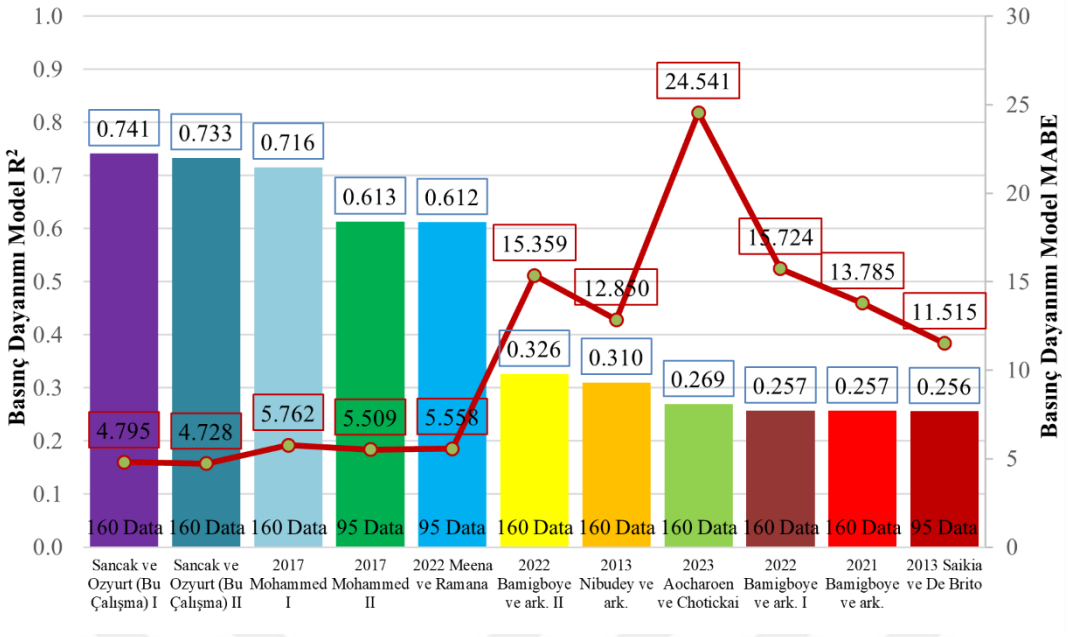
Tablo 5.3. Basınç dayanımı için önerilen modeller ve performansları.

Yıl	Referans	Veri sayısı	R^2	MABE	MAPE
2013	Nibudey ve ark.*				
	$f'_{cpet} = -2.667\left(\frac{pet\%}{100}\right)^2 + 4.762\left(\frac{pet\%}{100}\right) + 40.84$	160	0.310	12.850	64.509
2013	Saikia ve De Brito				
	$f'_{cw} = 0.1091\gamma_{cpet} - 219.71$	95	0.256	11.515	47.258
2017a	Mohammed				
	I. $f'_{cpet} = \frac{1.0387(f'_c)^{0.953}}{(pet\%)^{0.066}}$	160	0.716	5.762	24.549
	II. $f'_{cpet} = \frac{0.494(f'_c)^{0.85}(\gamma_{cpet})^{0.142}}{(pet\%)^{0.066}}$	95	0.613	5.509	24.018
2021	Bamigboye ve ark.				
	$f'_{cpet} = -0.0926(pet\%) + 21.632$	160	0.257	13.785	41.693
2022	Bamigboye ve ark.**				
	$f'_{cpet} = -0.1242(pet\%) + 19.956$	160	0.257	15.724	46.976
	$f'_{cpet} = 0.0031(pet\%)^2 - 0.4445(pet\%) + 24.453$	160	0.326	15.359	46.312
2022	Meena ve Ramana				
	$f'_{cpet} = f'_c\left(-0.23\left(\frac{pet\%}{100}\right) - 5.14\left(\frac{pet\%}{100}\right)^2 - 71.11\left(\frac{pet\%}{100}\right)^3 + 0.994\right)$ if $0 \le pet\% \le 15$	95	0.612	5.558	16.651
2023	Aocharoen ve Chotickai**				
	$f'_{cpet} = (f'_c)(1 - 0.04338(pet\%))$	160	0.269	24.541	108.874
2024	Sancak ve Ozyurt (Bu çalışma)				
	I. $f'_{cpet} = (f'_c)\left(e^{-0.0082(pet\%)}\right)$	160	0.741	4.795	22.352
	II. $f'_{cpet} = (f'_c)(1 - 0.0061(pet\%))$	160	0.733	4.728	22.814

* Çalışmada granül değil fiber kullanılmıştır. **Çalışmada ince değil iri agrega ikamesi yapılmıştır.

Yapılan metrik analizler sonucunda bu çalışmanın öne sürmüş olduğu üstel ve doğrusal modellerin 0.741 ve 0.733 R^2 değerleri ile en başarılı model önerileri oldukları görülmüştür. Bu iki modelin arkasından 0.716 R^2 değeri ile Mohammed (2017a) I modeli gelmiştir. Saikia ve De Brito (2013) modelinin 0.256 R^2 değerine sahip olduğu ve doğruluğu düşük sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Şekil 5.2'de önerilen modellerin R^2 ve MABE değerlerinden oluşan grafik verilmiştir.

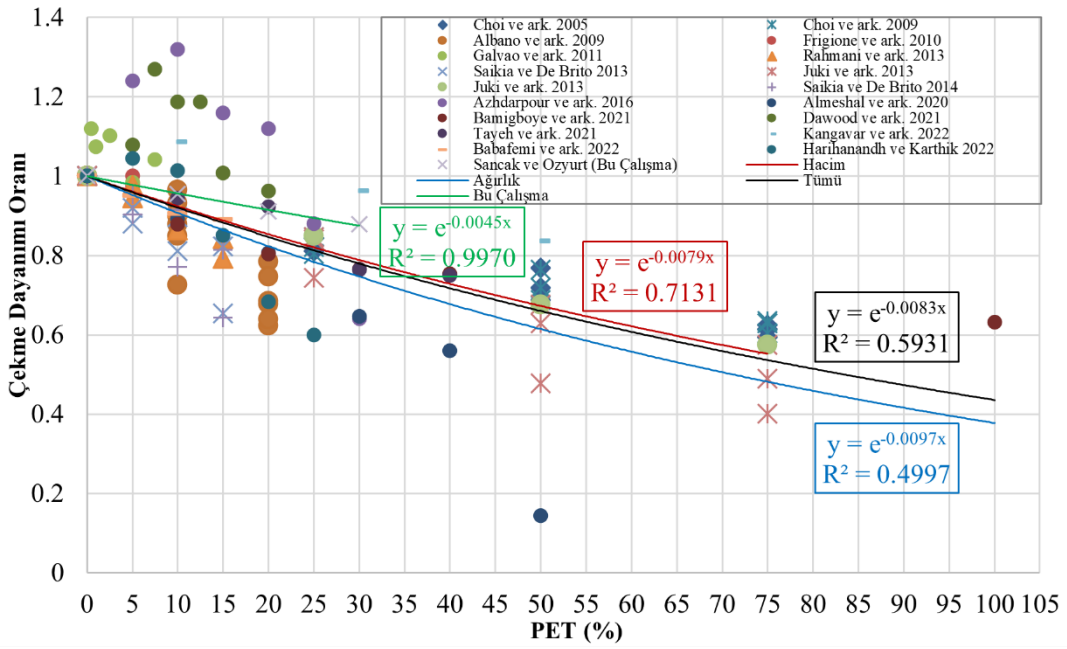


Şekil 5.2. Basınç dayanımı modellerinin R^2 ve MABE karşılaştırması.

5.1.2. Çekme dayanımı için model geliştirme

Verilerin çekme dayanımı grafiği, basınç dayanımı grafiğine benzer şekilde üretilmiş ve bir ekseni çekme dayanımı oranı diğer ekseni PET ikame yüzdesi olacak şekilde bir grafik oluşturulmuştur.

Oluşturulan grafik Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Çekme dayanımı oranı–PET yüzdesi grafiği.

Grafik içerisinde eğilim çizgisi yardımıyla hacim ikamesi için, ağırlık ikamesi için, bu çalışmanın deneysel verileri için ve hepsi için model önerileri oluşturulmuştur.

Tablo 5.4'te elde edilen denklemler ve geliştirilen modeller verilmiştir. Tablo 5.4'te f'_{tpet} PET ikameli betonun çekme dayanımını, f'_t ikamesiz betonun çekme dayanımını, $pet\%$ PET ikame yüzdesini ifade etmektedir.

Tablo 5.4. Çekme dayanımı ile PET ikame yüzdesi arasındaki bağlantı için elde edilen denklemler ve önerilen geliştirilmiş modeller.

Veri tipi	Eğri tipi	Önerilen model	Veri sayısı	R^2	MABE	MAPE
Bu çalışmanın deneysel verisi	Üstel	$f'_{tpet} = (f'_t)(e^{-0.0045(pet\%)})$	3	0.994	0.007	0.312
	Doğrusal	$f'_{tpet} = (f'_t)(1 - 0.0042(pet\%))$	3	0.992	0.010	0.447
Hacim ikamesi verisi	Üstel	$f'_{tpet} = (f'_t)(e^{-0.0079(pet\%)})$	69	0.776	0.222	9.968
	Doğrusal	$f'_{tpet} = (f'_t)(1 - 0.0063(pet\%))$	69	0.765	0.239	10.771
Ağırlık ikamesi verisi	Üstel	$f'_{tpet} = (f'_t)(e^{-0.0097(pet\%)})$	40	0.840	0.407	20.755
	Doğrusal	$f'_{tpet} = (f'_t)(1 - 0.0065(pet\%))$	40	0.812	0.396	21.893
Tüm veri	Üstel	$f'_{tpet} = (f'_t)(e^{-0.0083(pet\%)})$	109	0.823	0.290	14.275
	Doğrusal	$f'_{tpet} = (f'_t)(1 - 0.0063(pet\%))$	109	0.811	0.296	14.901

Önerilen geliştirilmiş modeller literatürdeki PET ikame oranı ile betonun çekme dayanımını arasındaki ilişkiyi tahmin eden diğer modeller ile birlikte uygulanabilirlik kontrolüne girmişlerdir. Deneysel veri tabanındaki veriler kullanılarak istatiksel metrikler aracılığıyla kontrol gerçekleştirilmiştir.

Hesaplanan değerler ve modeller Tablo 5.5'te verilmiştir.

Yapılan metrik analizler sonucunda tüm çekme dayanımı verilerini içine alan modeller arasında bu çalışmanın öne sürmüş olduğu I ve II numaralı modellerin 0.823 ve 0.811 R^2 değerleri ile en başarılı model önerileri oldukları görülmüştür. Bamigboye ve ark. (2021) ve Bamigboye ve ark. (2022) I modellerinin 0.255 R^2 değerine sahip olduğu ve doğruluğu düşük sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Meena ve Ramana (2022) model önerisi sadece %15 ikamesine kadar olan numuneleri kapsayacak şekilde yaptığı için %15'ten fazla yapılan ikameler değerlendirmeye alınmamıştır. Bu yüzden bu

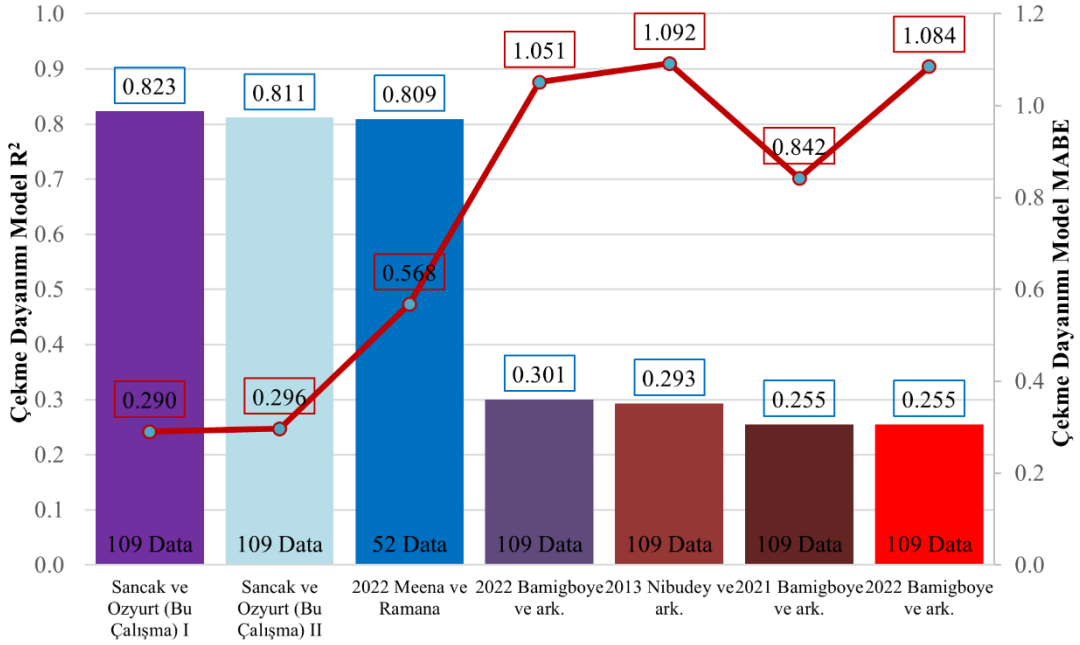
modeldeki veri sayısı diğerlerine göre daha düşüktür. İkame oranı %15'e kadar olan numuneler için 0.809 R^2 değeriyle başarılı bir model önerisinde bulunulmuştur, fakat ikame yüzdesi arttığı zaman modelin tahminlerinde büyük hatalar gözlenmiştir.

Tablo 5.5. Çekme dayanımı ile PET ikame yüzdesi arasındaki bağlantı için önerilen modeller ve performansları.

Yıl	Referans	Veri sayısı	R^2	MABE	MAPE
2013	Nibudey ve ark.*				
	$f'_{tpet} = -0.274\left(\frac{pet\%}{100}\right)^2 + 0.478\left(\frac{pet\%}{100}\right) + 3.525$	109	0.293	1.092	52.831
2021	Bamigboye ve ark.				
	$f'_{tpet} = -0.0081(pet\%) + 2.2568$	109	0.255	0.842	28.760
2022	Bamigboye ve ark.**				
	I. $f'_{tpet} = -0.0134(pet\%) + 2.0872$	109	0.255	1.084	36.799
	II. $f'_{tpet} = -3 \times 10^{-6}(pet\%)^3 + 8 \times 10^{-4}(pet\%)^2 - 0.0601(pet\%) + 2.5962$	109	0.301	1.051	35.657
2022	Meena ve Ramana				
	$f'_{tpet} = f_t\{-0.036 * (\sqrt{pet\%}) - 0.0012 * (pet\%)^2 + 1\}$ if $0 \leq$ PET (%) ≤ 15	52	0.809	0.568	17.698
2024	Sancak ve Ozyurt (Bu çalışma)				
	I. $f'_{tpet} = (f'_t)(e^{-0.0083(pet\%)})$	109	0.823	0.290	14.275
	II. $f'_{tpet} = (f'_t)(1 - 0.0064(pet\%))$	109	0.811	0.296	14.901

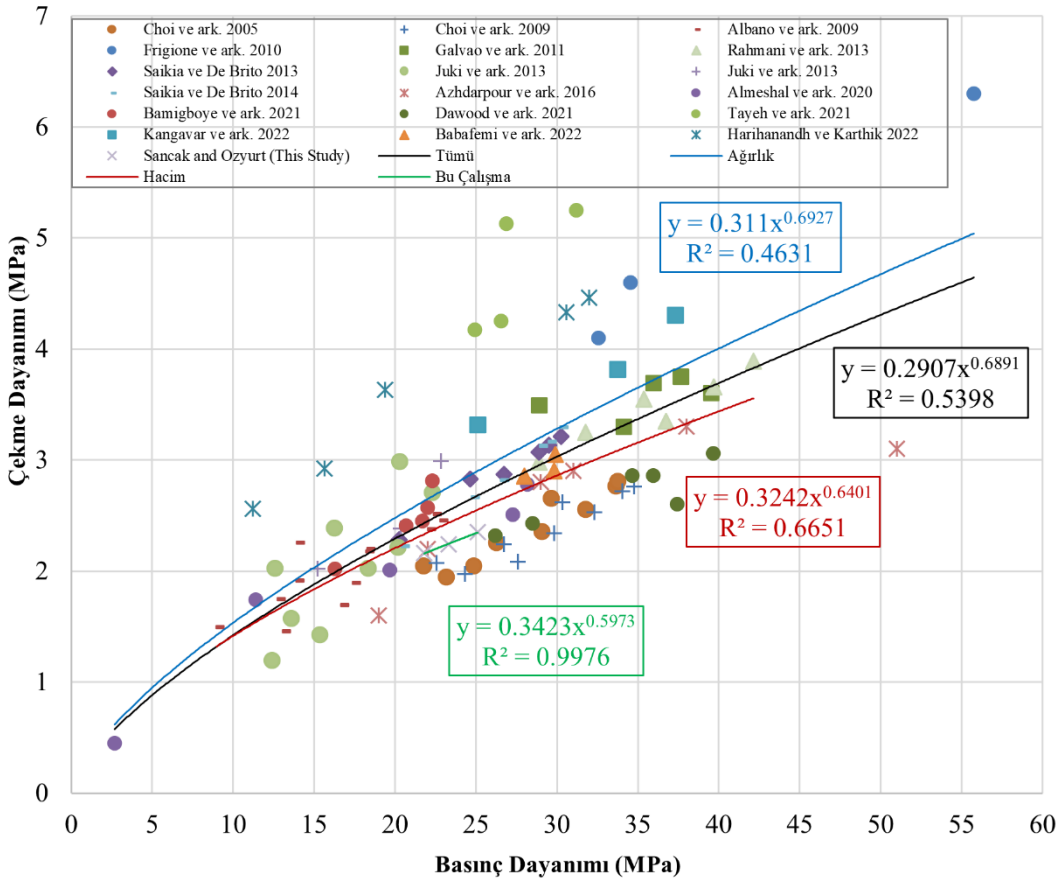
* Çalışmada granül değil fiber kullanılmıştır. **Çalışmada ince değil iri agrega ikamesi yapılmıştır.

Şekil 5.4'te önerilen modellerin R^2 ve MABE değerlerinden oluşan grafik verilmiştir.



Şekil 5.4. Çekme dayanımı ile PET yüzdesi arasındaki bağlantı modellerinin R^2 ve MABE karşılaştırması.

Literatürde yer alan çalışmalarda PET ikameli beton numunelerin basınç dayanımı ile çekme dayanımı arasındaki bir bağlantı olduğunu öne süren ve bununla ilgili model önerilerinde bulunan çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada bu öneriler dikkate alınmış ve bir ekseni çekme dayanımı diğer ekseni basınç dayanımı olacak şekilde bir grafik oluşturulmuştur. Bu grafik oluşturulurken basınç ve çekme dayanımlarında farklılıklar oluşmaması için küp şeklinde üretilmiş numune sonuçları silindir dayanım eşleniğine döndürülmüştür. Tüm sonuçlar silindir numune dayanımı karşılığını verecek şekilde grafiğe işlenmiştir. Oluşturulan grafik Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Çekme dayanımı–basınç dayanımı grafiği.

Grafik içerisinde eğilim çizgisi yardımıyla model önerileri oluşturulmuştur. Tablo 5.6'da elde edilen denklemler ve geliştirilen modeller verilmiştir.

Önerilen geliştirilmiş modeller literatürdeki PET ikameli betonun çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi tahmin eden diğer modeller ile birlikte uygulanabilirlik kontrolüne girmişlerdir.

Tablo 5.6. Çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki bağlantı için elde edilen denklemler ve önerilen geliştirilmiş modeller.

Veri tipi	Eğri tipi	Önerilen model	Veri sayısı	R^2	MABE	MAPE
Bu çalışmanın deneysel verisi	Üssel	$f'_{tpet} = 0.3423(f'_{cpet})^{0.5973}$	3	0.998	0.004	0.162
	Doğrusal	$f'_{tpet} = 0.0575f'_{cpet} + 0.9037$	3	0.998	0.003	0.138
Hacim ikamesi verisi	Üssel	$f'_{tpet} = 0.3242(f'_{cpet})^{0.6401}$	69	0.665	0.303	12.327
	Doğrusal	$f'_{tpet} = 0.0696f'_{cpet} + 0.8045$	69	0.672	0.295	12.120
Ağırlık ikamesi verisi	Üssel	$f'_{tpet} = 0.311(f'_{cpet})^{0.6927}$	40	0.463	0.704	21.796
	Doğrusal	$f'_{tpet} = 0.0729f'_{cpet} + 1.1261$	40	0.317	1.559	60.953
Tüm veri	Üssel	$f'_{tpet} = 0.2907(f'_{cpet})^{0.6891}$	109	0.540	0.441	15.297
	Doğrusal	$f'_{tpet} = 0.0762f'_{cpet} + 0.7847$	109	0.545	0.444	16.333

Deneysel veri tabanındaki veriler kullanılarak istatiksel metrikler aracılığıyla kontrol gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan değerler ve modeller Tablo 5.7'de verilmiştir.

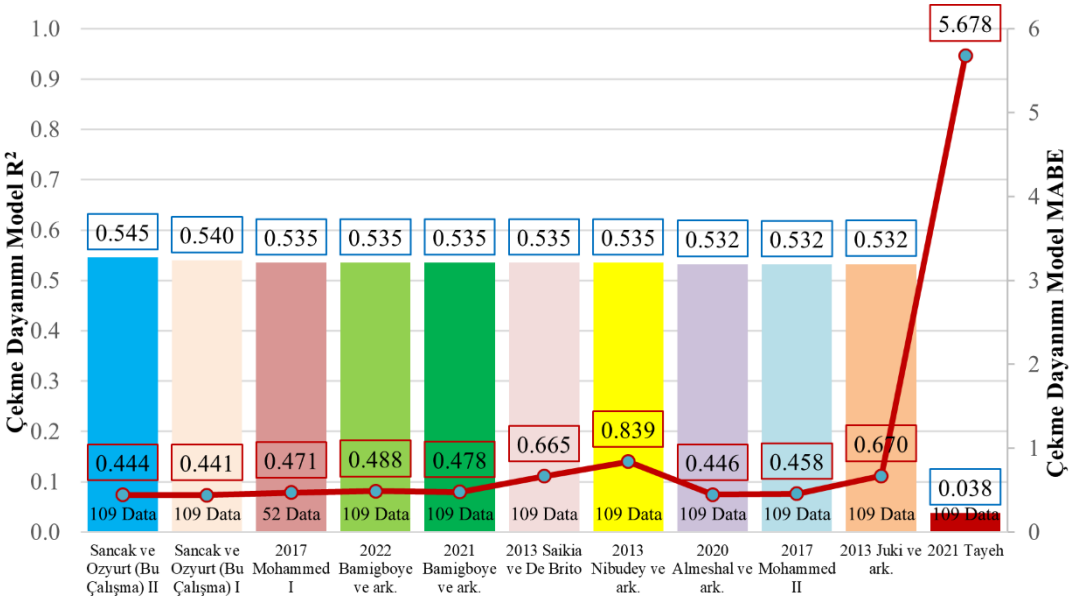
Tablo 5.7. Çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki bağlantı için önerilen modeller ve performansları.

Yıl	Referans	Veri sayısı	R^2	MABE	MAPE
2013	Nibudey ve ark.*				
	$f'_{tpet} = 0.105f'_{cpet} - 0.758$	109	0.535	0.839	32.306
2013a	Juki ve ark.				
	$f'_{tpet} = 0.634(f'_{cpet})^{0.5}$	109	0.522	0.670	27.486
2013	Saikia ve De Brito				
	$f'_{tpet} = 0.086f'_{cpet} - 0.0783$	109	0.535	0.665	23.161
2017b	Mohammed				
	I. $f'_{tpet} = 0.713 + 0.0826f'_{cpet}$	109	0.535	0.471	17.639
	II. $f'_{tpet} = 0.246(f'_{cpet})^{0.75}$	109	0.532	0.458	16.554
2020	Almeshal ve ark.				
	$f'_{tpet} = 0.225(f'_{cpet})^{0.76}$	109	0.532	0.446	16.472
2021	Tayeh				
	$f'_{tpet} = -0.066(f'_{cpet})^2 + 4.0908(f'_{cpet}) - 57.9$	109	0.038	5.678	326.375
2021	Bamigboye ve ark.				
	$f'_{tpet} = 0.0994(f'_{cpet}) + 0.144$	109	0.535	0.478	16.737
2022	Bamigboye ve ark.**				
	$f'_{tpet} = 0.0955(f'_{cpet}) + 0.085$	109	0.535	0.488	16.892
2024	Sancak ve Ozyurt (Bu çalışma)				
	I. $f'_{tpet} = 0.2907(f'_{cpet})^{0.6891}$	109	0.540	0.441	15.297
	II. $f'_{tpet} = 0.0762f'_{cpet} + 0.7847$	109	0.545	0.444	16.333

* Çalışmada granül değil fiber kullanılmıştır. **Çalışmada ince değil iri agrega ikamesi yapılmıştır.

Yapılan metrik analizler sonucunda bu çalışmanın öne sürmüş olduğu II ve I numaralı modellerin 0.545 ve 0.540 R^2 değerleri ile en başarılı model önerileri oldukları görülmüştür. Tayeh (2021) modelinin 0.038 R^2 değerine sahip olduğu ve doğruluğu düşük sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

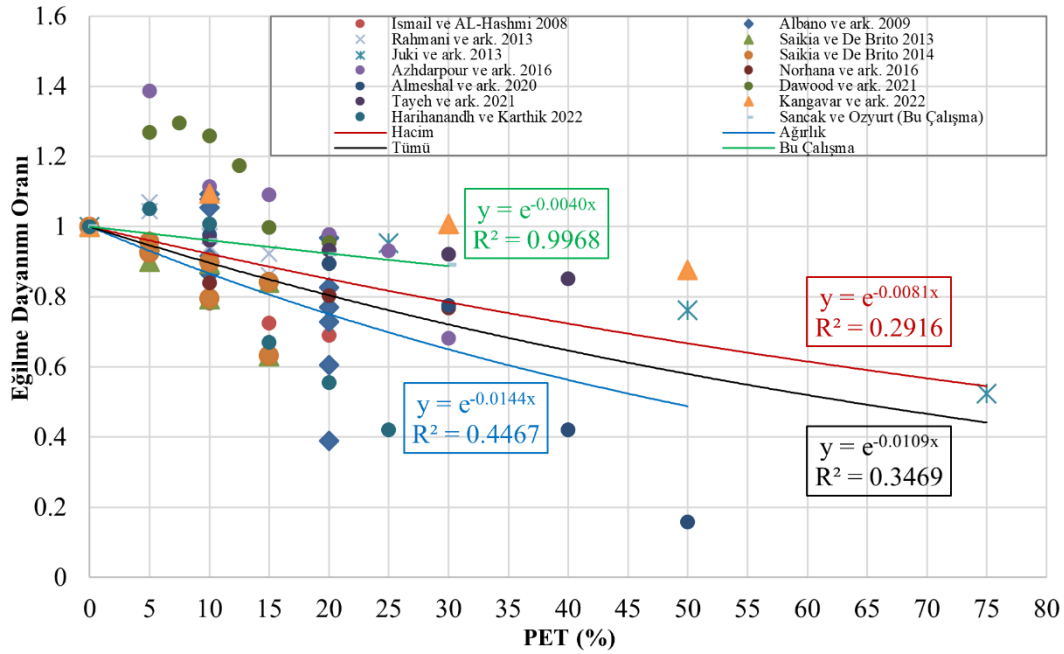
Şekil 5.6'da önerilen modellerin R^2 ve MABE değerlerinden oluşan grafik verilmiştir.



Şekil 5.6. Çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki bağlantı modellerinin R^2 ve MABE karşılaştırması.

5.1.3. Eğilme dayanımı için model geliştirme

Verilerin eğilme dayanımı grafiği oluşturulurken bir ekseni eğilme dayanımı oranı diğer ekseni PET ikame yüzdeleri olacak şekilde bir grafik oluşturulmuştur. Oluşturulan grafik Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Eğilme dayanımı–PET yüzdesi grafiği.

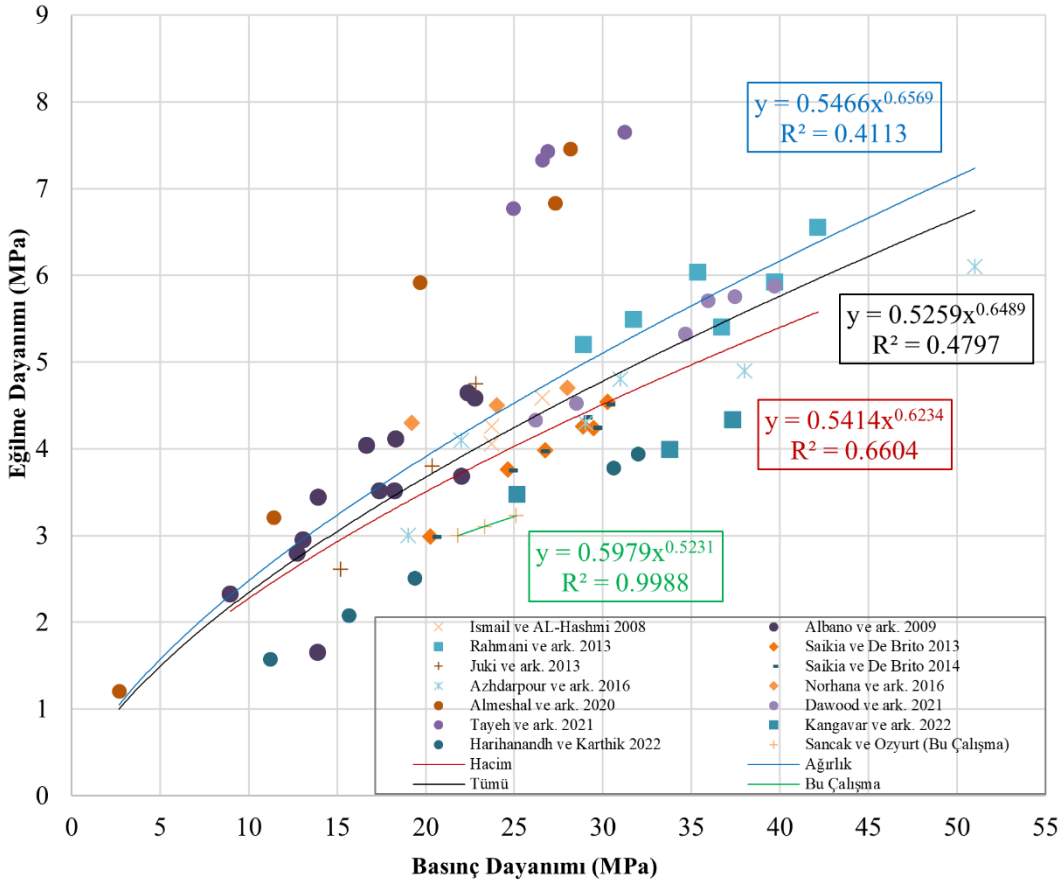
Grafik içerisinde eğilim çizgisi yardımıyla hacim ikamesi için, ağırlık ikamesi için, bu çalışmanın deneysel verileri için ve tüm veriler için model önerileri oluşturulmuştur. Tablo 5.8'de elde edilen denklemler ve geliştirilen modeller verilmiştir. Tablo 5.8'de f'_{rpet} PET ikameli betonun eğilme dayanımını, f'_r ikamesiz betonun eğilme dayanımını, $pet\%$ PET ikame yüzdesini ifade etmektedir.

Tablo 5.8. Eğilme dayanımı ile PET ikame yüzdesi arasındaki bağlantı için elde edilen denklemler ve önerilen geliştirilmiş modeller.

Veri tipi	Eğri tipi	Önerilen model	Veri sayısı	R^2	MABE	MAPE
Bu çalışmanın deneysel verisi	Üstel	$f'_{rpet} = (f'_r)(e^{-0.0040(pet\%)})$	3	0.996	0.010	0.321
	Doğrusal	$f'_{rpet} = (f'_r)(1 - 0.0038(pet\%))$	3	0.994	0.013	0.430
Hacim ikamesi verisi	Üstel	$f'_{rpet} = (f'_r)(e^{-0.0081(pet\%)})$	39	0.656	0.451	13.933
	Doğrusal	$f'_{rpet} = (f'_r)(1 - 0.0065(pet\%))$	39	0.650	0.457	14.289
Ağırlık ikamesi verisi	Üstel	$f'_{rpet} = (f'_r)(e^{-0.0144(pet\%)})$	32	0.607	1.058	27.280
	Doğrusal	$f'_{rpet} = (f'_r)(1 - 0.0090(pet\%))$	32	0.578	0.936	27.362
Tüm veri	Üstel	$f'_{rpet} = (f'_r)(e^{-0.0109(pet\%)})$	71	0.607	0.700	20.542
	Doğrusal	$f'_{rpet} = (f'_r)(1 - 0.0076(pet\%))$	71	0.593	0.670	20.980

Literatürde PET ikame oranı ile betonun eğilme dayanımını arasındaki ilişkiyi tahmin eden herhangi bir diğer modelle karşılaşılmamıştır. Deneysel veri tabanı kullanılarak istatiksel metrikler aracılığıyla kontrol gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 5.8'de verilmiştir.

PET ikameli beton numuneleri içeren çalışmalarda basınç dayanımıyla eğilme dayanımı arasında bir bağlantı olduğunu öne süren ve bununla ilgili model önerilerinde bulunan çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada bu öneriler dikkate alınmış ve bir ekseni eğilme dayanımı diğer ekseni basınç dayanımı olacak şekilde bir grafik oluşturulmuştur. Bu grafik oluşturulurken basınç dayanımları silindir numune dayanımı olacak şekilde grafiğe işlenmiştir. Oluşturulan grafik Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Eğilme dayanımı–basınç dayanımı grafiği.

Grafik içerisinde eğilim çizgisi yardımıyla model önerileri oluşturulmuştur. Tablo 5.9'da elde edilen denklemler ve geliştirilen modeller verilmiştir.

Tablo 5.9. Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki bağlantı için elde edilen denklemler ve önerilen geliştirilmiş modeller.

Veri tipi	Eğri tipi	Önerilen model	Veri sayısı	R^2	MABE	MAPE
Bu çalışmanın deneysel verisi	Üssel	$f'_{rpet} = 0.5979(f'_{cpet})^{0.5231}$	3	0.999	0.003	0.099
	Doğrusal	$f'_{rpet} = 0.0696f'_{cpet} + 1.4815$	3	0.999	0.002	0.064
Hacim ikamesi verisi	Üssel	$f'_{rpet} = 0.5414(f'_{cpet})^{0.6234}$	39	0.660	0.500	13.507
	Doğrusal	$f'_{rpet} = 0.1073f'_{cpet} + 1.3488$	39	0.671	0.484	13.195
Ağırlık ikamesi verisi	Üssel	$f'_{rpet} = 0.5466(f'_{cpet})^{0.6569}$	32	0.411	0.958	20.972
	Doğrusal	$f'_{rpet} = 0.1113f'_{cpet} + 1.8361$	32	0.376	1.025	24.735
Tüm veri	Üssel	$f'_{rpet} = 0.5259(f'_{cpet})^{0.6489}$	71	0.480	0.711	16.913
	Doğrusal	$f'_{rpet} = 0.1128f'_{cpet} + 1.474$	71	0.465	0.724	17.889

Önerilen geliştirilmiş modeller literatürdeki PET ikameli betonun eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi tahmin eden diğer modeller ile birlikte uygulanabilirlik kontrolüne girmişlerdir. Deneysel veri tabanındaki veriler kullanılarak istatiksel metrikler aracılığıyla kontrol gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan değerler ve modeller Tablo 5.10'da verilmiştir.

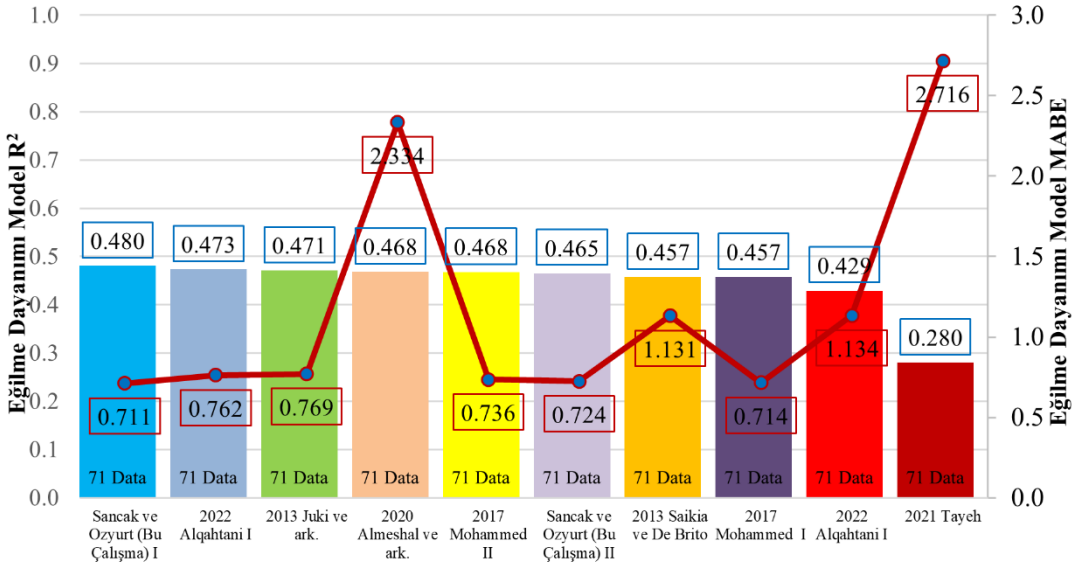
Tablo 5.10. Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki bağlantı için önerilen modeller ve performansları.

Yıl	Referans	Veri sayısı	R^2	MABE	MAPE
2013a	Juki ve ark.				
	$f'_{rpet} = 0.466(f'_{cpet})^{0.703}$	71	0.471	0.769	18.906
2013	Saikia ve De Brito				
	$f'_{rpet} = 0.92 + 0.0918f'_{cpet}$	71	0.457	1.131	23.352
2017b	Mohammed				
	I. $f'_{rpet} = 1.36 + 0.11f'_{cpet}$	71	0.457	0.714	16.832
	II. $f'_{rpet} = 0.317(f'_{cpet})^{0.795}$	71	0.468	0.736	17.165
2020	Almeshal ve ark.				
	$f'_{rpet} = 0.537(f'_{cpet})^{0.78}$	71	0.468	2.334	59.287
2021	Tayeh				
	$f'_{rpet} = -0.031(f'_{cpet})^2 + 1.9144(f'_{cpet}) - 21.696$	71	0.280	2.716	89.538
2022	Alqahtani*				
	I. $f'_{rpet} = 0.53(f'_{cpet})^{0.62}$	71	0.473	0.762	16.857
	II. $f'_{rpet} = 0.036(f'_{cpet})^{1.40}$	71	0.429	1.134	26.352
2024	Sancak ve Ozyurt (Bu çalışma)				
	I. $f'_{rpet} = 0.5259(f'_{cpet})^{0.6489}$	71	0.480	0.711	16.913
	II. $f'_{rpet} = 0.1128f'_{cpet} + 1.474$	71	0.465	0.724	17.889

*Çalışmada ince değil iri agrega ikamesi yapılmıştır.

Metrik analizler sonucunda bu çalışmanın öne sürmüş olduğu I numaralı modelin 0.480 R^2 değerleri ile en başarılı model önerisi olduğu görülmüştür. Tayeh (2021) modelinin 0.280 R^2 değerine sahip olduğu ve doğruluğu düşük sonuçlar verdiği tespit

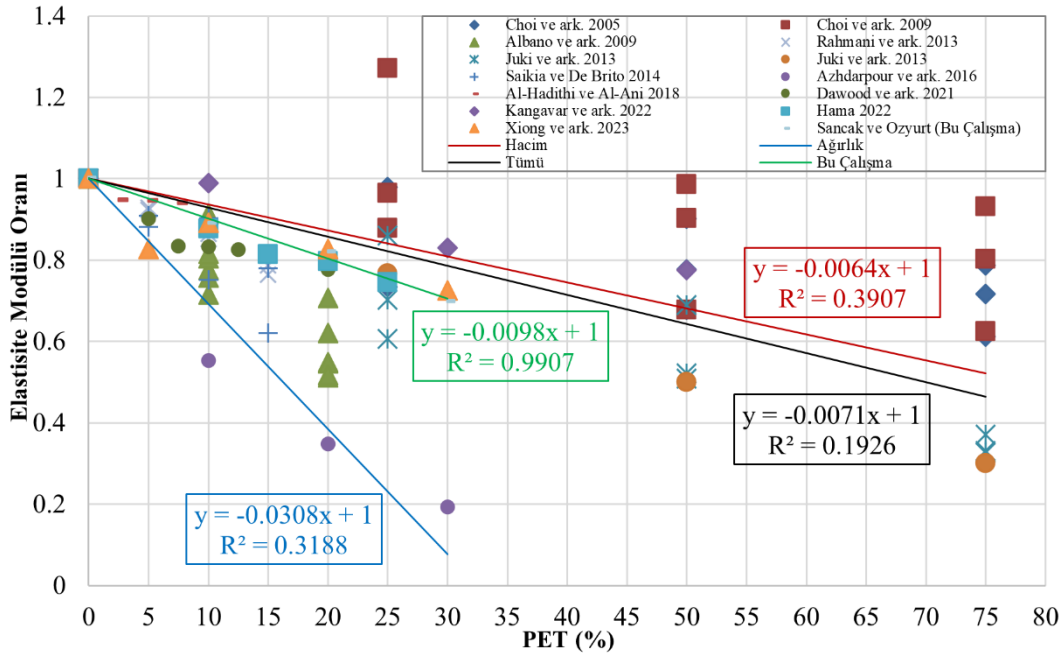
edilmiştir. Şekil 5.9'da önerilen modellerin R^2 ve MABE değerlerinden oluşan grafik verilmiştir.



Şekil 5.9. Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki bağlantı modellerinin R^2 ve MABE karşılaştırması.

5.1.4. Elastisite modülü için model geliştirme

Verilerin elastisite modülü grafiği oluşturulurken bir ekseni elastisite modülü oranı diğer ekseni PET ikame yüzdeleri olacak şekilde bir grafik oluşturulmuştur. Oluşturulan grafik Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Elastisite modülü–PET yüzdesi grafiği.

Grafik içerisinde eğilim çizgisi yardımıyla hacim ikamesi için, ağırlık ikamesi için, bu çalışmanın deneysel verileri için ve tüm veriler için model önerileri oluşturulmuştur. Tablo 5.11'de elde edilen denklemler ve geliştirilen modeller verilmiştir. Tablo 5.10'da E_{cpet} PET ikameli betonun elastisite modülünü, E_c ikamesiz betonun elastisite modülünü, $pet\%$ PET ikame yüzdesini ifade etmektedir.

Tablo 5.11. Elastisite modülü ile PET ikame yüzdesi arasındaki bağlantı için elde edilen denklemler ve önerilen geliştirilmiş modeller.

Veri tipi	Eğri tipi	Önerilen model	Veri sayısı	R^2	MABE	MAPE
Bu çalışmanın deneysel verisi	Doğrusal	$E_{cpet} = E_c(1 - 0.0098(\text{pet\%}))$	3	0.977	0.367	1.488
Hacim ikamesi verisi	Doğrusal	$E_{cpet} = E_c(1 - 0.0064(\text{pet\%}))$	71	0.710	3.871	21.014
Ağırlık ikamesi verisi	Doğrusal	$E_{cpet} = E_c(1 - 0.0308(\text{pet\%}))$	9	0.654	5.024	26.330
Tüm veri	Doğrusal	$E_{cpet} = E_c(1 - 0.0071(\text{pet\%}))$	80	0.506	4.440	25.313

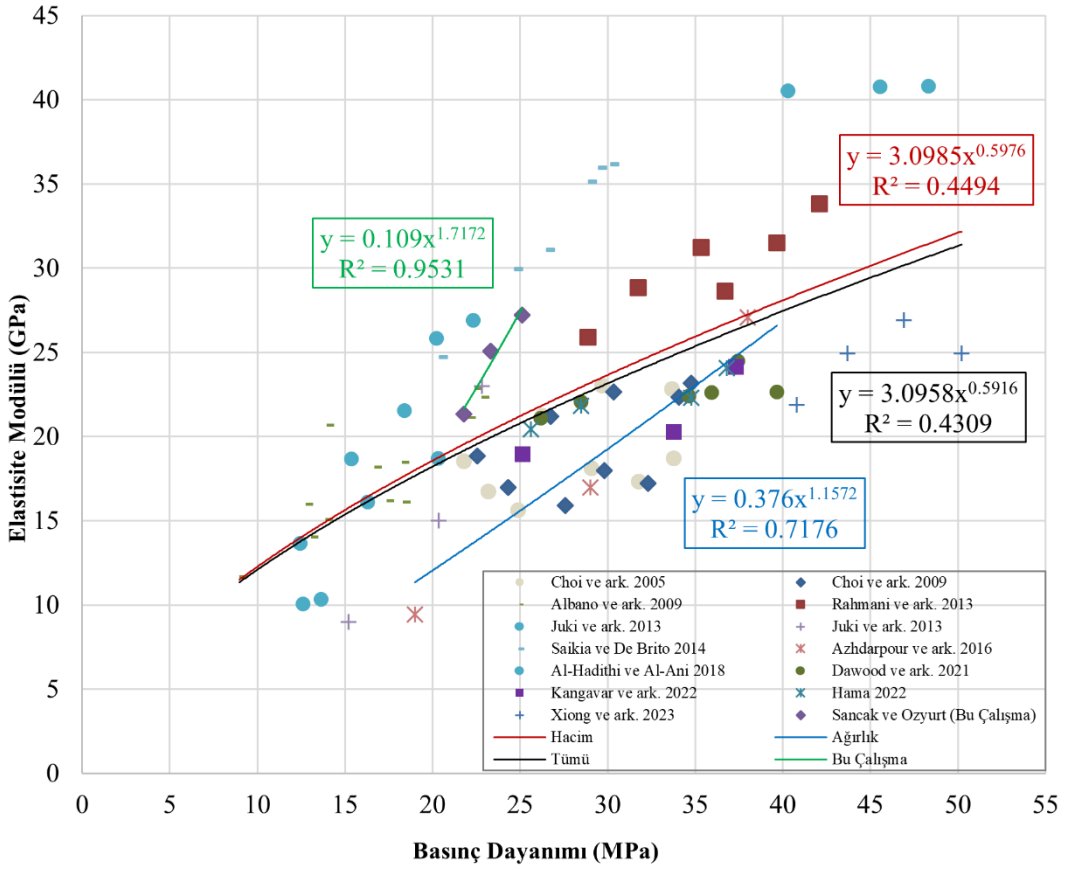
Daha önce yapılmış çalışmalar arasında sadece Aocharoen ve Chotickai (2023) PET ikame oranı ile betonun elastisite modülü arasındaki ilişkiyi tahmin eden bir model öne sürmüştür. Bu model, bu çalışmadan elde edilen model ile birlikte uygulanabilirlik kontrolüne girmiştir. Deneysel veri tabanındaki veriler kullanılarak istatiksel metrikler aracılığıyla kontrol gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan değerler ve modeller Tablo 5.12'de verilmiştir.

Tablo 5.12. Elastisite modülü ile PET ikame yüzdesi arasındaki bağlantı için önerilen modeller ve performansları.

Yıl	Referans	Veri sayısı	R^2	MABE	MAPE
2023	Aocharoen ve Chotickai* $E_{cpet} = E_c(1 - 0.02750(\text{pet\%}))$	80	0.449	14.167	82.097
2024	Sancak ve Ozyurt (Bu çalışma) $E_{cpet} = E_c(1 - 0.0071(\text{pet\%}))$	80	0.506	4.440	25.313

*Çalışmada ince değil iri agrega ikamesi yapılmıştır.

Basınç dayanımı ile elastisite modülü arasındaki ilişkiyi görebilmek için bir ekseni basınç dayanımı diğer ekseni elastisite modülü olan bir grafik oluşturulmuştur. Oluşturulan grafik Şekil 5.11'de gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Elastisite modülü–basınç dayanımı grafiği.

Grafik içerisinde eğilim çizgisi yardımıyla model önerileri oluşturulmuştur. Tablo 5.13'te elde edilen denklemler ve geliştirilen modeller verilmiştir.

Tablo 5.13. Elastisite modülü ile basınç dayanımı arasındaki bağlantı için elde edilen denklemler ve önerilen geliştirilmiş modeller.

Veri tipi	Eğri tipi	Önerilen model	Veri sayısı	R^2	MABE	MAPE
Bu çalışmanın deneysel verisi	Üssel	$E_{cpet} = 0.109(f'_{cpet})^{1.7172}$	3	0.953	0.500	2.033
	Doğrusal	$E_{cpet} = 1.7643f'_{cpet} - 16.762$	3	0.959	0.465	1.909
Hacim ikamesi verisi	Üssel	$E_{cpet} = 3.0985(f'_{cpet})^{0.5976}$	71	0.449	4.188	18.611
	Doğrusal	$E_{cpet} = 0.4923f'_{cpet} + 9.1247$	71	0.442	4.295	19.761
Ağırlık ikamesi verisi	Üssel	$E_{cpet} = 0.376(f'_{cpet})^{1.1572}$	9	0.718	2.171	11.215
	Doğrusal	$E_{cpet} = 0.637f'_{cpet} + 0.5626$	9	0.727	2.118	11.901
Tüm veri	Üssel	$E_{cpet} = 3.0958(f'_{cpet})^{0.5916}$	80	0.431	4.020	18.289
	Doğrusal	$E_{cpet} = 0.477f'_{cpet} + 9.1022$	80	0.426	4.136	19.424

PET ikameli betonun elastisite modülü ile basınç dayanımı arasındaki bağlantıyı tahmin eden modeller literatürdeki diğer modeller ile birlikte uygulanabilirlik

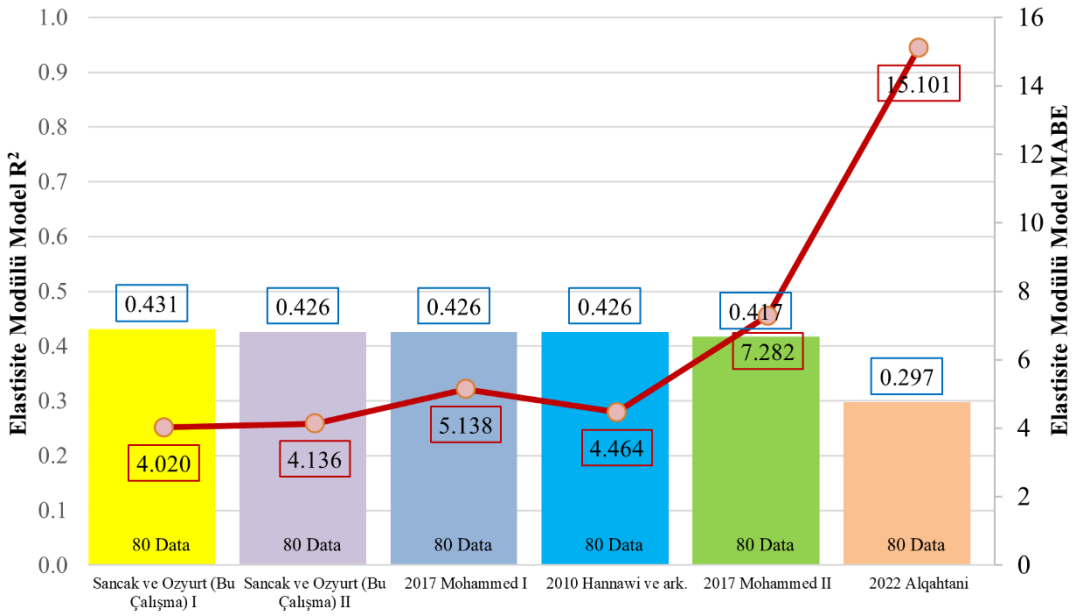
kontrolüne girmişlerdir. Deneysel veri tabanı kullanılarak istatiksel metrikler aracılığıyla kontrol gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan değerler ve modeller Tablo 5.14'te verilmiştir.

Tablo 5.14. Elastisite modülü ile basınç dayanımı arasındaki bağlantı için önerilen modeller ve performansları.

Yıl	Referans	Veri sayısı	R^2	MABE	MAPE
2010	Hannawi ve ark.				
	$E_{cpet} = 4.6886 + 0.6534 f'_{cpet}$	80	0.426	4.464	20.814
2017b	Mohammed				
	I. $E_{cpet} = 1.694 + 0.807 f'_{cpet}$	80	0.426	5.138	24.434
	II. $E_{cpet} = 0.229 (f'_{cpet})^{1.4}$	80	0.417	7.282	33.516
2022	Alqahtani*				
	$E_{cpet} = 3 \times 10^{-6} (f'_{cpet})^{4.43}$	80	0.297	15.101	69.878
2024	Sancak ve Ozyurt (Bu çalışma)				
	$E_{cpet} = 3.0958 (f'_{cpet})^{0.5916}$	80	0.431	4.020	18.289
	$E_{cpet} = 0.477 f'_{cpet} + 9.1022$	80	0.426	4.136	19.424

*Çalışmada ince değil iri agrega ikamesi yapılmıştır.

Metrik analizler sonucunda bu çalışmanın öne sürmüş olduğu I numaralı modelin 0.431 R^2 değerleri ile en başarılı model önerisi olduğu görülmüştür. Alqahtani (2022) modelinin 0.297 R^2 değerine sahip olduğu ve doğruluğu düşük sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Şekil 5.12'de önerilen modellerin R^2 ve MABE değerlerinden oluşan grafik verilmiştir.



Şekil 5.12. Elastisite modülü ile basınç dayanımı arasındaki bağlantı modellerinin R^2 ve MABE karşılaştırması.

5.2. FRP Etkisi

Daha önceki araştırmacılar FRP malzemesinin nihai yanal sargılama etkisini (f_{lu}) Denklem 5.1'deki gibi dikkate almıştır. Denklem 5.1'de FRP malzemesinin elastisite modülünü E_{frp}, kalınlığını t_{frp}, nihai çekme gerinimini ε_{frp} temsil etmektedir. D beton numunenin çapını ifade etmektedir.

$$f_{lu} = \frac{2E_{frp}t_{frp}\varepsilon_{frp}}{D} \tag{5.1}$$

Daha sonraki çalışmalarda ise araştırmacılar FRP malzemesinin deney esnasında beklenilen gerinim değerinden daha önce koptuğunu tespit etmişlerdir. Bu yüzden FRP nihai çekme gerinimini (ε_{frp}) değerini gerinim azaltma faktörü (k_ε) ile çarparak FRP sargı kopma gerinimi ($\varepsilon_{h,rup}$) değerinin kullanılmasının faydalı olabileceğini öne sürmüşlerdir. Bu değerin elde edilmesi Denklem 5.2'de verilmiştir. FRP sargı kopma gerinimi ($\varepsilon_{h,rup}$) değeri kullanılarak elde edilen yeni gerçek nihai yanal sargılama etkisi ($f_{lu,a}$) değerinin denklemi de Denklem 5.3'te verilmiştir.

$$\varepsilon_{h,rup} = k_\varepsilon \varepsilon_{frp} \tag{5.2}$$

$$f_{lu,a} = \frac{2E_{frp}t_{frp}\varepsilon_{h,rup}}{D} \tag{5.3}$$

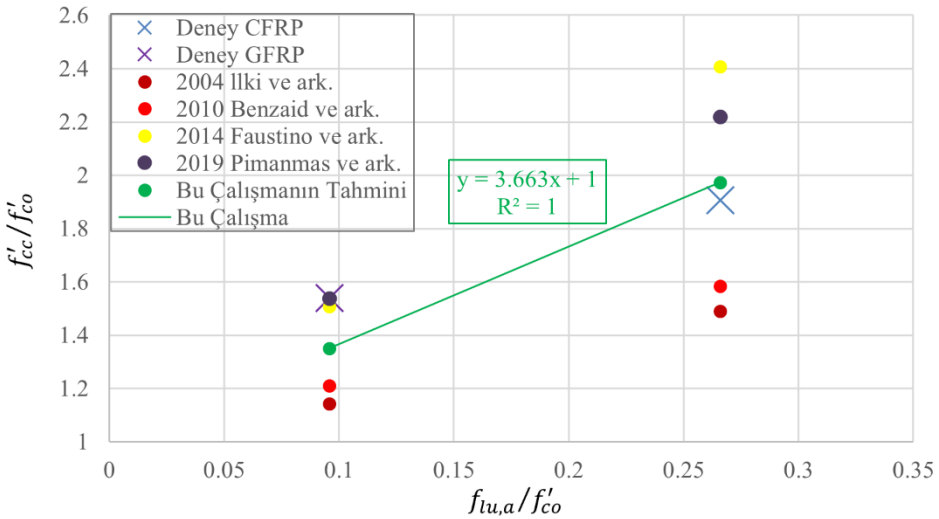
Çalışmada %10 PET ikameli numunelerin etrafı CFRP ve GFRP ile çevrelenmiş ve bu şekilde basınç dayanımında ve birim şekil değiştirmesinde artışlar meydana gelmiştir. Deneysel çalışmada elde edilen veriler, numune özellikleri ve FRP özellikleri Tablo 5.15'te verilmiştir.

Tablo 5.15. FRP ile sarılmış beton numunelerin sonuçları ve FRP özellikleri.

Numune ismi	D (cm)	H (cm)	f'_{co} (MPa)	ε_{co} (%)	f_{frp} (MPa)	E_{frp} (GPa)	ε_{frp} (%)	t_{frp} (mm)	f'_{cc} (MPa)	ε_{cu} (%)	$\varepsilon_{h,rup}$ (%)	k_ε
CS-PET-CFRP-10	10	20	25.11	0.2023	3000	230	1.3043	0.17	47.86	1.3819	0.8538	0.655
CS-PET-GFRP-10	10	20	25.11	0.2023	1500	80	1.8750	0.15	38.66	1.4469	1.0028	0.535

Literatürde FRP kullanılması halinde beton numunelerin basınç dayanımındaki ve gerinim değerlerindeki artış miktarlarının ne kadar olacağını tahmin eden çok sayıda model önerisi mevcuttur. Bu model önerilerden bazı eski ve yeni tarihli modellerin tahminleri deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Basınç dayanımı karşılaştırması için

bir ekseni ($f_{lu,a}/f'_{co}$) diğer ekseni (f'_{cc}/f'_{co}) olacak şekilde bir grafik oluşturulmuştur. Oluşturulan grafik Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13. FRP etkisinde basınç dayanımı için deneysel veriler ve model tahminleri.

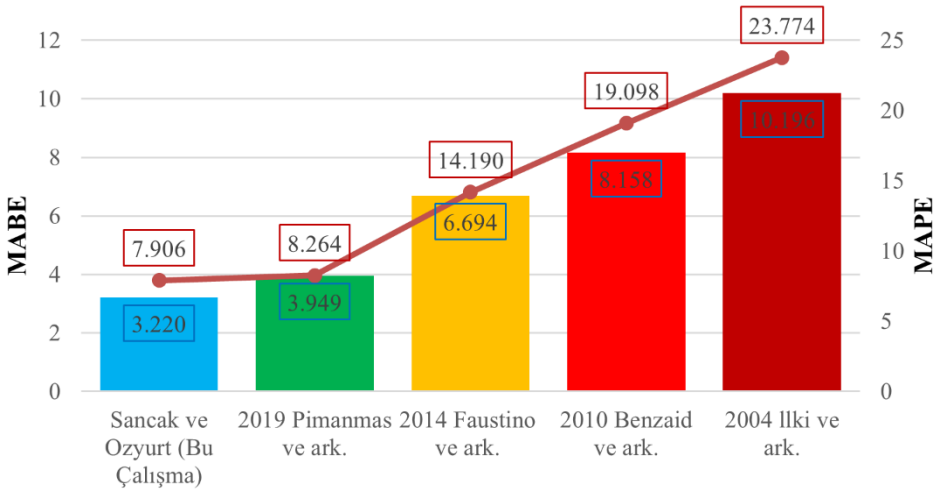
Deneysel veri sayısı sınırlı olsa bile FRP ile sarılmış PET ikameli betonun basınç dayanımı için grafik üzerindeki eğilim çizgisi yardımıyla model önerisinde bulunulmuştur. Daha önceki model önerilerin tahminleri grafik üzerinde gösterilmiş ve MABE ve MAPE değerleri hesaplanarak Tablo 5.16'da verilmiştir.

Tablo 5.16. Basınç dayanımı için sargılı beton modellerinin deneysel veriler ile uyumu.

Yıl	Referans	Veri sayısı	MABE	MAPE
2004	Ilki ve ark. $\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.4\left(\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}}\right)^{1.2}$	2	10.196	23.774
2010	Benzaid ve ark. $\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.2\left(\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}}\right)$	2	8.158	19.098
2014	Faustino ve ark. $\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 5.29\left(\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}}\right)$	2	6.694	14.190
2019	Pimanmas ve ark. $\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3\left(\frac{f_{lu}}{f'_{co}}\right)$	2	3.949	8.264
2024	Sancak ve Ozyurt (Bu çalışma) $\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.663\left(\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}}\right)$	2	3.220	7.906

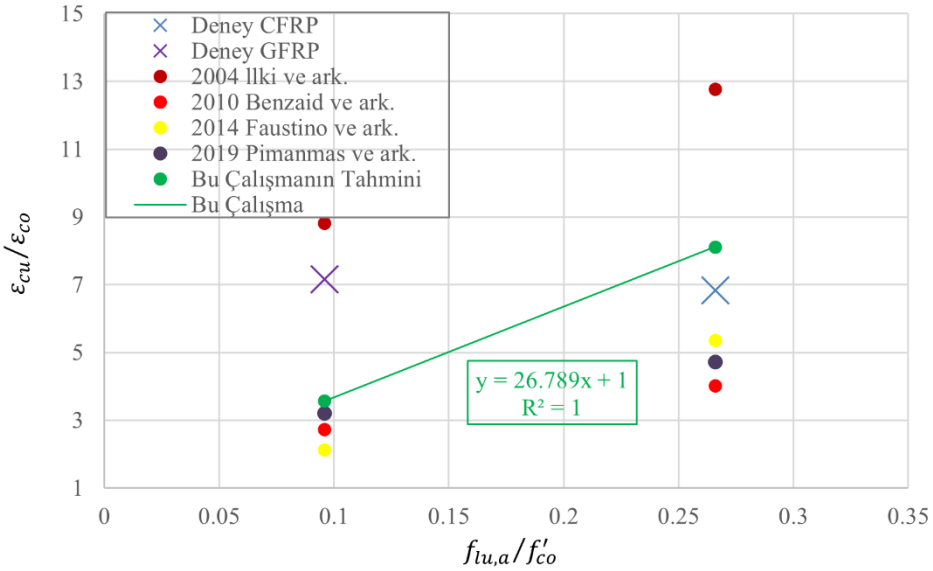
Metrik analizler sonucunda bu çalışmanın öne sürmüş olduğu PET ikameli betonun basınç dayanımı modelinin 3.220 MABE değeri ile en başarılı model önerisi olduğu görülmüştür. Genel olarak tüm modellerin yaklaşık ve tutarlı sonuçlar verdikleri

görülmüş ve yakın tarihli modellerin tahminlerinin daha isabetli olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.14'te önerilen modellerin MABE ve MAPE değerlerinden oluşan grafik verilmiştir.



Şekil 5.14. FRP etkisinde basınç dayanımı modellerinin MABE ve MAPE karşılaştırması.

Gerinim değerlerinin karşılaştırılması için bir ekseni ($f_{lu,a}/f'_{co}$) diğer ekseni ($\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}$) olacak şekilde bir grafik oluşturulmuştur. Oluşturulan grafik Şekil 5.15'te gösterilmiştir.



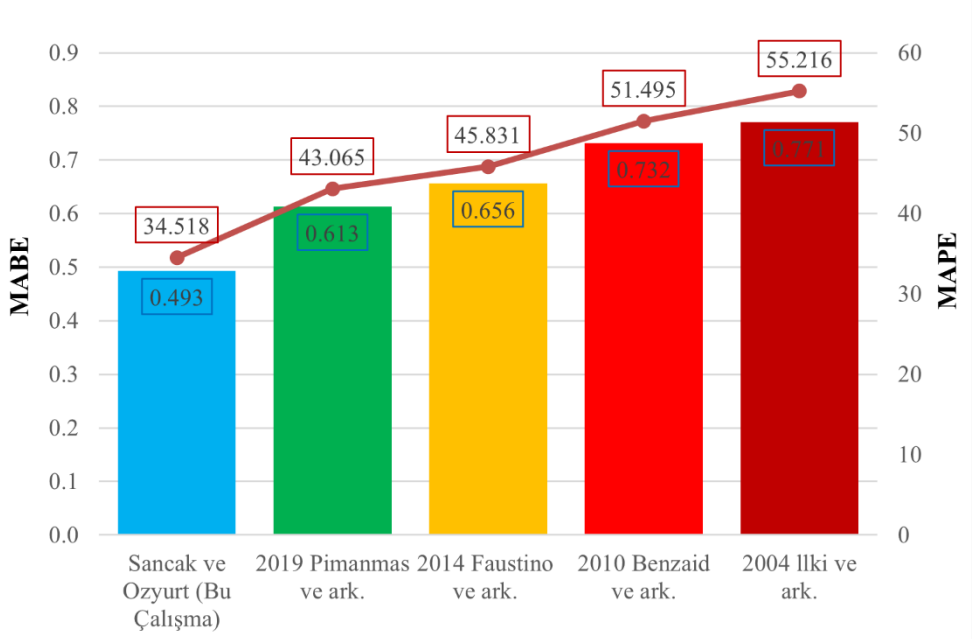
Şekil 5.15. FRP etkisinde nihai gerinim için deneysel veriler ve model tahminleri.

Deneysel veri sayısı sınırlı olsa bile FRP ile sarılmış PET ikameli betonun nihai gerinim değeri için grafik üzerindeki eğilim çizgisi yardımıyla model önerisinde bulunulmuştur. Daha önceki model önerilerin tahminleri grafik üzerinde gösterilmiş ve MABE ve MAPE değerleri hesaplanarak Tablo 5.17'de verilmiştir.

Tablo 5.17. Nihai gerinim değeri için sargılı beton modellerinin deneysel veriler ile uyumu.

Yıl	Referans	Veri sayısı	MABE	MAPE
2004	Ilki ve ark. $\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 20\left(\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}}\right)^{0.5}$	2	0.771	55.216
2010	Benzaid ve ark. $\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 2 + 7.6\left(\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}}\right)$	2	0.732	51.495
2014	Faustino ve ark. $\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 17.65\left(\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}}\right)^{0.7}$	2	0.656	45.831
2019	Pimanmas ve ark. $\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 2 + 6.7\left(\frac{f_{lu}}{f'_{co}}\right)$	2	0.613	43.065
2024	Sancak ve Ozyurt (Bu çalışma) $\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 26.789\left(\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}}\right)$	2	0.493	34.518

Metrik analizler sonucunda bu çalışmanın öne sürmüş olduğu PET ikameli betonun nihai gerinim modelinin 0.493 MABE değeri ile en başarılı model önerisi olduğu görülmüştür. Ilki ve ark. (2004) modelinin tahminlerinin deney verilerinden yüksek, diğer modellerin tahminlerinin ise düşük olduğu görülmüştür. Yakın tarihli modellerin tahminlerinin daha isabetli olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.16'da önerilen modellerin MABE ve MAPE değerlerinden oluşan grafik verilmiştir.



Şekil 5.16. FRP etkisinde nihai gerinim modellerinin MABE ve MAPE karşılaştırması.

6. KOLON DENEYLERİ

Literatürde PET atıkların betonda ikame usulüyle yer almasına dayanan çalışmaların büyük çoğunluğu malzeme deneyleri ile sınırlı kalmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmada 8 adet betonarme kolon oluşturulmuş ve oluşturulan kolonların betonunda PET atık kullanılmıştır. Böylece PET atıkların betonarme bir yapı elemanının davranışına olan etkileri incelenebilmiştir.

Bununla birlikte betonarme kolonlar çevresinin lifli polimer kumaş ile çevrelenmesi suretiyle güçlendirilmişlerdir. Betonarme kolonların hem betonunun içerisinde granül ikamesi olarak PET kullanılması hem de kolonun çevresinin lifli polimer kumaşlar ile sarılmasıyla yeni bir uygulama biçimi geliştirilmiştir.

Betonarme kolonlara iki farklı normal kuvvet uygulanarak, normal kuvvetin içeriden PET ikamesi ve dışarıdan lifli polimer güçlendirilmesi yapılmış kolonlara etkisi incelenmiştir.

6.1. Kolon Deneyleri İçin Tasarım

Bölüm 4.1'de betonda PET ikamesi deneylerinin sonuçlarına göre yapılan TOPSIS metodu sonucunda optimum ikame maddesi yüzdesi olarak %10 seçilmiştir. Bu nedenle ikame maddeli olarak üretilen betonarme kolonların içerisindeki PET ikame maddesi oranı %10 olarak belirlenmiştir.

Ayrıca yapılmış olan malzeme deneyleri sonucunda elde edilen veriler yorumlanarak tekrar TOPSIS metodu uygulanmış ve en uygun sonuçları veren lifli polimer güçlendirme türü belirlenmiştir.

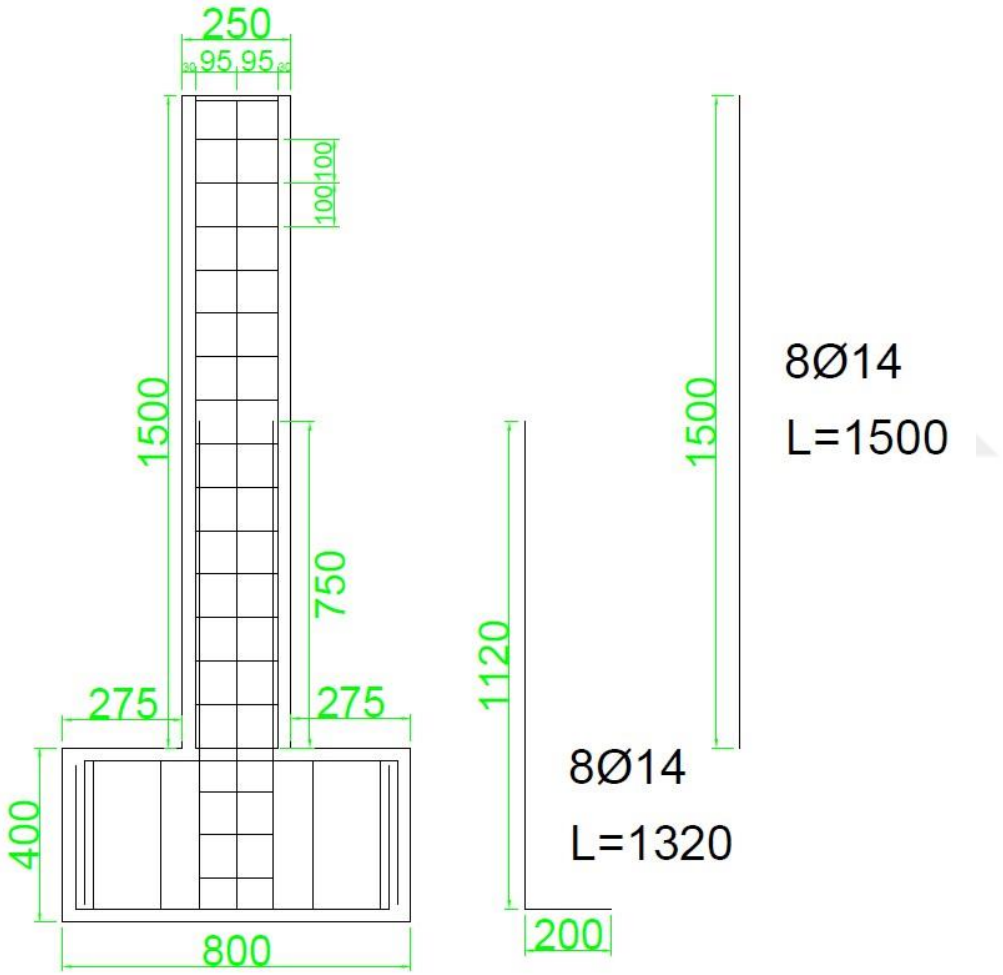
TOPSIS metodu sonucunda daha uygun sonuçlar veren lifli polimer türü olarak karbon lifli polimer seçilmiştir. Betonarme kolonlar, %10 PET atık ikame yüzdesine sahip beton kullanılarak ve etrafları karbon lifli polimer kumaşlar ile sarılarak üretilmişlerdir. Üretilen betonarme kolonlar tekrarlı yükleme deneylerine tabii tutulmuşlardır.

Üretilen betonarme kolonların özellikleri ve isimlendirmesi Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1. Kolon deneyleri isimlendirmesi.

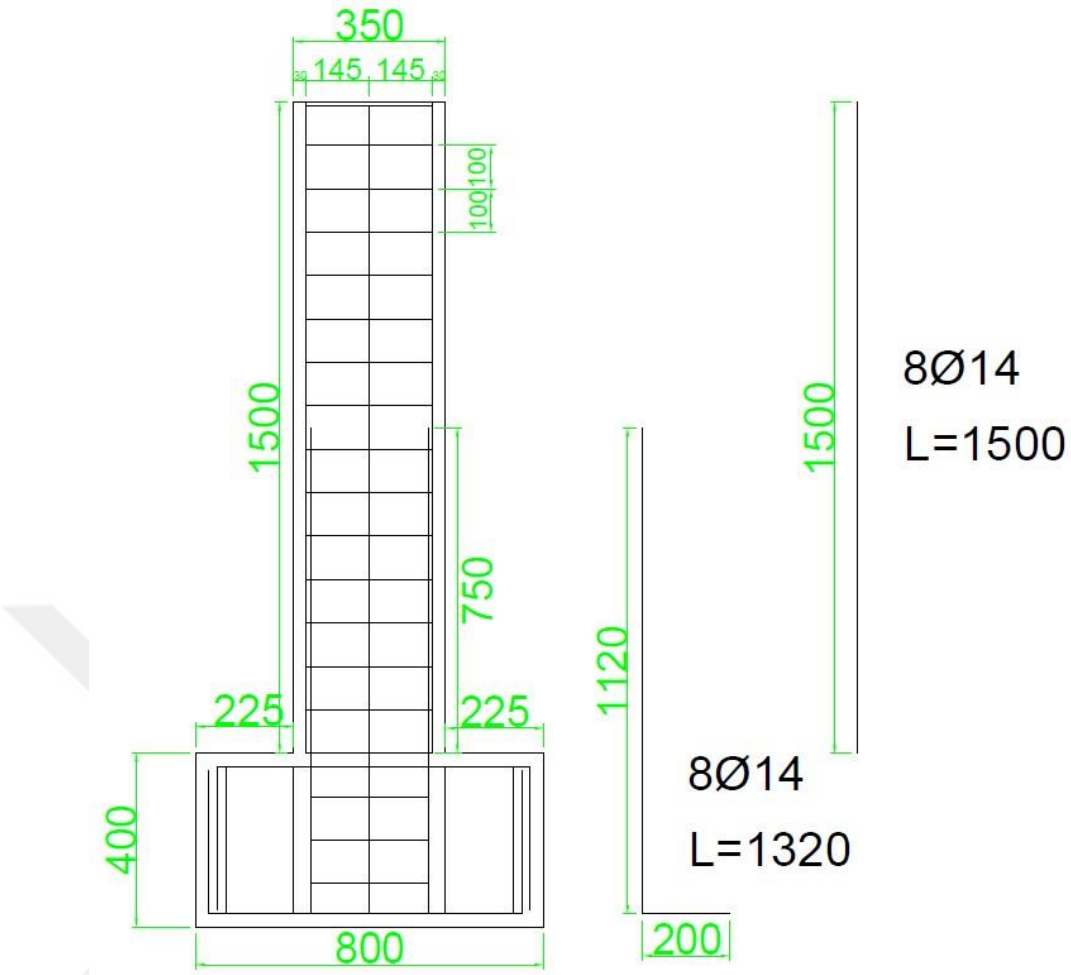
İkame maddesi	İkame maddesi yüzdesi	Eksenel kuvvet oranı ($P/f_{ck}xA_c$)	Numune ismi
-	0	0.15	CL-R-0-015
-	0	0.30	CL-R-0-030
CFRP	0	0.15	CL-CFRP-0-015
CFRP	0	0.30	CL-CFRP-0-030
PET	10	0.15	CL-PET-10-015
PET	10	0.30	CL-PET-10-030
PET-CFRP	10	0.15	CL-PET-CFRP-10-015
PET-CFRP	10	0.30	CL-PET-CFRP-10-030

Oluşturulan betonarme kolonların kısa kenarı için donatı taslağının görüntüsü Şekil 6.1'de verilmiştir.



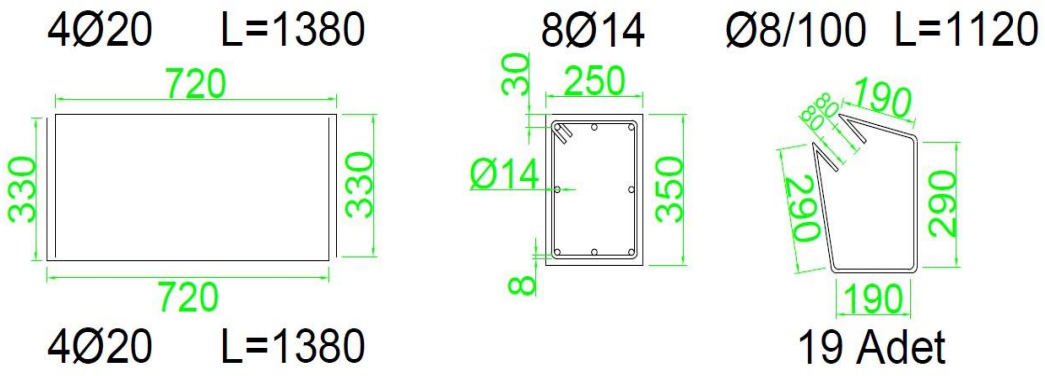
Şekil 6.1. Betonarme kolonların kısa kenarı için donatı taslağı.

Oluşturulan betonarme kolonların uzun kenarı için donatı taslağının görüntüsü Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.2. Betonarme kolonların uzun kenarı için donatı taslağı.

Oluşturulan betonarme kolonların temel donatıları ve etriyeleri için donatı taslağının görüntüsü Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.3. Betonarme kolonların temel donatıları ve etriyeleri için donatı taslağı.

Oluşturulan betonarme kolonlarla ilgili boyut ve donatı detayı Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2. Oluşturulan betonarme kolonların boyut ve donatı detayı.

Kolonlara Dair Özellikler	Özellik Detayı
Kolon altı temel enkesit boyutları	800 x 800 mm
Kolon altı temel boyu	400 mm
Kolon enkesit boyutları	250 x 350 mm
Kolon boyu	1500 mm
Kolon paspayı	30 mm
Kolon boyuna donatıları sayısı ve çapı	8 / Ø14
Kolon etriye donatısı sayısı, çapı ve aralığı	16 / Ø8 / 100 mm

6.2. Kolon Deneyleri İçin Materyal

Kolon numunelerin oluşturulmasında kullanılan betonun üretimi için gerekli olan materyaller betonda PET ikamesi deneyleri ve betonda PET ikamesi ve CFRP sargı deneylerinde kullanılan materyaller ile benzerlik göstermektedir. Bölüm 3.2'de belirtilen tüm malzemeler kolon deneylerinde de kullanılmışlardır. Bunlarla birlikte betonarme kolonların oluşturulmasında ve deneylerin yapılmasında kullanılan diğer materyaller ile ilgili detaylar aşağıda verilmiştir.

6.2.1. Donatı

Betonarme kolonların oluşturulmasında B420C çeliği kullanılmıştır. Kolon boyuna donatıları için 14 mm çaplı donatı, kolon etriye donatıları için 8 mm çaplı donatı kullanılmıştır. Kullanılan donatıların görüntüsü Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4. Betonarme kolonların üretiminde kullanılan donatılar.

6.2.2. Kalıp

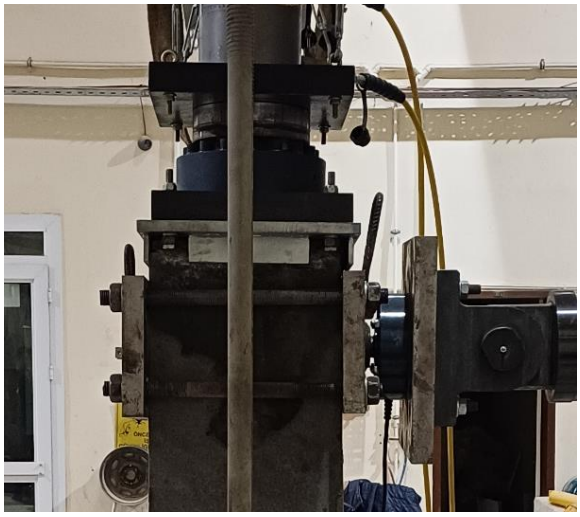
Betonarme kolonların ve kolonların hemen altında bulunan temellerin oluşturulmasında kalıp kullanılmıştır. Kullanılan kalıpların görüntüsü Şekil 6.5'te verilmiştir.



Şekil 6.5. Betonarme kolonların üretiminde kullanılan kalıplar.

6.2.3. Yük hücresi

Deneyler sırasında numunelere uygulanılan yükün ölçülebilmesi için yük hücresi (load cell) kullanılmıştır. Yük hücresinin görüntüsü Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.6. Deneyler esnasında kullanılan yük hücresi.

6.2.4. Lineer potansiyometre

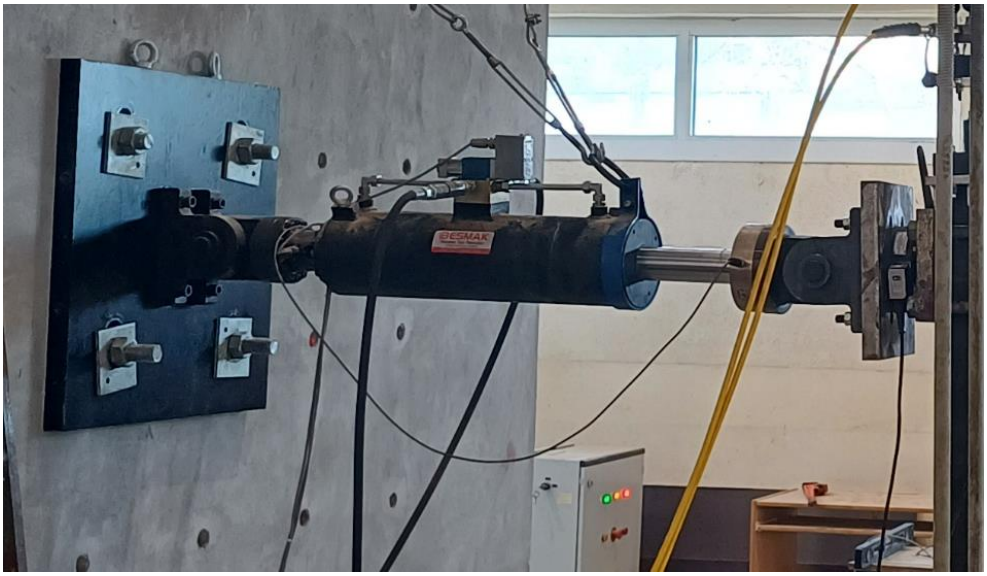
Çalışmada deneysel düzenekler kurulduktan yer değiştirme değerlerinin okunabilmesi için lineer potansiyometre cihazları kullanılmıştır. Lineer potansiyometre cihazının görüntüsü Şekil 6.7'de verilmiştir.



Şekil 6.7. Deneyler esnasında kullanılan potansiyometre.

6.2.5. Aktüatör

Betonarme kolon numunelerin yatay tekrarlı yükler altında incelenebilmesi için deneysel düzenekte reaksiyon duvarına bağlı olan 500 kN kapasiteli aktüatör kullanılmıştır. Aktüatörün görüntüsü Şekil 6.8'de verilmiştir.



Şekil 6.8. Deneyler esnasında kullanılan aktüatör.

6.2.6. Statik veri toplama ünitesi

Kolon deneyleri sırasında elde edilen yük ve yer değiştirme değerlerini eşzamanlı olarak bilgisayar ortamına aktaran statik veri toplama ünitesi kullanılmıştır. Statik veri toplama ünitesinin görüntüsü Şekil 6.9'da verilmiştir.



Şekil 6.9. Deneyler esnasında kullanılan veri toplama ünitesi.

6.3. Kolon Deneyleri İçin Metot

Tez kapsamında 250x350 mm enkesit ve 1500 mm boya sahip 8 adet betonarme kolon üretilmiştir. Kolonların hemen altında 800x800 mm enkesit ve 400 mm yüksekliğe sahip olan kolon temeli oluşturulmuştur. Kolonların donatı düzeni için Tablo 6.2'de verilen detaylar gözetilerek tasarıma uygun şekilde donatı işçiliği gerçekleştirilmiştir. Kolon temeli donatı uygulaması ile ilgili görüntü Şekil 6.10'da verilmiştir.



Şekil 6.10. Betonarme kolon temeli için donatı uygulaması.

Betonarme kolon için donatı uygulaması ile ilgili görüntü Şekil 6.11'de verilmiştir.



Şekil 6.11. Betonarme kolon için donatı uygulaması.

Betonarme kolonlar ve kolonların altındaki temel için kalıplar tedarik edilmiş ve belirlenen boyutlara dikkat edilerek kalıp işçiliği tamamlanmıştır. Kolon temeli için kalıpların kullanımı ile ilgili görüntü Şekil 6.12'da verilmiştir.



Şekil 6.12. Betonarme kolon temeli için kalıp uygulaması.

Betonarme kolonlar için temel üretimi gerçekleştirildikten sonra betonarme kolon donatılarına gerinim ölçerler yerleştirilmiştir. Donatılara gerinim ölçer yerleştirilme işleminin görüntüsü Şekil 6.13'te verilmiştir.



Şekil 6.13. Betonarme kolonlarda gerinim ölçer uygulaması.

Betonarme kolonlar için temel üretimi gerçekleştirildikten sonra betonarme kolon donatıları temel üzerinde bırakılan filizlere yerleştirilmiştir. Donatıları yerleştirilmiş kolonların görüntüsü Şekil 6.14'te verilmiştir.



Şekil 6.14. Betonarme kolonların donatılarının filizlere yerleştirilmesi.

Donatıları hazırlanan betonarme kolonlar kalıplar ile çevrildi ve beton dökümüne hazır hale getirildi. Betonarme kolonlar için kalıpların kullanımı ile ilgili görüntü Şekil 6.15'te verilmiştir.



Şekil 6.15. Betonarme kolonlar için kalıp uygulaması.

Betonarme kolon numunelerin üretiminde kullanılacak olan ikameli ve ikamesiz betonların uygulama metodu betonda PET ikamesi ve betonda PET ikamesi ve CFRP sargı deneylerinde üretilen betonlar ile benzerlik göstermektedir. Bölüm 3.3'te verilen detaylara benzer şekilde fakat 0.55 su/çimento oranı ile ikame yapılmayan ve %10 oranında PET ikame yapılan betonlar üretilmiştir. Şekil 6.16'da %10 oranında PET ikameli beton üretimi için betoniyer içerisine dökülen malzemelerin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.16. Betonarme kolonlar için PET ikameli beton üretimi.

Bölüm 3.3'te verilen detaylara benzer şekilde betoniyer içerisine dökülen malzemeler karıştırılmış ve betonarme kolonlar için beton elde edilmiştir. Elde edilen betonun görüntüsü Şekil 6.17'de verilmiştir.



Şekil 6.17. Betonarme kolonlar için beton üretimi.

Üretilen betonlar kalıp ve donatı işçiliği tamamlanmış kolonlara dökülmüştür. Döküm esnasında dalgıç vibratör yardımıyla vibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Beton dökümü ile ilgili görüntü Şekil 6.18'de verilmiştir.



Şekil 6.18. Betonarme kolonlar için beton dökümü.

Beton dökümünden sonra beton prizini alana kadar beklenilmiş daha sonra kalıplar çıkarılmıştır. Kalıp sökümünün ardından 28 gün boyunca kolonun kürü yapılmış düzenli aralıklarla sulanmıştır.

Betonarme kolonların çevresine epoksi malzemesi sürülmüş ve karbon lifli polimer sargılarla çevrelenerek güçlendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Lifli polimer sargı

uygulaması TBDY (2018) yönlendirmeleri dikkate alınarak kolonların tüm çevresi boyunca ve 250 mm bindirme yapılarak uygulanmıştır. Kolon köşeleri lifli polimerler uygulanmadan önce yuvarlatılmıştır. Lifli polimer sargı uygulamasına dair görüntü Şekil 6.19'da verilmiştir.



Şekil 6.19. Betonarme kolonlar için karbon lifli polimer uygulaması.

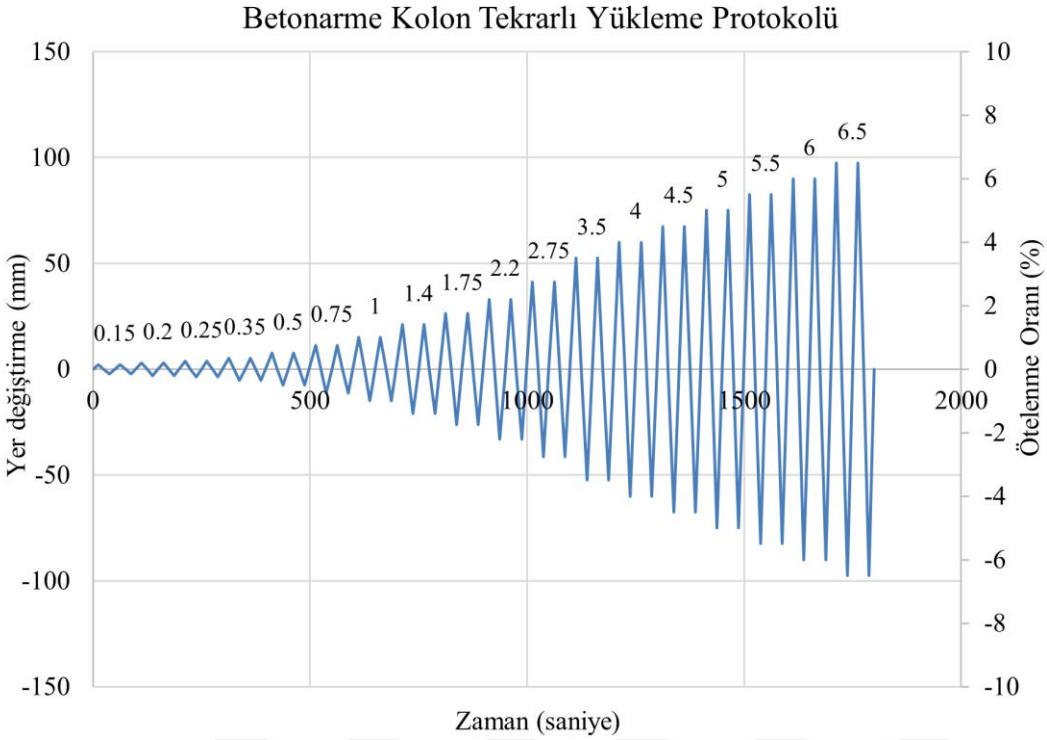
Kolon numuneler ile yapılan deneysel çalışma Düzce Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvarda kolon elemanların döşemeye ankastre şekilde bağlanabildiği rijit döşeme bulunmaktadır. Bununla birlikte kolon elemanları tekrarlı yüklerin etkisine sokacak aktüatörün ankastre şekilde bağlanabildiği reaksiyon duvarı da bulunmaktadır. Çalışmada kullanılan kolon numuneler rijit döşemeye ankastre mesnetlenmiş ve reaksiyon duvarına bağlı olan 500 kN kapasiteli aktüatör ile test edilmiştir. Deney düzeneğinin görüntüsü Şekil 6.20'de verilmiştir.



Şekil 6.20. Betonarme kolonlar için deney düzeneği.

Betonarme kolonlar için gerçekleştirilecek olan deneylerde yatay sismik yükleme için için FEMA 461 (2007)'de önerilen deplasman kontrollü bir yükleme protokolü kullanılmıştır. %0.15, %0.20, %0.25, %0.35, %0.50, %0.75, %1.00, %1.40, %1.75, %2.20, %2.75, %3.50, %4.00, %4.50, %5.00, %5.50, %6.00 ve %6.50 ötelenme

oranları (DR) için her seviyede iki döngü olacak şekilde uygulanmıştır. Tekrarlı yükleme protokolüne ait görüntü Şekil 6.21'de verilmiştir.



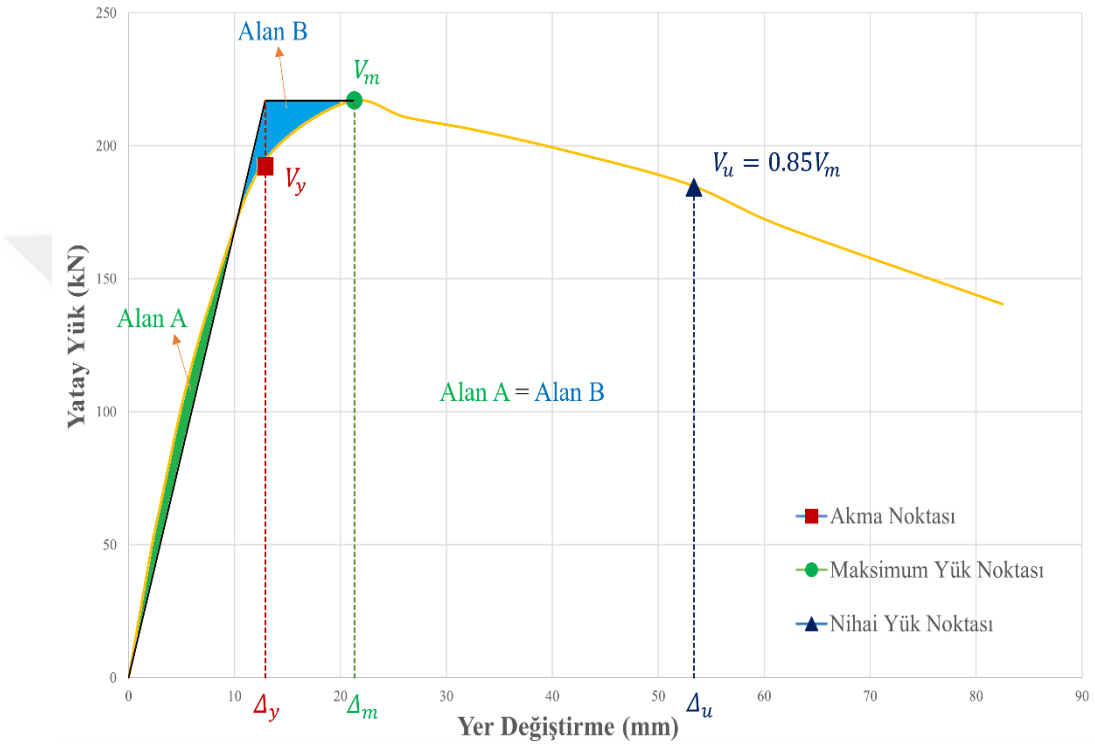
Şekil 6.21. Betonarme kolonlar için tekrarlı yükleme protokolü.

6.4. Kolon Deneyleri İçin Deney Sonuçları

Tez kapsamında 8 adet betonarme kolon üretilmiş ve kolonlar üzerinde tekrarlı yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında kolon elemanlara uygulanan yüklerin tespit edilebilmesi için yük hücresi kullanılmıştır. Ayrıca uygulanan yüklere karşılık gelen yer değiştirmelerin ölçülebilmesi için lineer potansiyometre kullanılmıştır. Statik veri toplama ünitesi aracılığıyla deneyler sırasında elde edilen yük ve yer değiştirme değerleri eşzamanlı olarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında kolon elemanların donatılarında meydana gelecek birim şekil değiştirmelerin ölçümü gerinim pulları (strain gauge) aracılığıyla yapılmıştır. Deneyler sonucunda kolon numuneler için yatay yük-yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Deney aşamaları not altına alınarak çeşitli sınır değerler işaretlenmiştir.

Tekrarlı yük uygulanarak oluşturulan yatay yük-yer değiştirme grafiklerinden zarf eğrileri elde edilmiştir. Zarf eğrileri oluşturulurken her ötelenme oranı için uygulanan iki döngüden ilki dikkate alınmıştır. Zarf eğrilerinden her betonarme kolon için akma dayanımı ve akma yer değiştirmesi, maksimum dayanım ve maksimum yer değiştirme,

nihai dayanım ve nihai yer değiştirme değerleri işaretlenmiştir. Akma dayanımı ve akma yer değiştirmesi eşdeğer enerji yöntemi (Park, 1989) kullanılarak elde edilmiştir. Nihai dayanım değeri maksimum dayanım değerinin %15 azalması sonucunda elde edilen dayanım ve nihai yer değiştirme değeri ise nihai dayanıma karşılık gelen yer değiştirme değeri olarak hesap edilmiştir. Şekil 6.22'de eşdeğer enerji yöntemine dair bilgileri barındıran grafik verilmiştir.



Şekil 6.22. Eşdeğer enerji yöntemi.

Şekil 6.22'de V_y akma dayanımını, Δ_y akma yer değiştirmesini, V_m maksimum dayanımı, Δ_m maksimum dayanım anındaki yer değiştirmeyi, V_u nihai dayanımı, Δ_u nihai dayanım anındaki yer değiştirmeyi ifade etmektedir.

Şekil 6.22'de gösterilmiş olduğu gibi zarf eğrilerinden elde edilen akma yer değiştirmesi ve nihai dayanım anındaki yer değiştirme değerlerini kullanarak Denklem 6.1'de verildiği gibi her betonarme kolon numunesi için süneklik katsayısı (μ) değerleri hesaplanmıştır.

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \tag{6.1}$$

Deneylerden elde edilen veriler Tablo 6.3'te verilmiştir.

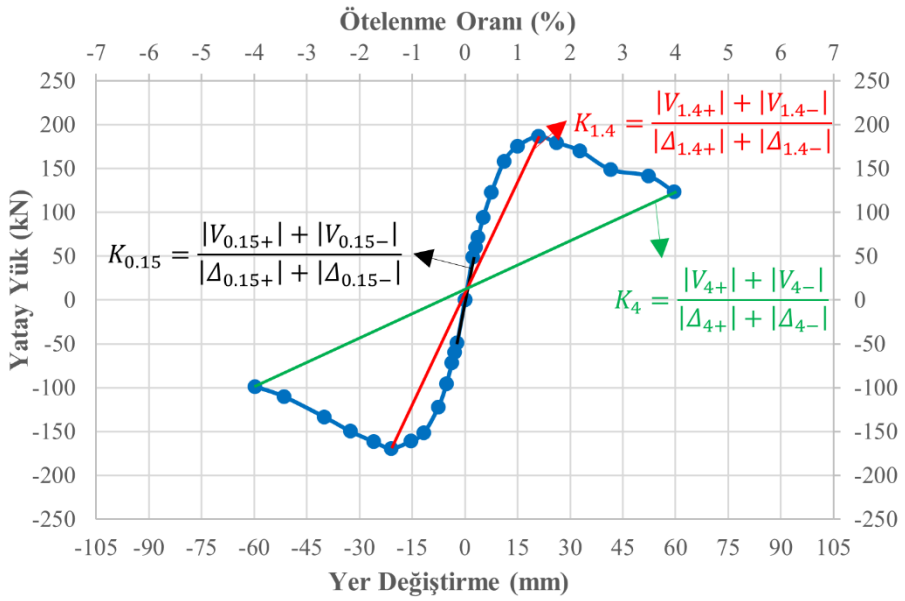
Tablo 6.3. Kolon numunelerin deney sonuçları.

Numune ismi	Yük yönü	Δ_y (mm)	V_y (kN)	DR_y (%)	Δ_m (mm)	V_m (kN)	DR_m (%)	Δ_u (mm)	V_u (kN)	DR_u (%)	μ
CL-R-0-015	+	12.198	163.244	0.813	20.928	186.603	1.395	37.440	158.613	2.496	3.069
	-	11.408	148.047	0.761	20.988	169.282	1.399	35.285	143.890	2.352	3.093
	ORT	11.803	155.646	0.787	20.958	177.943	1.397	36.362	151.251	2.424	3.081
CL-R-0-030	+	12.833	185.536	0.856	20.969	206.374	1.398	28.453	175.418	1.897	2.217
	-	12.222	166.849	0.815	20.679	183.293	1.379	27.350	155.799	1.823	2.238
	ORT	12.528	176.192	0.835	20.824	194.833	1.388	27.901	165.608	1.860	2.227
CL-CFRP-0-015	+	12.567	172.091	0.838	26.131	193.806	1.742	79.582	164.735	5.305	6.333
	-	12.452	162.628	0.830	26.136	188.769	1.742	57.703	160.454	3.847	4.634
	ORT	12.509	167.359	0.834	26.134	191.287	1.742	68.642	162.594	4.576	5.483
CL-CFRP-0-030	+	12.916	192.266	0.861	21.323	216.978	1.422	53.365	184.432	3.558	4.132
	-	12.977	180.644	0.865	25.766	203.319	1.718	51.276	172.821	3.418	3.951
	ORT	12.947	186.455	0.863	23.545	210.148	1.570	52.321	178.626	3.488	4.041
CL-PET-10-015	+	12.242	152.830	0.816	20.926	176.844	1.395	37.938	150.317	2.529	3.099
	-	12.189	141.090	0.813	21.019	156.176	1.401	39.076	132.749	2.605	3.206
	ORT	12.216	146.960	0.814	20.972	166.510	1.398	38.507	141.533	2.567	3.152
CL-PET-10-030	+	12.101	165.679	0.807	21.086	189.314	1.406	28.722	160.917	1.915	2.374
	-	12.526	156.453	0.835	20.746	168.808	1.383	26.908	143.486	1.794	2.148
	ORT	12.313	161.066	0.821	20.916	179.061	1.394	27.815	152.202	1.854	2.261
CL-PET-CFRP-10-015	+	11.641	157.836	0.776	26.072	181.946	1.738	71.779	154.654	4.785	6.166
	-	11.511	149.407	0.767	26.082	175.780	1.739	58.202	149.413	3.880	5.056
	ORT	11.576	153.622	0.772	26.077	178.863	1.738	64.990	152.033	4.333	5.611
CL-PET-CFRP-10-030	+	12.162	182.984	0.811	21.230	207.530	1.415	49.445	176.401	3.296	4.066
	-	11.994	162.856	0.800	25.674	191.112	1.712	51.087	162.446	3.406	4.259
	ORT	12.078	172.920	0.805	23.452	199.321	1.563	50.266	169.423	3.351	4.162

Betonarme kolonların zarf eğrilerinden rijitlik azalması değerleri elde edilmiştir. Rijitlik azalması yapısal elemanların tekrarlı yükler altındaki davranışını değerlendirmek için önemli parametrelerden biridir. Deneyler esnasında betonarme kolonlar her ötelenme oranında iki döngü olacak şekilde yatay olarak zorlanmışlardır. Rijitlik azalması değerleri bulunurken her ötelenme oranı için ilk döngüden elde edilen veriler dikkate alınmıştır. Yatay yük-yer değiştirme eğrilerinde her ötelenme oranına karşılık gelen pozitif ve negatif yük değerleri ile pozitif ve negatif yer değiştirme değerleri mutlak değer içerisinde toplanmıştır. Toplanmış yük değerlerinin, toplanmış yer değiştirme değerlerine bölünmesi ile her ötelenme oranı için sekant rijitliği (K_{DR}) hesaplanmıştır. Denklem 6.2'de her ötelenme oranı için sekant rijitliğinin formülü verilmiştir.

$$K_{DR} = \frac{|V_{DR+}| + |V_{DR-}|}{|\Delta_{DR+}| + |\Delta_{DR-}|} \tag{6.2}$$

Sekant rijitliğinin bulunuşu ile ilgili görsel Şekil 6.23'te verilmiştir.



Şekil 6.23. Sekant rijitliği hesabı.

İlk ötelenme oranı olan %0.15 ötelenme oranına karşılık gelen sekant rijitliği ($K_{0.15}$), birinci sekant rijitliği olarak kabul edilmiştir. Her döngüdeki sekant rijitliği (K_{DR}) birinci sekant rijitliğine bölünerek rijitlik azalma oranları (λ_K) bulunmuştur. Denklem 6.3'te rijitlik azalma oranı (λ_K) hesabı verilmiştir.

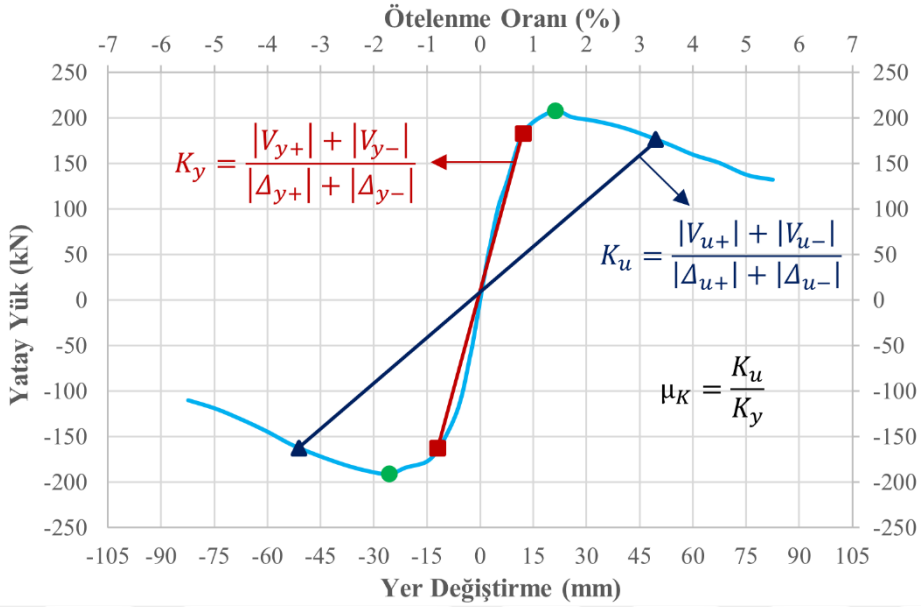
$$\lambda_K = \frac{K_{DR}}{K_{0.15}} \tag{6.3}$$

Kolon numunelerin her ötelenme oranlarına karşılık gelen sekant rijitlikleri ve rijitlik azalma oranları ilerleyen alt bölümlerde verilmiştir.

Deney numunelerinin akma anına karşılık gelen rijitlik değeri (K_y) akma rijitlik değeri olarak, numunelerin nihai yük anına karşılık gelen rijitlik değeri (K_u) nihai rijitlik değeri olarak adlandırılmaktadır. Çalışmada bu iki değerin oranı rijitlik katsayısı (μ_K) olarak adlandırılmıştır. Denklem 6.4'te rijitlik katsayısı (μ_K) hesabı verilmiştir.

$$\mu_K = \frac{K_u}{K_y} \tag{6.4}$$

Rijitlik katsayısının bulunuşu ile ilgili görsel Şekil 6.24'te verilmiştir.



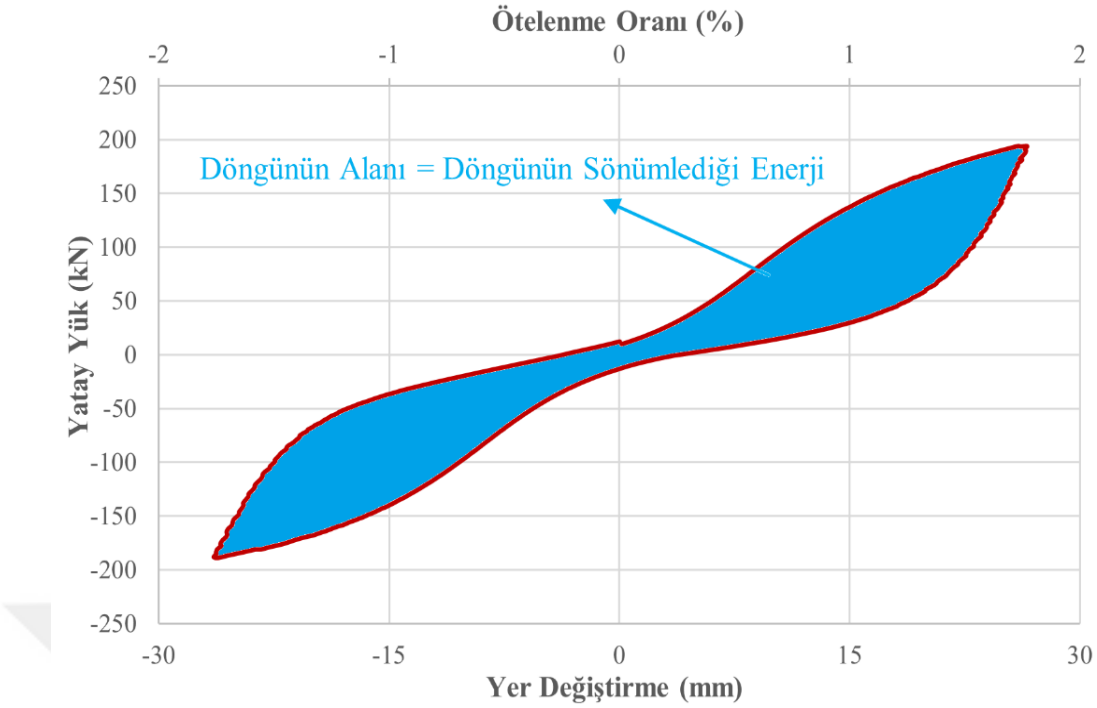
Şekil 6.24. Rijitlik katsayısı hesabı.

Kolon numunelerin rijitlik katsayıları Tablo 6.4'te verilmiştir.

Tablo 6.4. Kolon numunelerin rijitlik katsayıları.

Numune ismi	Akma rijitlik değeri (K_y) (kN/mm)	Nihai rijitlik değeri (K_u) (kN/mm)	Rijitlik katsayısı (K_u/K_y) (μ_K)
CL-R-0-015	13.187	4.160	0.315
CL-R-0-030	14.064	5.936	0.422
CL-CFRP-0-015	13.379	2.369	0.177
CL-CFRP-0-030	14.402	3.414	0.237
CL-PET-10-015	12.030	3.675	0.306
CL-PET-10-030	13.081	5.472	0.418
CL-PET-CFRP-10-015	13.271	2.339	0.176
CL-PET-CFRP-10-030	14.317	3.371	0.235

Tekrarlı yükler altında test edilen yapı elemanlarında en önemli parametrelerden biri de enerji sönümleme kapasitesidir. Tekrarlı yatay yükler altındaki kolonlarda enerji sönümleme kapasitesi tekrarlı yatay yük-yer değiştirme eğrisinin altında kalan alan olarak hesaplanabilir. Kolon numunelerin enerji sönümleme kapasiteleri hesaplanırken her ötelenme oranında yapılan iki yüklemenin ikisi de hesaba katılmıştır. Enerji sönümleme kapasite hesabı ile ilgili görsel Şekil 6.25'te verilmiştir.



Şekil 6.25. Enerji sönümleme kapasitesi hesabı.

Kolon numunelerin her ötelenme oranlarına karşılık gelen enerji sönümleme kapasiteleri ilerleyen alt bölümlerde verilmiştir.

Deney numunelerinin her ötelenme oranına karşılık gelen enerji sönümleme değeri (E_{DR}) bulunmuş ve bu değerler toplanarak kümülatif enerji sönümleme değerleri (E_{cum}) elde edilmiştir. Elde edilen kümülatif enerji sönümleme değerleri (E_{cum}) Tablo 6.5'te verilmiştir.

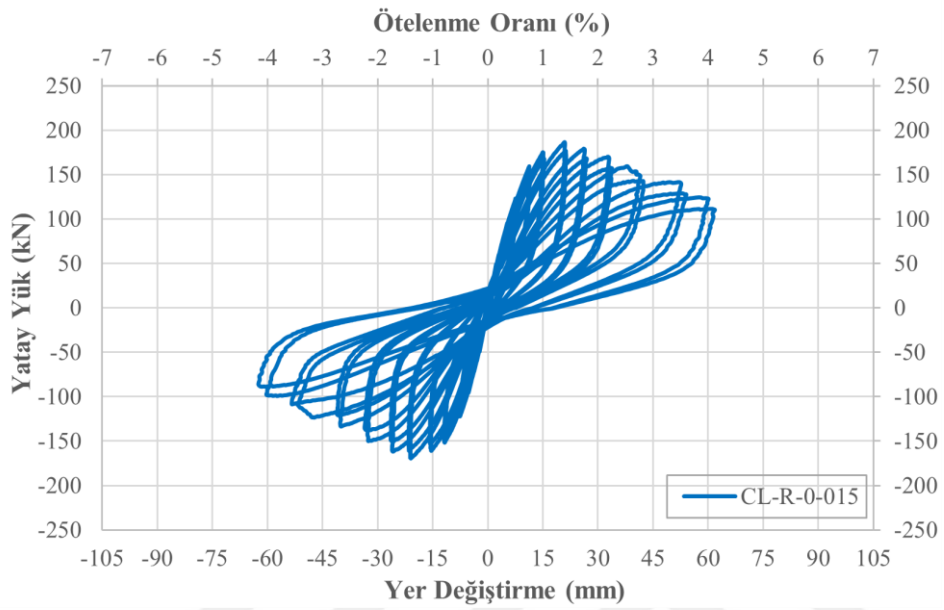
Tablo 6.5. Kolon numunelerin kümülatif enerji sönümleme değerleri.

Numune ismi	Kümülatif enerji sönümleme değeri (E_{cum}) (J)
CL-R-0-015	65113.697
CL-R-0-030	37741.823
CL-CFRP-0-015	239683.432
CL-CFRP-0-030	176763.616
CL-PET-10-015	54941.799
CL-PET-10-030	34343.937
CL-PET-CFRP-10-015	199417.434
CL-PET-CFRP-10-030	154847.392

Her kolon numunesi için deneyler sonucunda elde edilen grafikler ve görseller aşağıda verilmiştir.

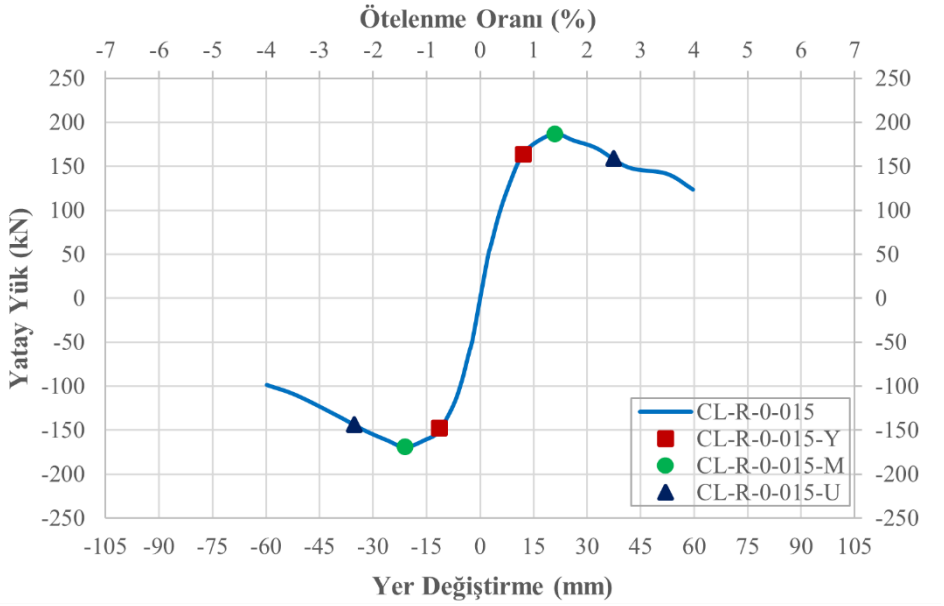
6.4.1. CL-R-0-015 kolonu

CL-R-0-015 numunesi PET ikamesi ve karbon lifli polimer sargı kullanılmadan $0.15f_{ck}A_c$ normal kuvveti altında test edilmiştir. Test sonucunda elde edilen yatay yük-yer değiştirme grafiği Şekil 6.26'da verilmiştir.



Şekil 6.26. CL-R-0-015 yatay yük-yer değiştirme grafiği.

Test sonucunda elde edilen zarf eğrisi grafiği Şekil 6.27'de verilmiştir.



Şekil 6.27. CL-R-0-015 zarf eğrisi.

CL-R-0-015 numunesi için deney sonucunda elde edilen veriler Tablo 6.6'da verilmiştir.

Tablo 6.6. CL-R-0-015 numunesi deney sonuçları.

Numune ismi	Yük yönü	Δ_y (mm)	V_y (kN)	DR_y (%)	Δ_m (mm)	V_m (kN)	DR_m (%)	Δ_u (mm)	V_u (kN)	DR_u (%)	μ
CL-R-0-015	+	12.198	163.244	0.813	20.928	186.603	1.395	37.440	158.613	2.496	3.069
	-	11.408	148.047	0.761	20.988	169.282	1.399	35.285	143.890	2.352	3.093
	ORT	11.803	155.646	0.787	20.958	177.943	1.397	36.362	151.251	2.424	3.081

CL-R-0-015 numunesi için deney sonrasında alınan hasarlar ile ilgili görüntüler Şekil 6.28'de verilmiştir.



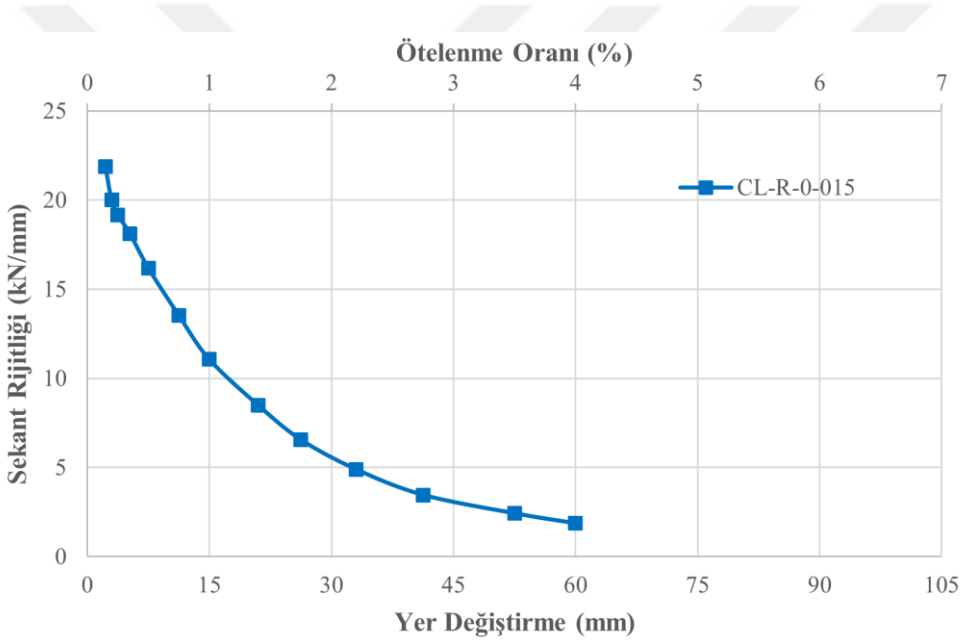
Şekil 6.28. CL-R-0-015 numunesi deney sonrası görüntüleri.

CL-R-0-015 numunesinde her ötelenme oranının ilk döngüsü için sekant rijitliği bulunmuştur. Bulunan sekant rijitlikleri ilk ötelenme oranına bölünerek sekant rijitlik oranları bulunmuştur. Bulunan değerler Tablo 6.7'de verilmiştir.

Tablo 6.7. CL-R-0-015 numunesi için rijitlik değerleri.

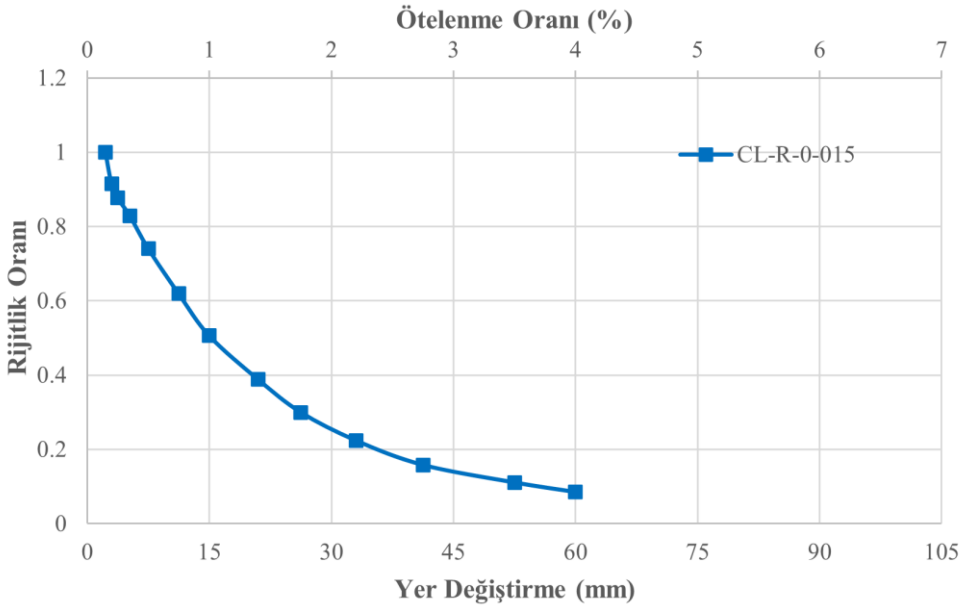
Ötelenme oranı (%)	Sekant rijitliği (K_{DR}) (kN/mm)	Sekant rijitlik oranı ($K_{DR}/K_{0.15}$) (λ_K)
0.15	21.867	1.000
0.2	20.005	0.915
0.25	19.169	0.877
0.35	18.119	0.829
0.5	16.193	0.741
0.75	13.531	0.619
1	11.058	0.506
1.4	8.490	0.388
1.75	6.552	0.300
2.2	4.898	0.224
2.75	3.456	0.158
3.5	2.423	0.111
4	1.858	0.085

CL-R-0-015 numunesi için sekant rijitliği ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.29'da verilmiştir.



Şekil 6.29. CL-R-0-015 numunesi sekant rijitliği grafiği.

CL-R-0-015 numunesi için sekant rijitlik oranı ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.30'da verilmiştir.



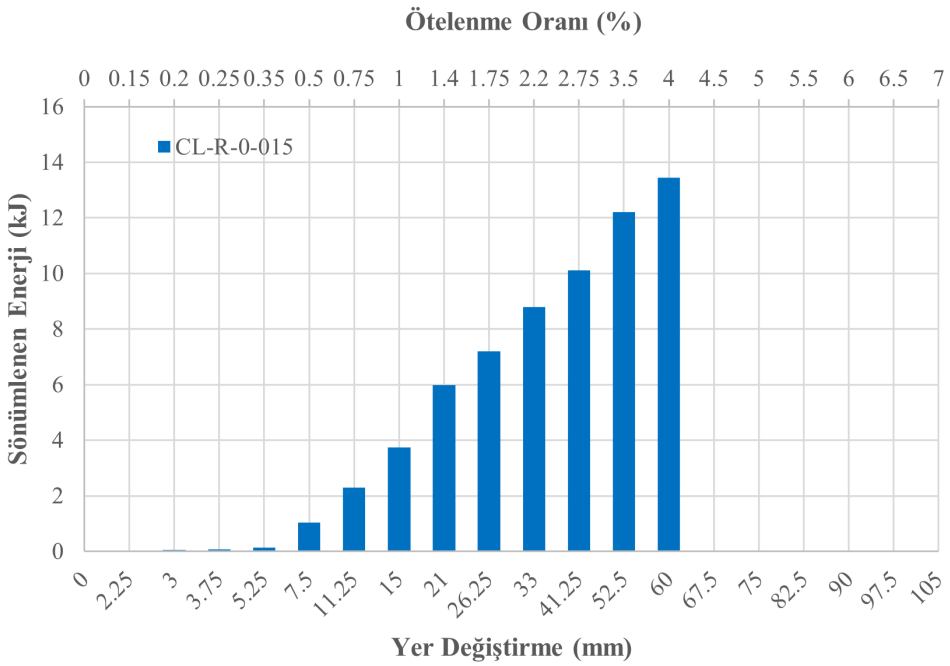
Şekil 6.30. CL-R-0-015 numunesi sekant rijitlik oranı grafiği.

CL-R-0-015 numunesinin her ötelenme oranında sönümlemiş olduğu enerji değerleri (E_{DR}) ayrı ayrı olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan enerji değerleri bir sonraki ötelenme oranındaki sönümlenen enerji değerleri ile toplanarak kümülatif enerji değerleri (E_{cum}) elde edilmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 6.8'de verilmiştir.

Tablo 6.8. CL-R-0-015 numunesi için sönümlenen enerji değerleri.

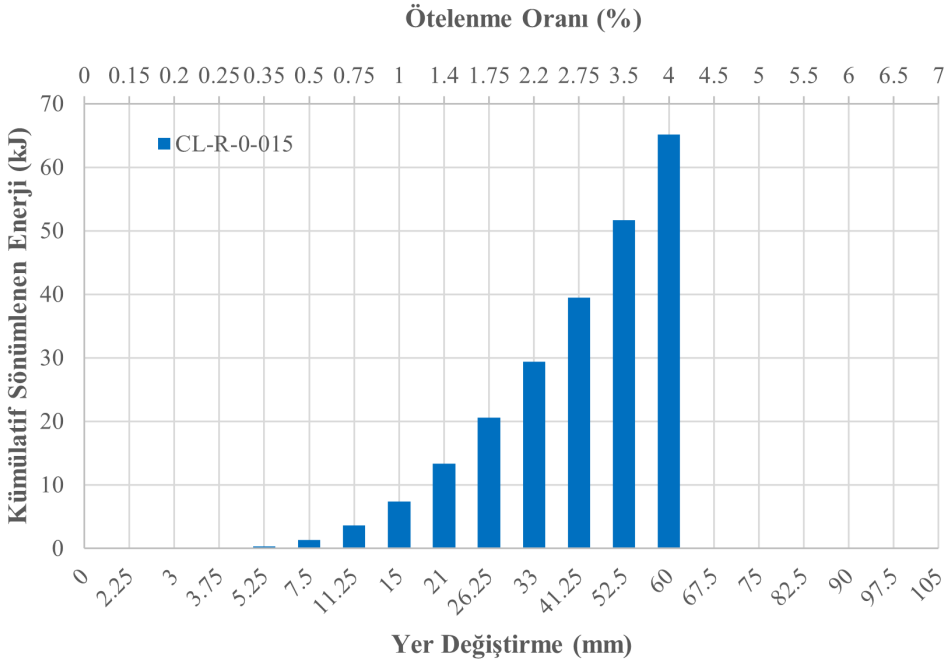
Ötelenme oranı (%)	Sönümlenen enerji (E_{DR}) (kNmm) (J)	Kümülatif sönümlenen enerji (E_{cum}) (kNmm) (J)
0.15	15.602	15.602
0.2	48.030	63.631
0.25	77.008	140.639
0.35	144.508	285.147
0.5	1046.522	1331.669
0.75	2285.594	3617.263
1	3746.099	7363.362
1.4	5978.395	13341.757
1.75	7198.896	20540.653
2.2	8801.718	29342.371
2.75	10114.912	39457.283
3.5	12207.707	51664.990
4	13448.707	65113.697

CL-R-0-015 numunesi için her ötelenme oranında elde edilen sönümlenen enerji değeri ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.31'de verilmiştir.



Şekil 6.31. CL-R-0-015 numunesi sönümlenen enerji grafiği.

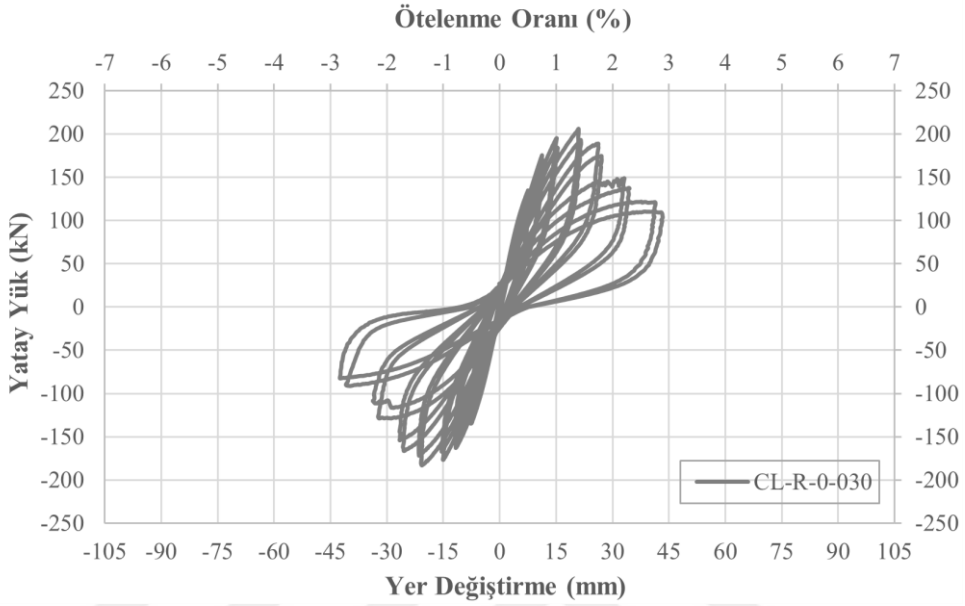
CL-R-0-015 numunesi için her ötelenme oranında elde edilen kümülatif sönümlenen enerji değeri ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.32'de verilmiştir.



Şekil 6.32. CL-R-0-015 numunesi kümülatif sönümlenen enerji grafiği.

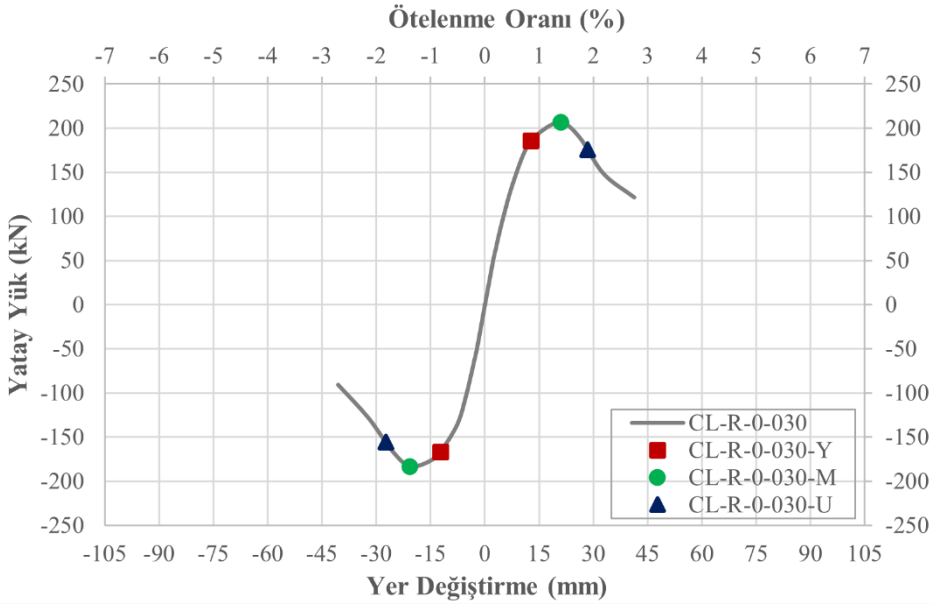
6.4.2. CL-R-0-030 kolonu

CL-R-0-030 numunesi PET ikamesi ve karbon lifli polimer sargı kullanılmadan $0.30 f_{ck} A_c$ normal kuvveti altında test edilmiştir. Test sonucunda elde edilen yatay yük-yer değiştirme grafiği Şekil 6.33'te verilmiştir.



Şekil 6.33. CL-R-0-030 yatay yük-yer değiştirme grafiği.

Test sonucunda elde edilen zarf eğrisi grafiği Şekil 6.34'te verilmiştir.



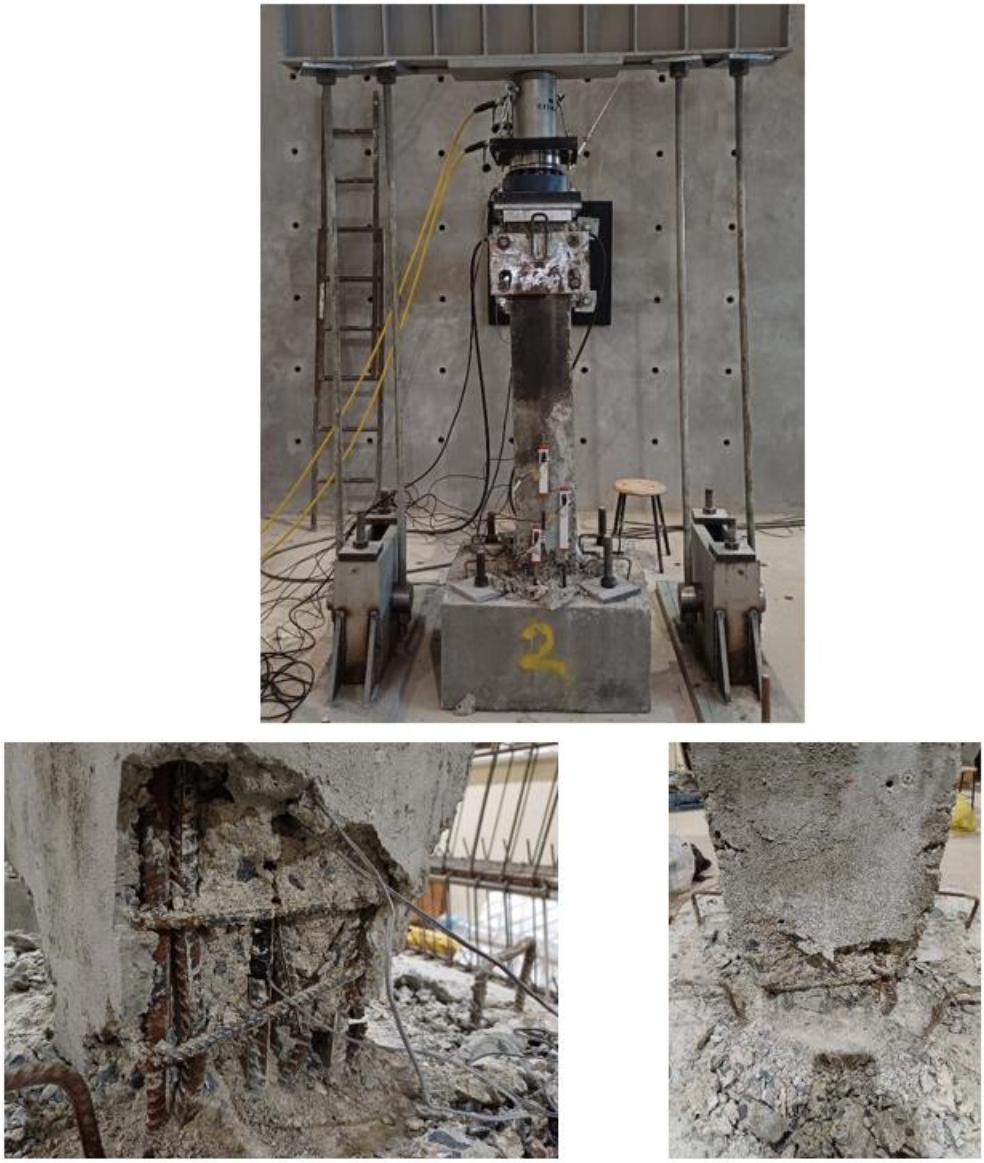
Şekil 6.34. CL-R-0-030 zarf eğrisi.

CL-R-0-030 numunesi için deney sonucunda elde edilen veriler Tablo 6.9'da verilmiştir.

Tablo 6.9. CL-R-0-030 numunesi deney sonuçları.

Numune ismi	Yük yönü	Δ_y (mm)	V_y (kN)	DR_y (%)	Δ_m (mm)	V_m (kN)	DR_m (%)	Δ_u (mm)	V_u (kN)	DR_u (%)	μ
CL-R-0-030	+	12.833	185.536	0.856	20.969	206.374	1.398	28.453	175.418	1.897	2.217
	-	12.222	166.849	0.815	20.679	183.293	1.379	27.350	155.799	1.823	2.238
	ORT	12.528	176.192	0.835	20.824	194.833	1.388	27.901	165.608	1.860	2.227

CL-R-0-030 numunesi için deney sonrasında alınan hasarlar ile ilgili görüntüler Şekil 6.35'te verilmiştir.



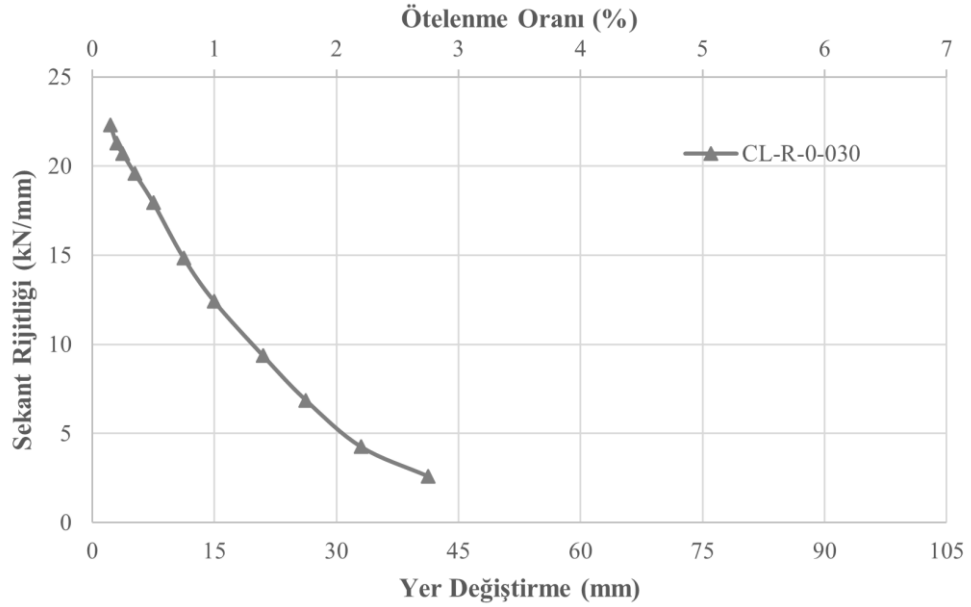
Şekil 6.35. CL-R-0-030 numunesi deney sonrası görüntüleri.

CL-R-0-030 numunesinde her ötelenme oranının ilk döngüsü için sekant rijitliği bulunmuştur. Bulunan sekant rijitlikleri ilk ötelenme oranına bölünerek sekant rijitlik oranları bulunmuştur. Bulunan değerler Tablo 6.10'da verilmiştir.

Tablo 6.10. CL-R-0-030 numunesi için rijitlik değerleri.

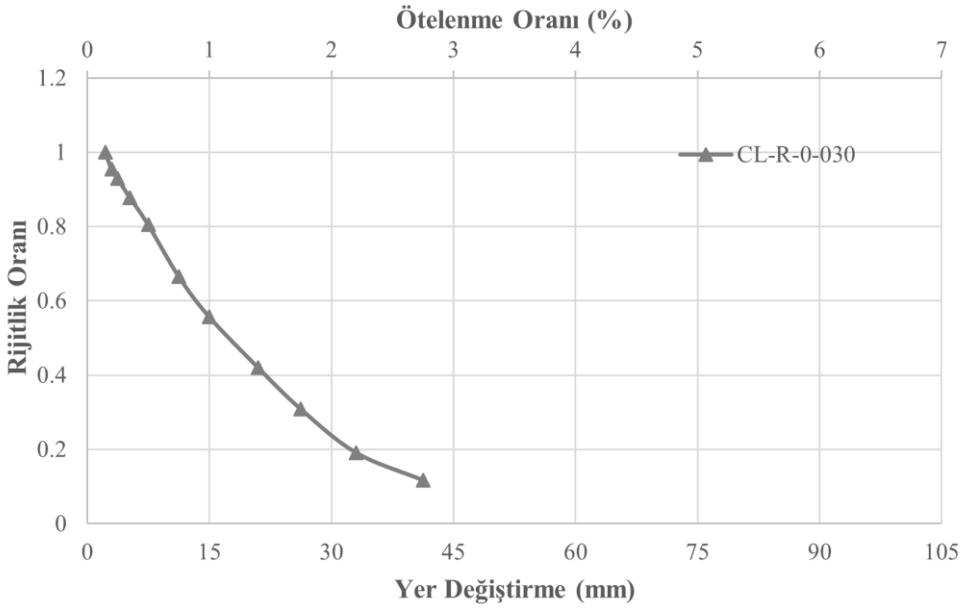
Ötelenme oranı (%)	Sekant rijitliği (K_{DR}) (kN/mm)	Sekant rijitlik oranı ($K_{DR}/K_{0.15}$) (λ_K)
0.15	22.310	1.000
0.2	21.271	0.953
0.25	20.710	0.928
0.35	19.581	0.878
0.5	17.949	0.805
0.75	14.836	0.665
1	12.407	0.556
1.4	9.356	0.419
1.75	6.863	0.308
2.2	4.257	0.191
2.75	2.595	0.116

CL-R-0-030 numunesi için sekant rijitliği ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.36'da verilmiştir.



Şekil 6.36. CL-R-0-030 numunesi sekant rijitliği grafiği.

CL-R-0-030 numunesi için sekant rijitlik oranı ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.37'de verilmiştir.



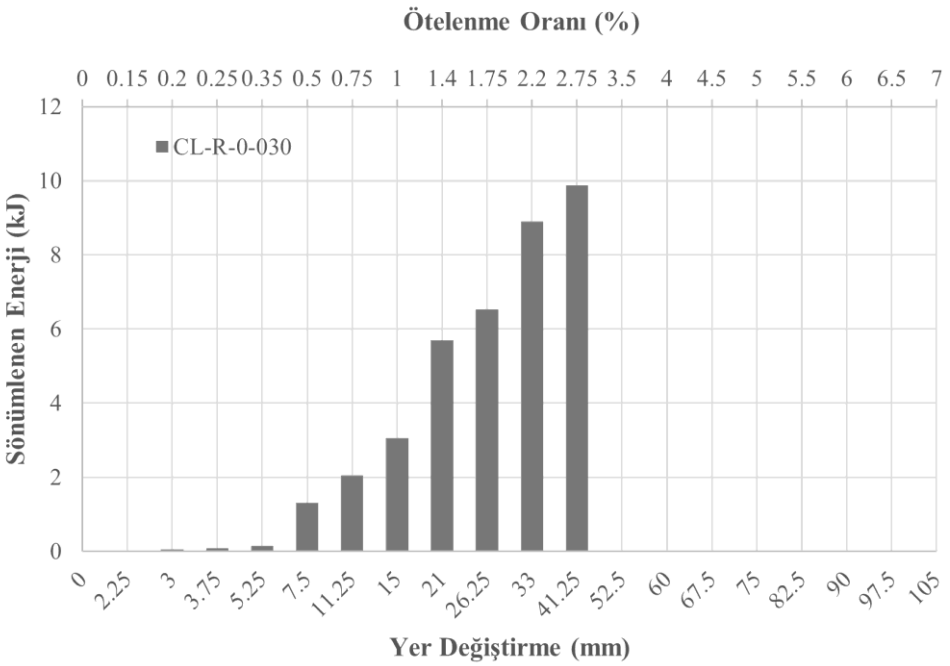
Şekil 6.37. CL-R-0-030 numunesi sekant rijitlik oranı grafiği.

CL-R-0-030 numunesinin her ötelenme oranında sönümlemiş olduğu enerji değerleri (E_{DR}) ayrı ayrı olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan enerji değerleri bir sonraki ötelenme oranındaki sönümlenen enerji değerleri ile toplanarak kümülatif enerji değerleri (E_{cum}) elde edilmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 6.11'de verilmiştir.

Tablo 6.11. CL-R-0-030 numunesi için sönümlenen enerji değerleri.

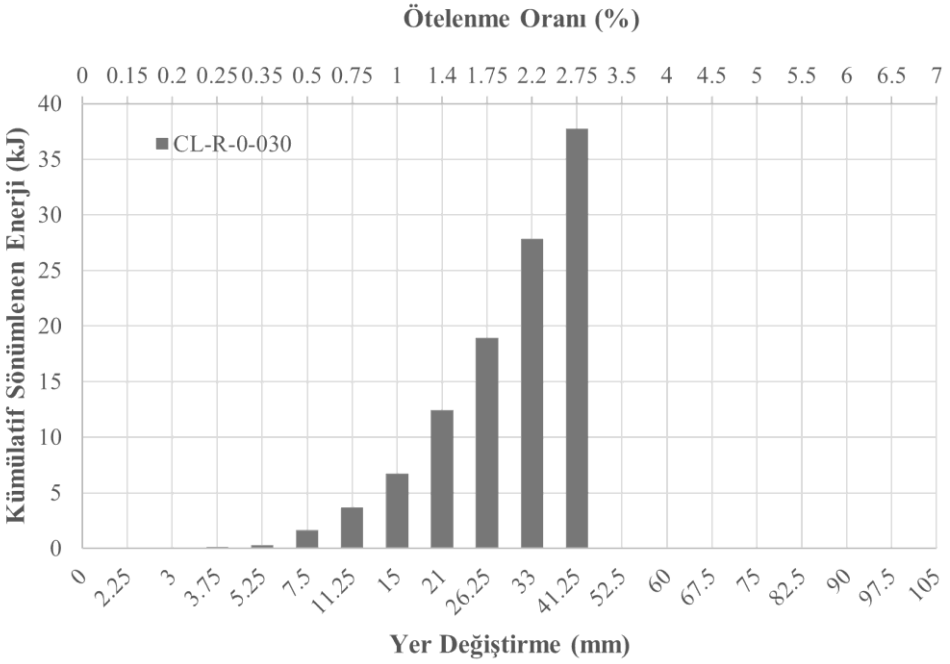
Ötelenme oranı (%)	Sönümlenen enerji (E_{DR}) (kNmm) (J)	Kümülatif sönümlenen enerji (E_{cum}) (kNmm) (J)
0.15	16.160	16.160
0.2	50.908	67.067
0.25	83.772	150.839
0.35	156.578	307.417
0.5	1317.695	1625.112
0.75	2050.376	3675.488
1	3058.717	6734.205
1.4	5695.447	12429.652
1.75	6531.581	18961.233
2.2	8896.764	27857.996
2.75	9883.827	37741.823

CL-R-0-030 numunesi için her ötelenme oranında elde edilen sönümlenen enerji değeri ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.38'de verilmiştir.



Şekil 6.38. CL-R-0-030 numunesi sönümlenen enerji grafiği.

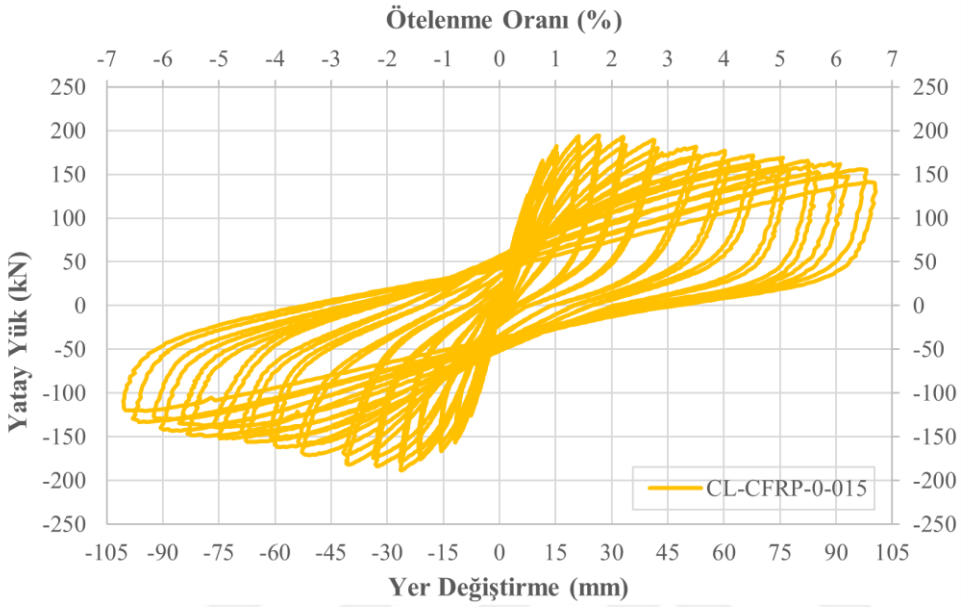
CL-R-0-030 numunesi için her ötelenme oranında elde edilen kümülatif sönümlenen enerji değeri ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.39'da verilmiştir.



Şekil 6.39. CL-R-0-030 numunesi kümülatif sönümlenen enerji grafiği.

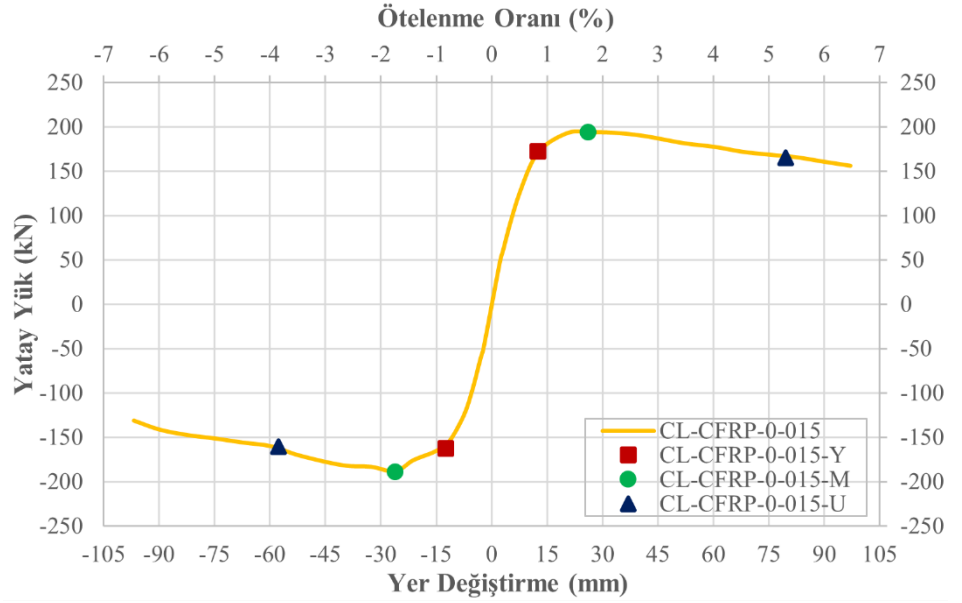
6.4.3. CL-CFRP-0-015 kolonu

CL-CFRP-0-015 numunesi PET ikamesi yapılmadan, karbon lifli polimer sargı kullanılarak $0.15f_{ck}A_c$ normal kuvveti altında test edilmiştir. Test sonucunda elde edilen yatay yük-yer değiştirme grafiği Şekil 6.40'ta verilmiştir.



Şekil 6.40. CL-CFRP-0-015 yatay yük-yer değiştirme grafiği.

Test sonucunda elde edilen zarf eğrisi grafiği Şekil 6.41'de verilmiştir.



Şekil 6.41. CL-CFRP-0-015 zarf eğrisi.

CL-CFRP-0-015 numunesi için deney sonucunda elde edilen veriler Tablo 6.12'de verilmiştir.

Tablo 6.12. CL-CFRP-0-015 numunesi deney sonuçları.

Numune ismi	Yük yönü	Δ_y (mm)	V_y (kN)	DR_y (%)	Δ_m (mm)	V_m (kN)	DR_m (%)	Δ_u (mm)	V_u (kN)	DR_u (%)	μ
CL-CFRP-0-015	+	12.567	172.091	0.838	26.131	193.806	1.742	79.582	164.735	5.305	6.333
	-	12.452	162.628	0.830	26.136	188.769	1.742	57.703	160.454	3.847	4.634
	ORT	12.509	167.359	0.834	26.134	191.287	1.742	68.642	162.594	4.576	5.483

CL-CFRP-0-015 numunesi için deney sonrasında alınan hasarlar ile ilgili görüntüler Şekil 6.42'de verilmiştir.



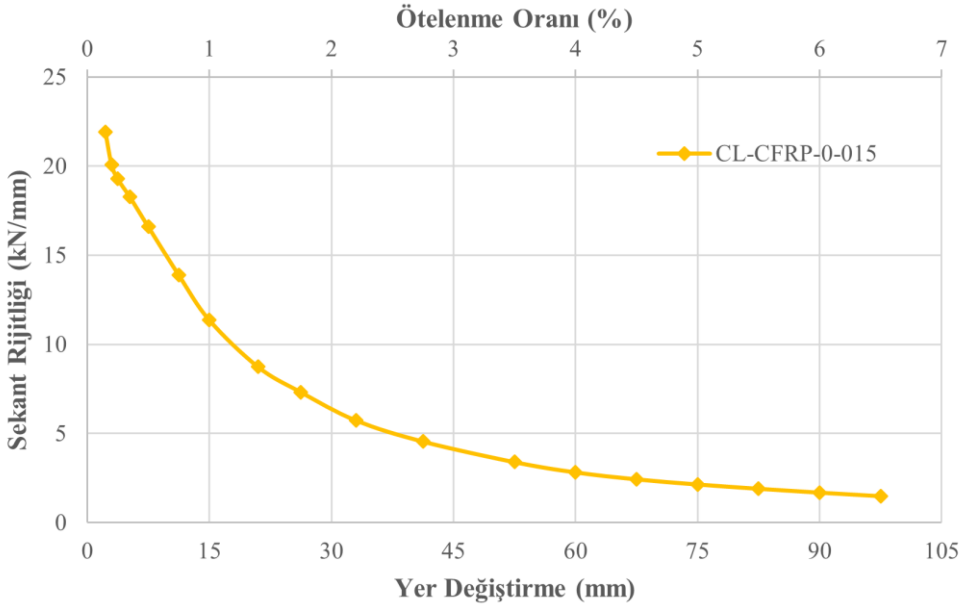
Şekil 6.42. CL-CFRP-0-015 numunesi deney sonrası görüntüleri.

CL-CFRP-0-015 numunesinde her ötelenme oranının ilk döngüsü için sekant rijitliği bulunmuştur. Bulunan sekant rijitlikleri ilk ötelenme oranına bölünerek sekant rijitlik oranları bulunmuştur. Bulunan değerler Tablo 6.13'te verilmiştir.

Tablo 6.13. CL-CFRP-0-015 numunesi için rijitlik değerleri.

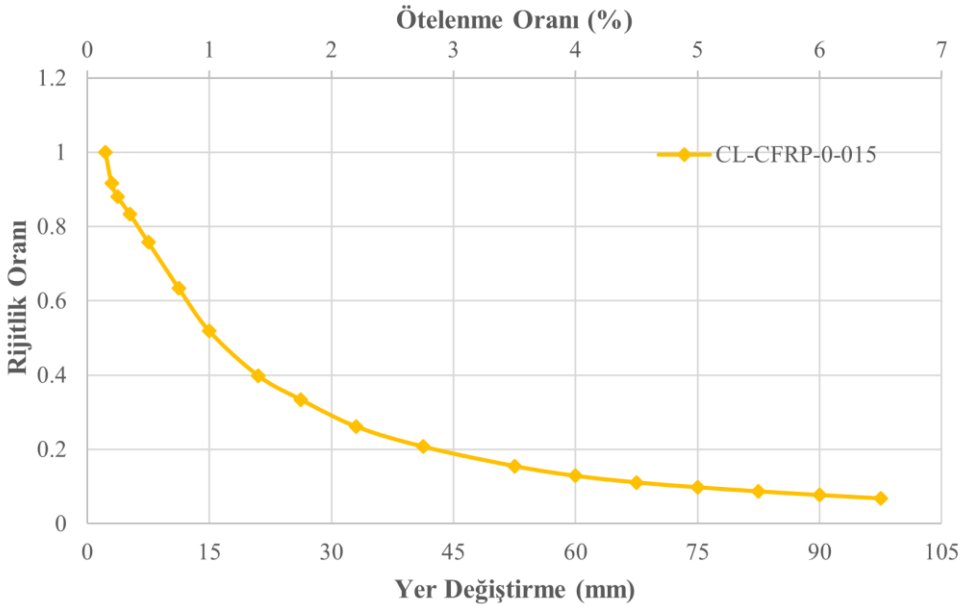
Ötelenme oranı (%)	Sekant rijitliği (K_{DR}) (kN/mm)	Sekant rijitlik oranı ($K_{DR}/K_{0.15}$) (λ_K)
0.15	21.919	1.000
0.2	20.088	0.916
0.25	19.287	0.880
0.35	18.269	0.833
0.5	16.609	0.758
0.75	13.895	0.634
1	11.367	0.519
1.4	8.736	0.399
1.75	7.320	0.334
2.2	5.735	0.262
2.75	4.547	0.207
3.5	3.394	0.155
4	2.819	0.129
4.5	2.428	0.111
5	2.142	0.098
5.5	1.899	0.087
6	1.683	0.077
6.5	1.484	0.068

CL-CFRP-0-015 numunesi için sekant rijitliği ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.43'te verilmiştir.



Şekil 6.43. CL-CFRP-0-015 numunesi sekant rijitliği grafiği.

CL-CFRP-0-015 numunesi için sekant rijitlik oranı ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.44'te verilmiştir.



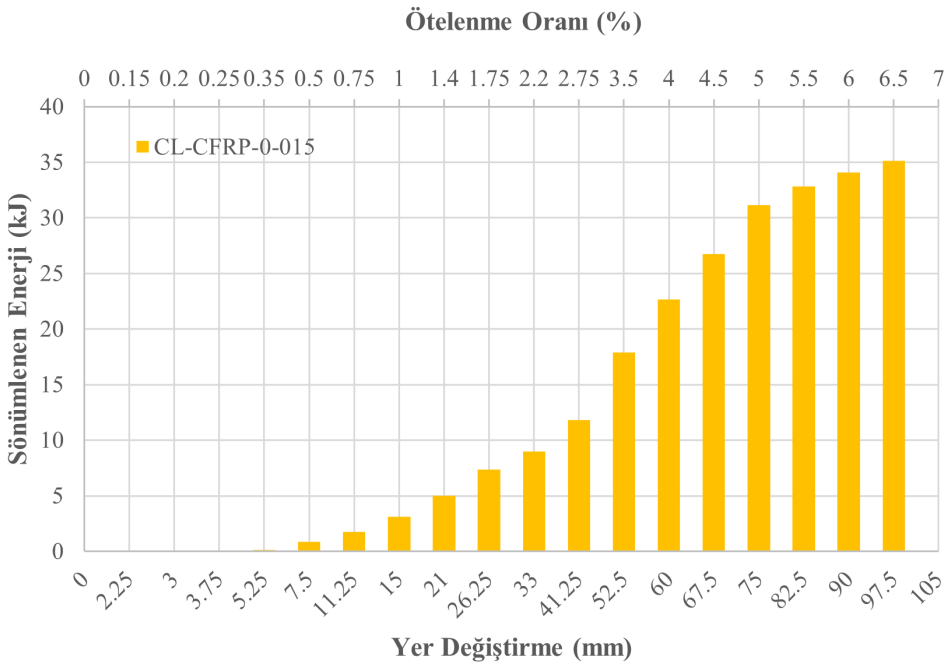
Şekil 6.44. CL-CFRP-0-015 numunesi sekant rijitlik oranı grafiği.

CL-CFRP-0-015 numunesinin her ötelenme oranında sönümlemiş olduğu enerji değerleri (E_{DR}) ayrı ayrı olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan enerji değerleri bir sonraki ötelenme oranındaki sönümlenen enerji değerleri ile toplanarak kümülatif enerji değerleri (E_{cum}) elde edilmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 6.14'te verilmiştir.

Tablo 6.14. CL-CFRP-0-015 numunesi için sönümlenen enerji değerleri.

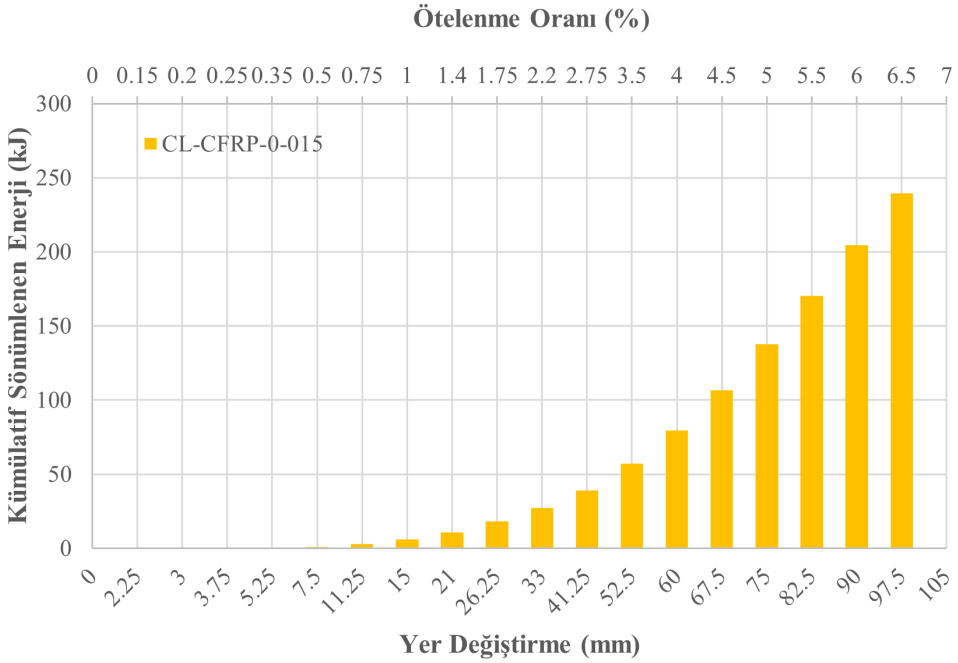
Ötelenme oranı (%)	Sönümlenen enerji (E_{DR}) (kNmm) (J)	Kümülatif sönümlenen enerji (E_{cum}) (kNmm) (J)
0.15	16.038	16.038
0.2	48.341	64.379
0.25	78.267	142.647
0.35	146.346	288.992
0.5	857.170	1146.162
0.75	1759.746	2905.908
1	3101.616	6007.524
1.4	4976.895	10984.419
1.75	7367.921	18352.340
2.2	8977.130	27329.470
2.75	11821.607	39151.077
3.5	17898.207	57049.285
4	22672.639	79721.923
4.5	26760.767	106482.691
5	31165.365	137648.055
5.5	32834.116	170482.171
6	34095.588	204577.759
6.5	35105.672	239683.432

CL-CFRP-0-015 numunesi için her ötelenme oranında elde edilen sönümlenen enerji değeri ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.45'te verilmiştir.



Şekil 6.45. CL-CFRP-0-015 numunesi sönümlenen enerji grafiği.

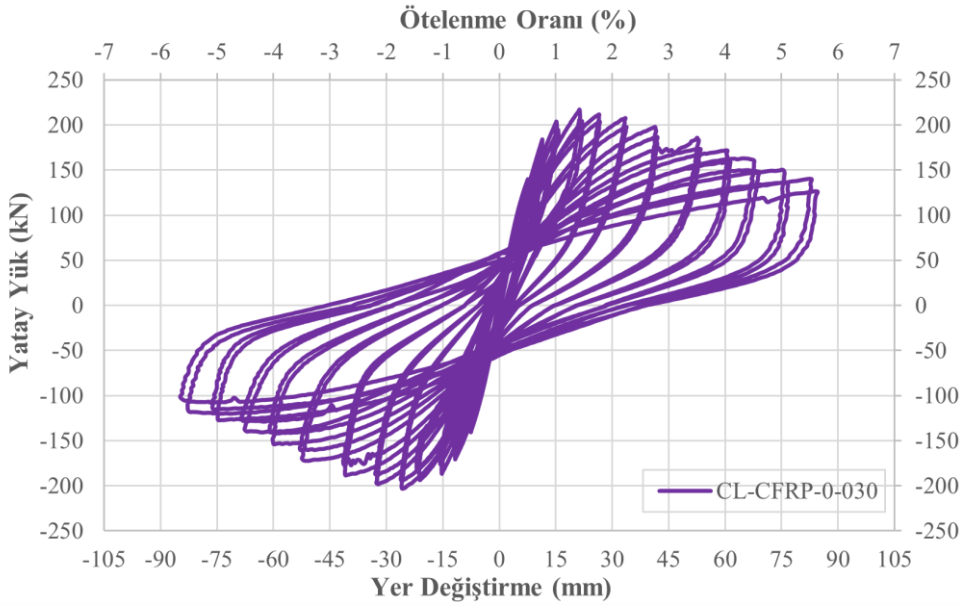
CL-CFRP-0-015 numunesi için her ötelenme oranında elde edilen kümülatif sönümlenen enerji değeri ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.46'da verilmiştir.



Şekil 6.46. CL-CFRP-0-015 numunesi kümülatif sönümlenen enerji grafiği.

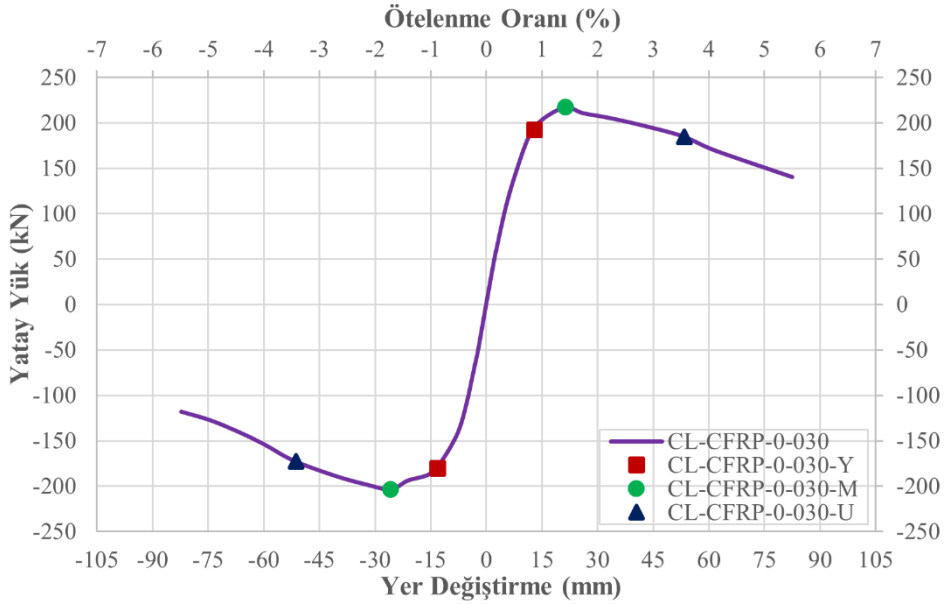
6.4.4. CL-CFRP-0-030 kolonu

CL-CFRP-0-030 numunesi PET ikamesi yapılmadan, karbon lifli polimer sargı kullanılarak $0.30 f_{ck} A_c$ normal kuvveti altında test edilmiştir. Test sonucunda elde edilen yatay yük-yer değiştirme grafiği Şekil 6.47'de verilmiştir.



Şekil 6.47. CL-CFRP-0-030 yatay yük-yer değiştirme grafiği.

Test sonucunda elde edilen zarf eğrisi grafiği Şekil 6.48'de verilmiştir.



Şekil 6.48. CL-CFRP-0-030 zarf eğrisi.

CL-CFRP-0-030 numunesi için deney sonucunda elde edilen veriler Tablo 6.15'te verilmiştir.

Tablo 6.15. CL-CFRP-0-030 numunesi deney sonuçları.

Numune ismi	Yük yönü	Δ_y (mm)	V_y (kN)	DR_y (%)	Δ_m (mm)	V_m (kN)	DR_m (%)	Δ_u (mm)	V_u (kN)	DR_u (%)	μ
CL-CFRP-0-030	+	12.916	192.266	0.861	21.323	216.978	1.422	53.365	184.432	3.558	4.132
	-	12.977	180.644	0.865	25.766	203.319	1.718	51.276	172.821	3.418	3.951
	ORT	12.947	186.455	0.863	23.545	210.148	1.570	52.321	178.626	3.488	4.041

CL-CFRP-0-030 numunesi için deney sonrasında alınan hasarlar ile ilgili görüntüler Şekil 6.49'da verilmiştir.



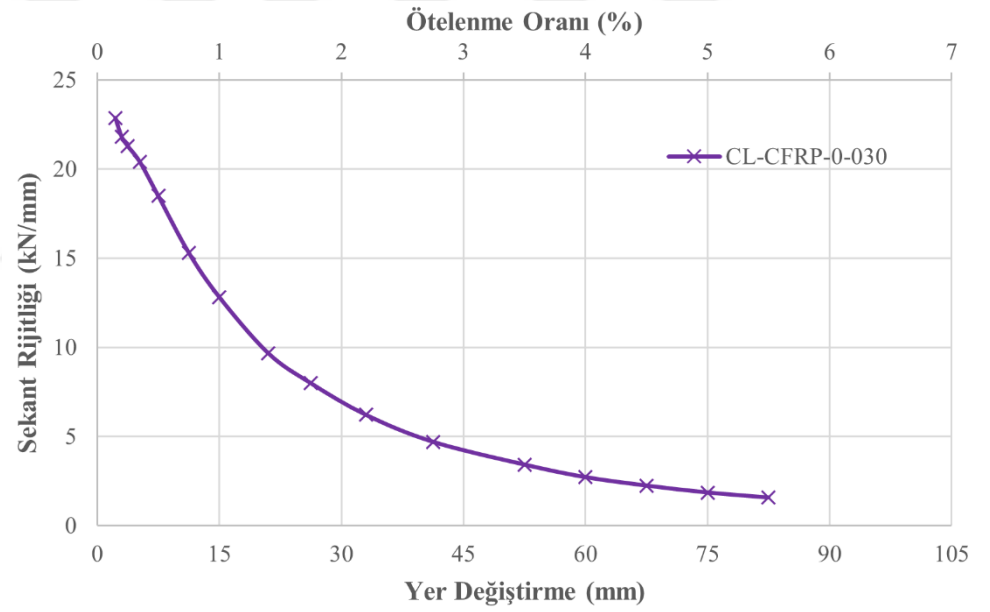
Şekil 6.49. CL-CFRP-0-030 numunesi deney sonrası görüntüleri.

CL-CFRP-0-030 numunesinde her ötelenme oranının ilk döngüsü için sekant rijitliği bulunmuştur. Bulunan sekant rijitlikleri ilk ötelenme oranına bölünerek sekant rijitlik oranları bulunmuştur. Bulunan değerler Tablo 6.16'da verilmiştir.

Tablo 6.16. CL-CFRP-0-030 numunesi için rijitlik değerleri.

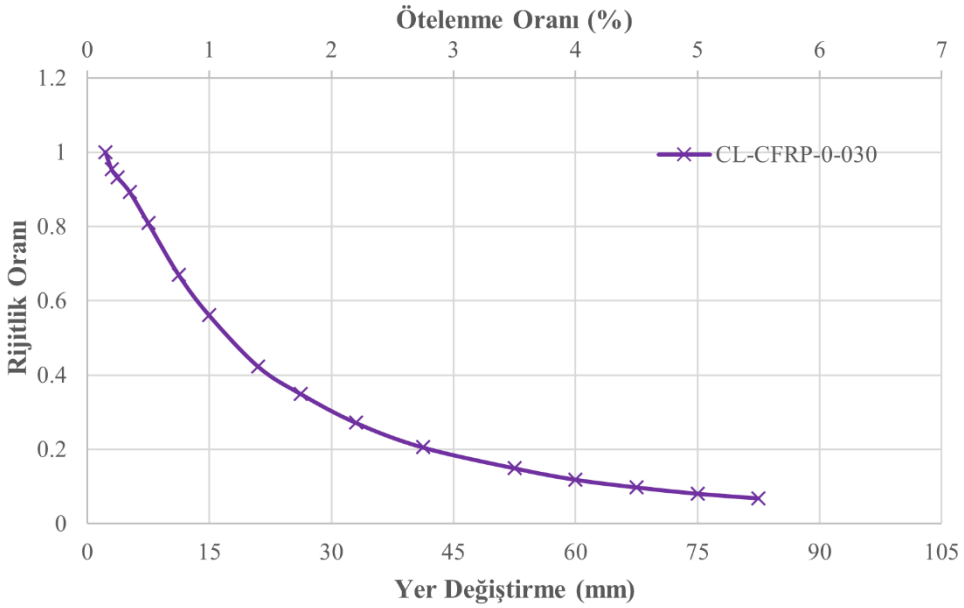
Ötelenme oranı (%)	Sekant rijitliği (K_{DR}) (kN/mm)	Sekant rijitlik oranı ($K_{DR}/K_{0.15}$) (λ_K)
0.15	22.845	1.000
0.2	21.815	0.955
0.25	21.285	0.932
0.35	20.386	0.892
0.5	18.490	0.809
0.75	15.305	0.670
1	12.815	0.561
1.4	9.674	0.423
1.75	7.983	0.349
2.2	6.212	0.272
2.75	4.696	0.206
3.5	3.418	0.150
4	2.713	0.119
4.5	2.238	0.098
5	1.850	0.081
5.5	1.568	0.069

CL-CFRP-0-030 numunesi için sekant rijitliği ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.50'de verilmiştir.



Şekil 6.50. CL-CFRP-0-030 numunesi sekant rijitliği grafiği.

CL-CFRP-0-030 numunesi için sekant rijitlik oranı ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.51'de verilmiştir.



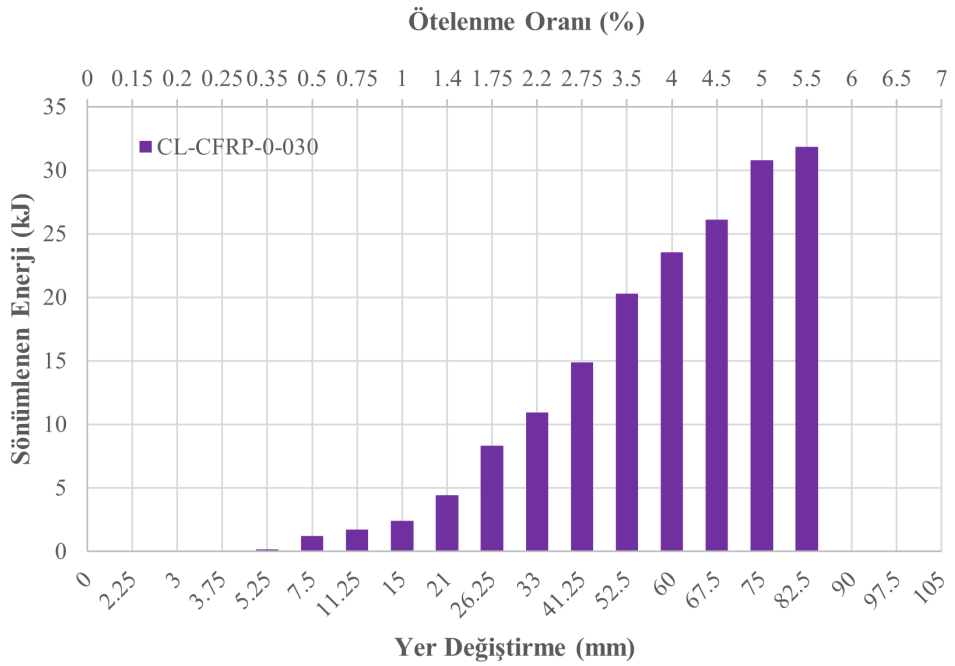
Şekil 6.51. CL-CFRP-0-030 numunesi sekant rijitlik oranı grafiği.

CL-CFRP-0-030 numunesinin her ötelenme oranında sönümlemiş olduğu enerji değerleri (E_{DR}) ayrı ayrı olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan enerji değerleri bir sonraki ötelenme oranındaki sönümlenen enerji değerleri ile toplanarak kümülatif enerji değerleri (E_{cum}) elde edilmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 6.17'de verilmiştir.

Tablo 6.17. CL-CFRP-0-030 numunesi için sönümlenen enerji değerleri.

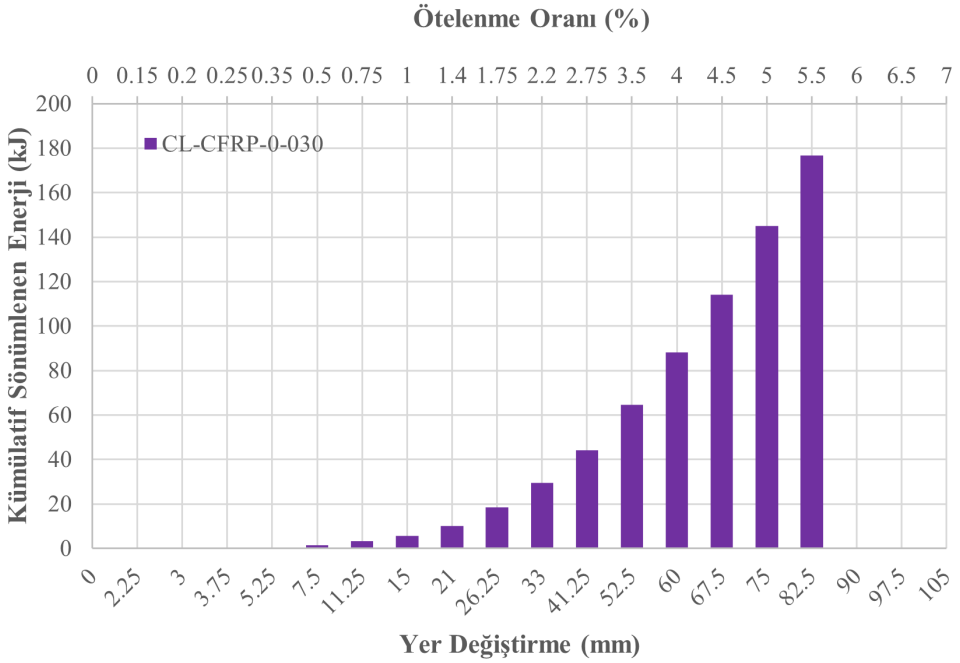
Ötelenme oranı (%)	Sönümlenen enerji (E_{DR}) (kNmm) (J)	Kümülatif sönümlenen enerji (E_{cum}) (kNmm) (J)
0.15	15.896	15.896
0.2	51.060	66.957
0.25	85.263	152.219
0.35	165.462	317.682
0.5	1216.359	1534.041
0.75	1718.223	3252.264
1	2407.727	5659.991
1.4	4426.885	10086.876
1.75	8315.586	18402.463
2.2	10946.979	29349.442
2.75	14898.132	44247.573
3.5	20295.944	64543.517
4	23520.650	88064.166
4.5	26085.953	114150.119
5	30778.465	144928.584
5.5	31835.032	176763.616

CL-CFRP-0-030 numunesi için her ötelenme oranında elde edilen sönümlenen enerji değeri ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.52'de verilmiştir.



Şekil 6.52. CL-CFRP-0-030 numunesi sönümlenen enerji grafiği.

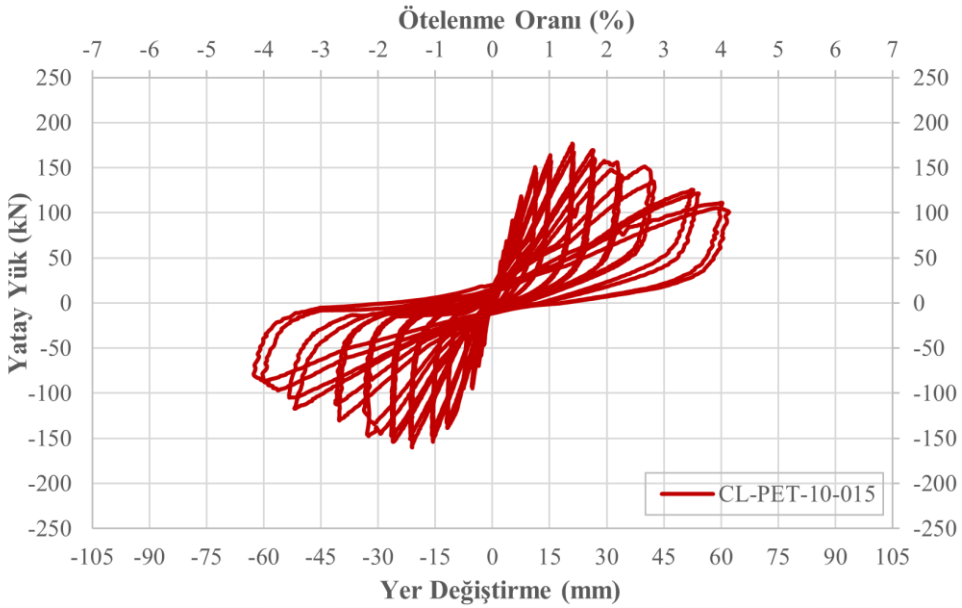
CL-CFRP-0-030 numunesi için her ötelenme oranında elde edilen kümülatif sönümlenen enerji değeri ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.53'te verilmiştir.



Şekil 6.53. CL-CFRP-0-030 numunesi kümülatif sönümlenen enerji grafiği.

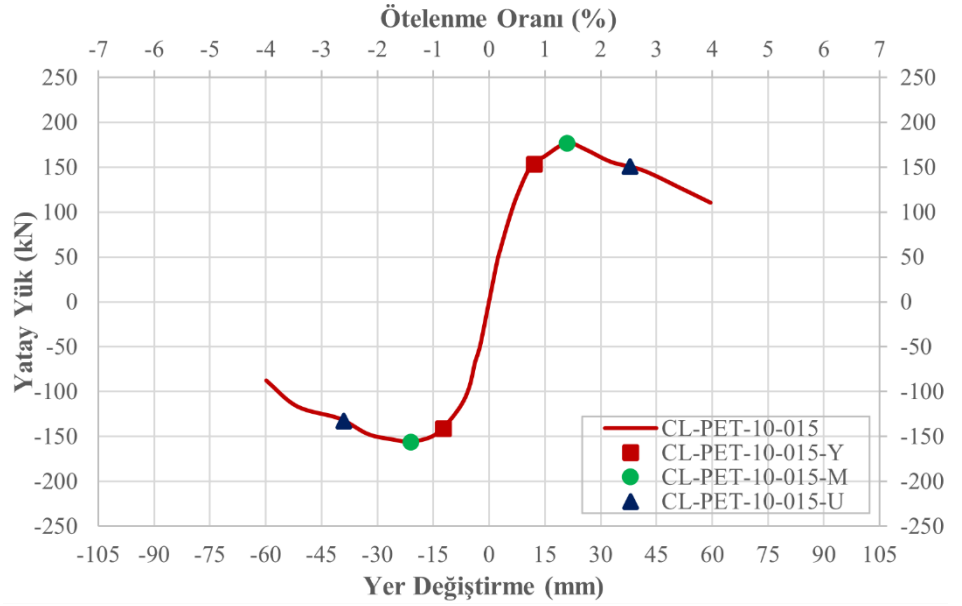
6.4.5. CL-PET-10-015 kolonu

CL-PET-10-015 numunesi PET ikamesi yapılarak, karbon lifli polimer sargı kullanılmadan $0.15 f_{ck} A_c$ normal kuvveti altında test edilmiştir. Test sonucunda elde edilen yatay yük-yer değiştirme grafiği Şekil 6.54'te verilmiştir.



Şekil 6.54. CL-PET-10-015 yatay yük-yer değiştirme grafiği.

Test sonucunda elde edilen zarf eğrisi grafiği Şekil 6.55'te verilmiştir.



Şekil 6.55. CL-PET-10-015 zarf eğrisi.

CL-PET-10-015 numunesi için deney sonucunda elde edilen veriler Tablo 6.18'de verilmiştir.

Tablo 6.18. CL-PET-10-015 numunesi deney sonuçları.

Numune ismi	Yük yönü	Δ_y (mm)	V_y (kN)	DR_y (%)	Δ_m (mm)	V_m (kN)	DR_m (%)	Δ_u (mm)	V_u (kN)	DR_u (%)	μ
CL-PET-10-015	+	12.242	152.830	0.816	20.926	176.844	1.395	37.938	150.317	2.529	3.099
	-	12.189	141.090	0.813	21.019	156.176	1.401	39.076	132.749	2.605	3.206
	ORT	12.216	146.960	0.814	20.972	166.510	1.398	38.507	141.533	2.567	3.152

CL-PET-10-015 numunesi için deney sonrasında alınan hasarlar ile ilgili görüntüler Şekil 6.56'da verilmiştir.



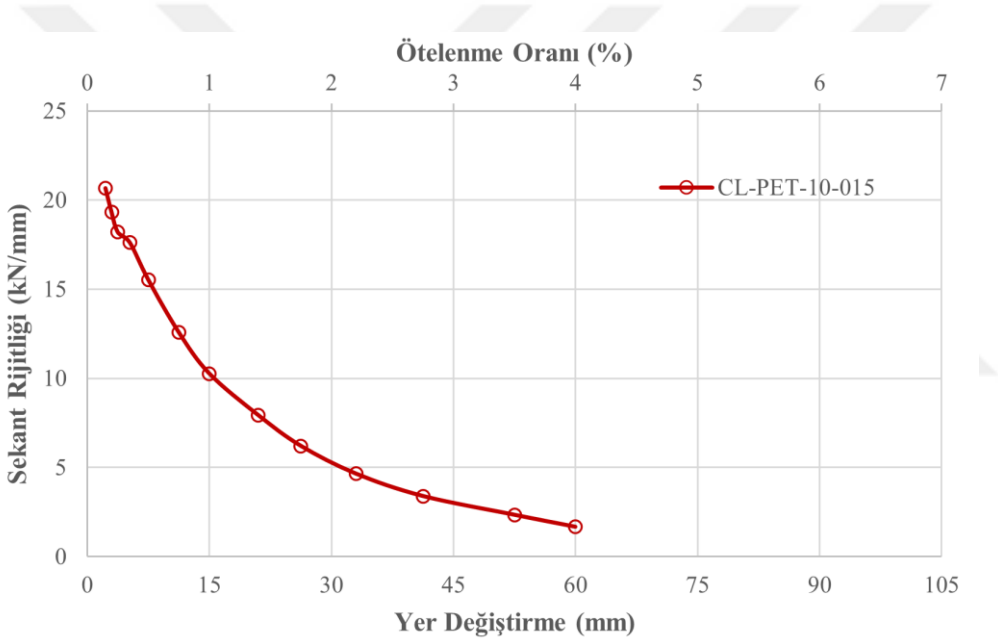
Şekil 6.56. CL-PET-10-015 numunesi deney sonrası görüntüleri.

CL-PET-10-015 numunesinde her ötelenme oranının ilk döngüsü için sekant rijitliği bulunmuştur. Bulunan sekant rijitlikleri ilk ötelenme oranına bölünerek sekant rijitlik oranları bulunmuştur. Bulunan değerler Tablo 6.19'da verilmiştir.

Tablo 6.19. CL-PET-10-015 numunesi için rijitlik değerleri.

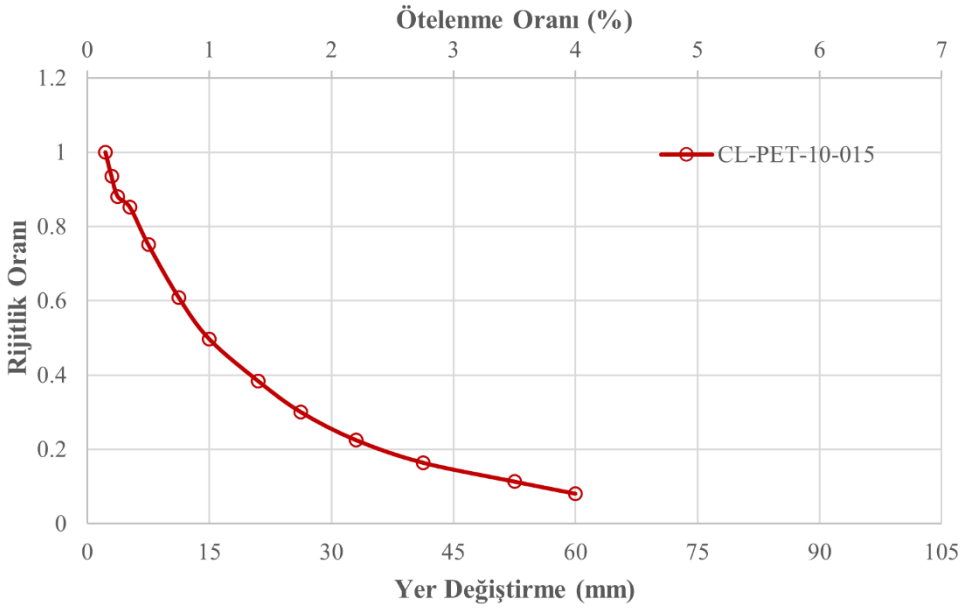
Ötelenme oranı (%)	Sekant rijitliği (K_{DR}) (kN/mm)	Sekant rijitlik oranı ($K_{DR}/K_{0.15}$) (λ_K)
0.15	20.659	1.000
0.2	19.310	0.935
0.25	18.202	0.881
0.35	17.605	0.852
0.5	15.533	0.752
0.75	12.584	0.609
1	10.268	0.497
1.4	7.940	0.384
1.75	6.208	0.301
2.2	4.653	0.225
2.75	3.392	0.164
3.5	2.338	0.113
4	1.663	0.080

CL-PET-10-015 numunesi için sekant rijitliği ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.57'de verilmiştir.



Şekil 6.57. CL-PET-10-015 numunesi sekant rijitliği grafiği.

CL-PET-10-015 numunesi için sekant rijitlik oranı ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.58'de verilmiştir.



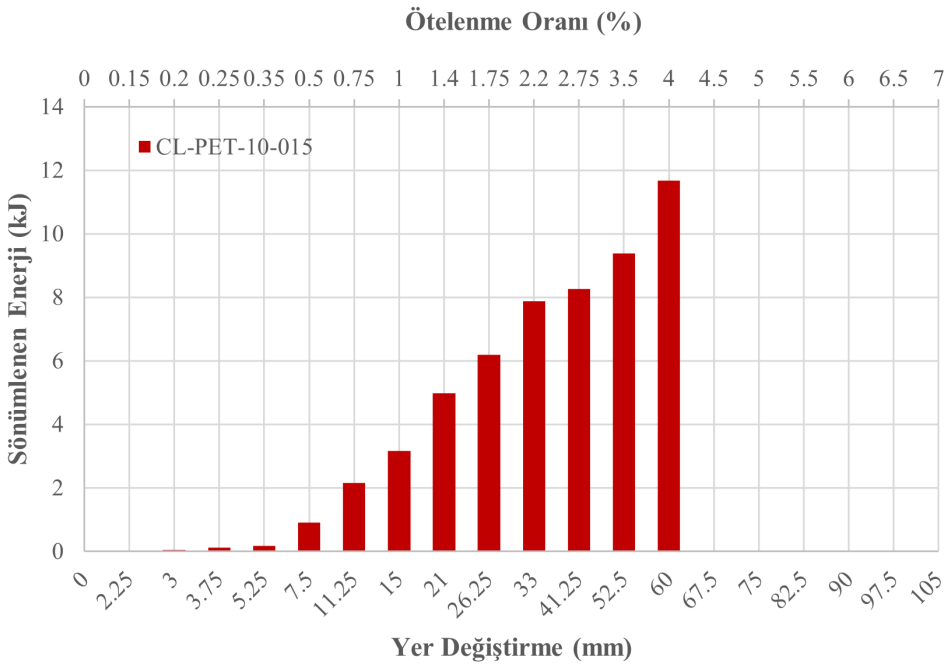
Şekil 6.58. CL-PET-10-015 numunesi sekant rijitlik oranı grafiği.

CL-PET-10-015 numunesinin her ötelenme oranında sönümlemiş olduğu enerji değerleri (E_{DR}) ayrı ayrı olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan enerji değerleri bir sonraki ötelenme oranındaki sönümlenen enerji değerleri ile toplanarak kümülatif enerji değerleri (E_{cum}) elde edilmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 6.20'de verilmiştir.

Tablo 6.20. CL-PET-10-015 numunesi için sönümlenen enerji değerleri.

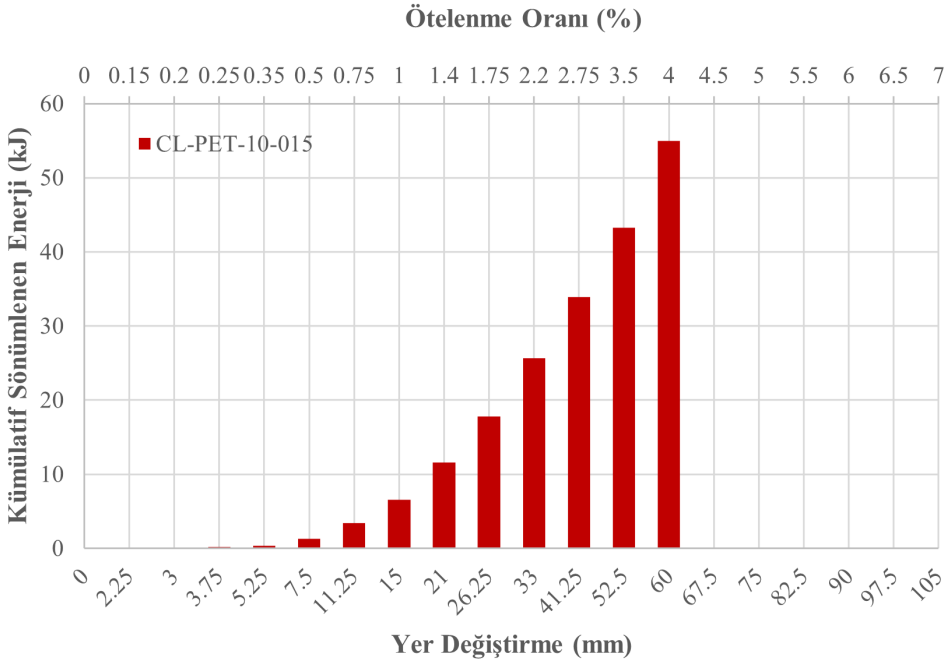
Ötelenme oranı (%)	Sönümlenen enerji (E_{DR}) (kNmm) (J)	Kümülatif sönümlenen enerji (E_{cum}) (kNmm) (J)
0.15	14.287	14.287
0.2	52.324	66.611
0.25	122.949	189.561
0.35	180.334	369.895
0.5	900.133	1270.028
0.75	2157.815	3427.843
1	3169.865	6597.708
1.4	4978.257	11575.965
1.75	6195.727	17771.692
2.2	7867.018	25638.711
2.75	8254.139	33892.849
3.5	9373.177	43266.026
4	11675.773	54941.799

CL-PET-10-015 numunesi için her ötelenme oranında elde edilen sönümlenen enerji değeri ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.59'da verilmiştir.



Şekil 6.59. CL-PET-10-015 numunesi sönümlenen enerji grafiği.

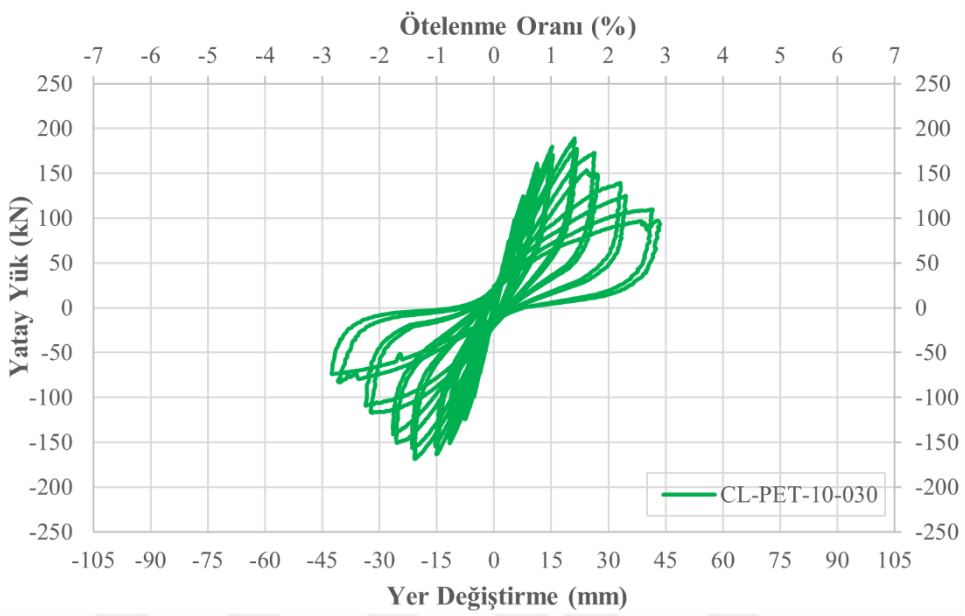
CL-PET-10-015 numunesi için her ötelenme oranında elde edilen kümülatif sönümlenen enerji değeri ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.60'ta verilmiştir.



Şekil 6.60. CL-PET-10-015 numunesi kümülatif sönümlenen enerji grafiği.

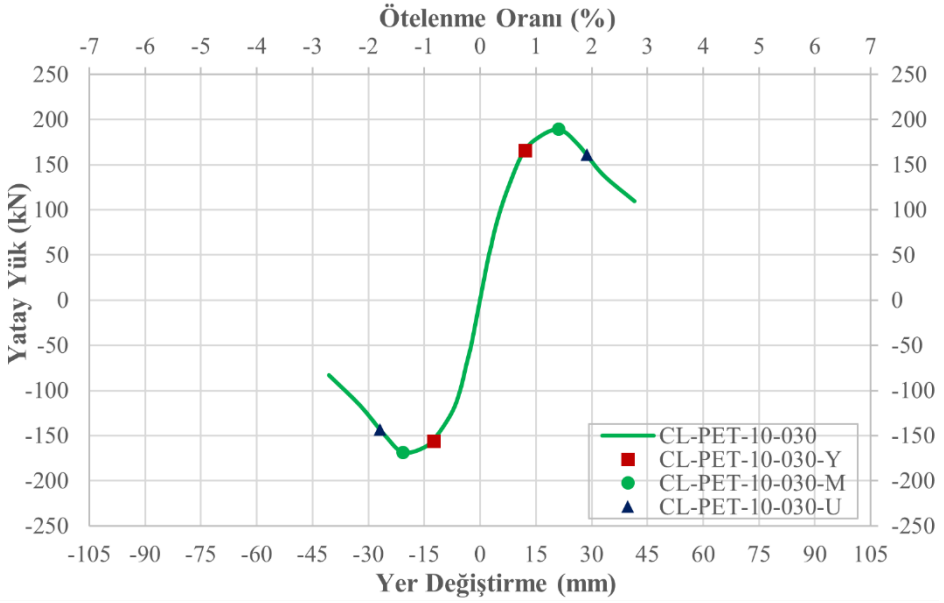
6.4.6. CL-PET-10-030 kolonu

CL-PET-10-030 numunesi PET ikamesi yapılarak, karbon lifli polimer sargı kullanılmadan $0.30 f_{ck} A_c$ normal kuvveti altında test edilmiştir. Test sonucunda elde edilen yatay yük-yer değiştirme grafiği Şekil 6.61'de verilmiştir.



Şekil 6.61. CL-PET-10-030 yatay yük-yer değiştirme grafiği.

Test sonucunda elde edilen zarf eğrisi grafiği Şekil 6.62'de verilmiştir.



Şekil 6.62. CL-PET-10-030 zarf eğrisi.

CL-PET-10-030 numunesi için deney sonucunda elde edilen veriler Tablo 6.21'de verilmiştir.

Tablo 6.21. CL-PET-10-030 numunesi deney sonuçları.

Numune ismi	Yük yönü	Δ_y (mm)	V_y (kN)	DR_y (%)	Δ_m (mm)	V_m (kN)	DR_m (%)	Δ_u (mm)	V_u (kN)	DR_u (%)	μ
CL-PET-10-030	+	12.101	165.679	0.807	21.086	189.314	1.406	28.722	160.917	1.915	2.374
	-	12.526	156.453	0.835	20.746	168.808	1.383	26.908	143.486	1.794	2.148
	ORT	12.313	161.066	0.821	20.916	179.061	1.394	27.815	152.202	1.854	2.261

CL-PET-10-030 numunesi için deney sonrasında alınan hasarlar ile ilgili görüntüler Şekil 6.63'te verilmiştir.



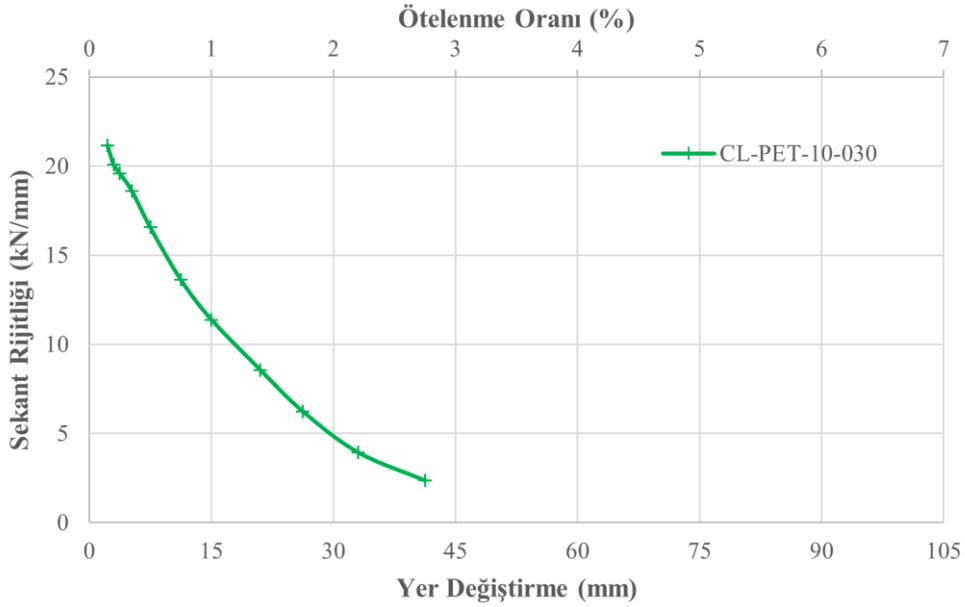
Şekil 6.63. CL-PET-10-030 numunesi deney sonrası görüntüleri.

CL-PET-10-030 numunesinde her ötelenme oranının ilk döngüsü için sekant rijitliği bulunmuştur. Bulunan sekant rijitlikleri ilk ötelenme oranına bölünerek sekant rijitlik oranları bulunmuştur. Bulunan değerler Tablo 6.22'de verilmiştir.

Tablo 6.22. CL-PET-10-030 numunesi için rijitlik değerleri.

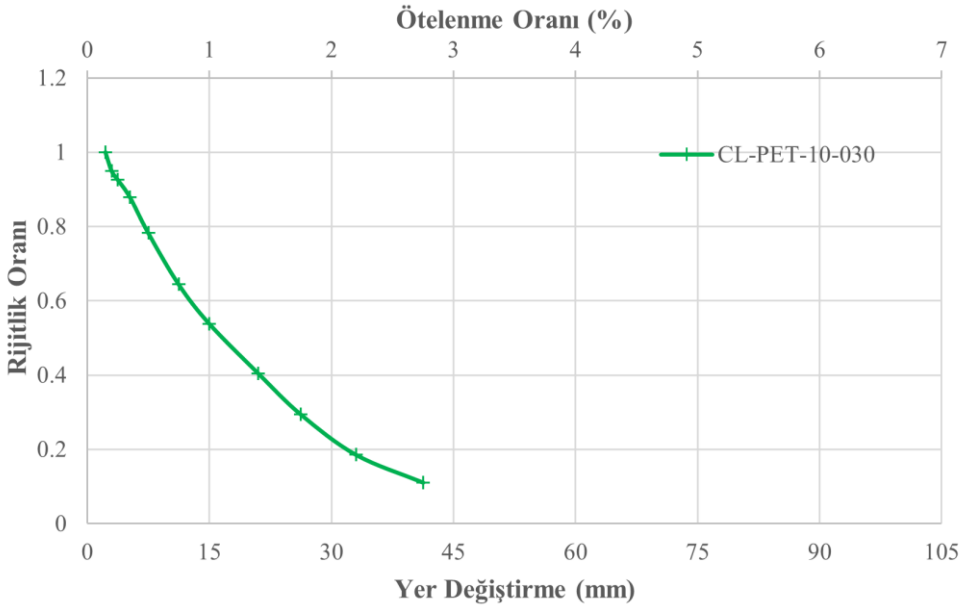
Ötelenme oranı (%)	Sekant rijitliği (K_{DR}) (kN/mm)	Sekant rijitlik oranı ($K_{DR}/K_{0.15}$) (λ_K)
0.15	21.145	1.000
0.2	20.090	0.950
0.25	19.584	0.926
0.35	18.587	0.879
0.5	16.556	0.783
0.75	13.615	0.644
1	11.382	0.538
1.4	8.561	0.405
1.75	6.215	0.294
2.2	3.929	0.186
2.75	2.348	0.111

CL-PET-10-030 numunesi için sekant rijitliği ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.64'te verilmiştir.



Şekil 6.64. CL-PET-10-030 numunesi sekant rijitliği grafiği.

CL-PET-10-030 numunesi için sekant rijitlik oranı ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.65'te verilmiştir.



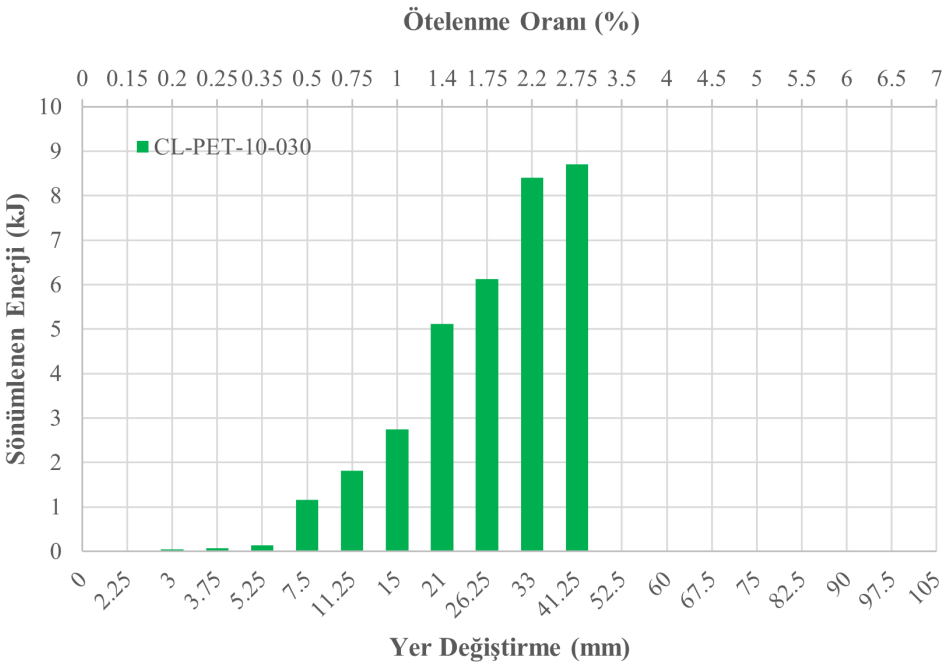
Şekil 6.65. CL-PET-10-030 numunesi sekant rijitlik oranı grafiği.

CL-PET-10-030 numunesinin her ötelenme oranında sönümlemiş olduğu enerji değerleri (E_{DR}) ayrı ayrı olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan enerji değerleri bir sonraki ötelenme oranındaki sönümlenen enerji değerleri ile toplanarak kümülatif enerji değerleri (E_{cum}) elde edilmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 6.23'te verilmiştir.

Tablo 6.23. CL-PET-10-030 numunesi için sönümlenen enerji değerleri.

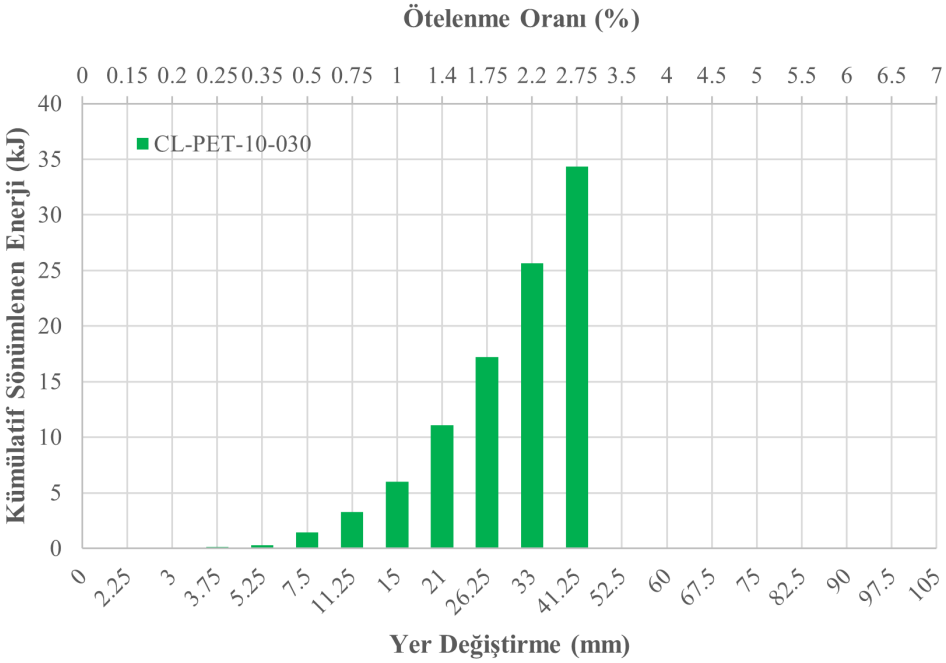
Ötelenme oranı (%)	Sönümlenen enerji (E_{DR}) (kNmm) (J)	Kümülatif sönümlenen enerji (E_{cum}) (kNmm) (J)
0.15	12.625	12.625
0.2	44.253	56.878
0.25	74.335	131.212
0.35	139.170	270.382
0.5	1163.468	1433.850
0.75	1814.474	3248.324
1	2740.567	5988.891
1.4	5111.401	11100.292
1.75	6129.657	17229.949
2.2	8408.826	25638.775
2.75	8705.162	34343.937

CL-PET-10-030 numunesi için her ötelenme oranında elde edilen sönümlenen enerji değeri ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.66'da verilmiştir.



Şekil 6.66. CL-PET-10-030 numunesi sönümlenen enerji grafiği.

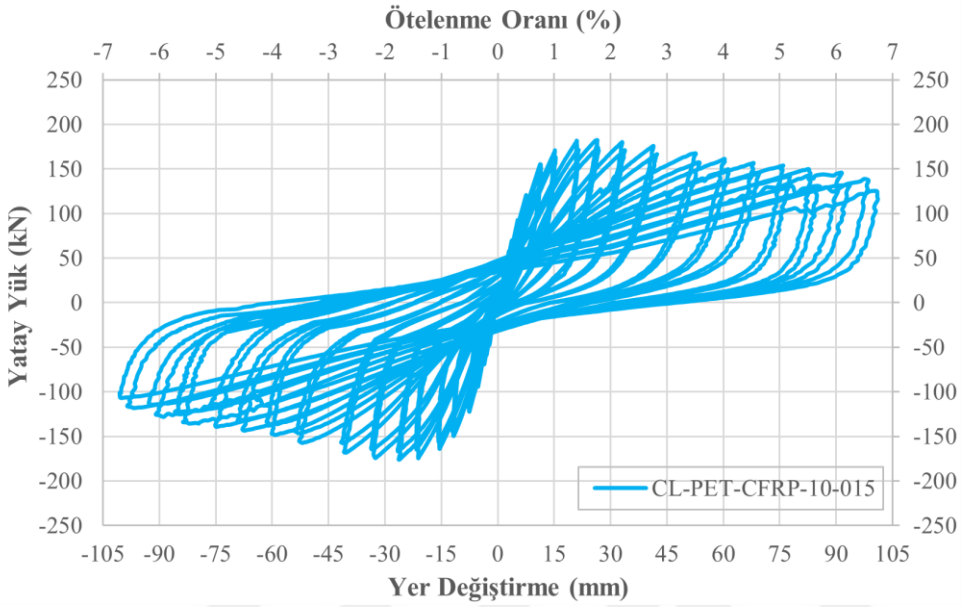
CL-PET-10-030 numunesi için her ötelenme oranında elde edilen kümülatif sönümlenen enerji değeri ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.67'de verilmiştir.



Şekil 6.67. CL-PET-10-030 numunesi kümülatif sönümlenen enerji grafiği.

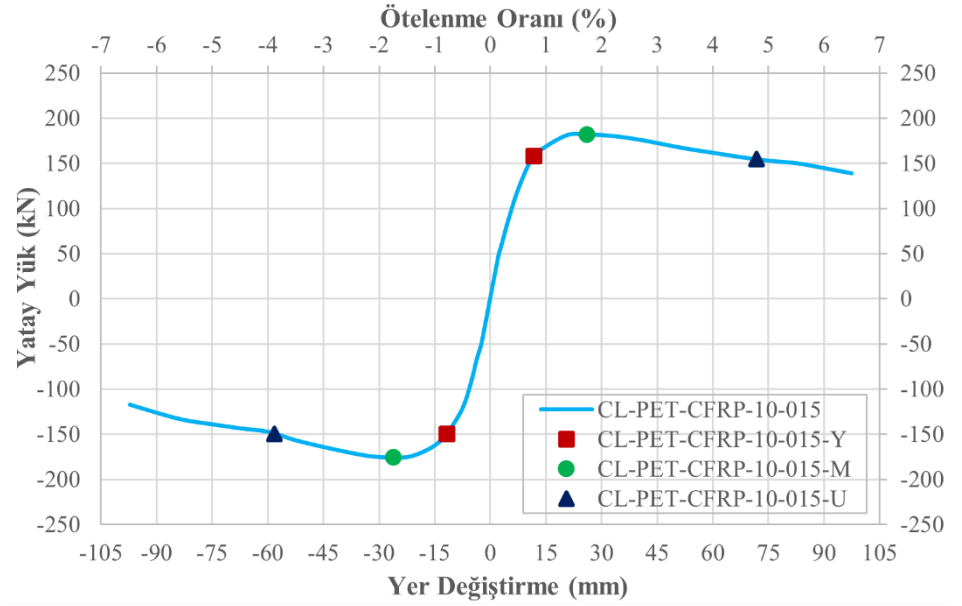
6.4.7. CL-PET-CFRP-10-015 kolonu

CL-PET-CFRP-10-015 numunesi PET ikamesi yapılıp karbon lifli polimer sargı kullanılarak $0.15 f_{ck} A_c$ normal kuvveti altında test edilmiştir. Test sonucunda elde edilen yatay yük-yer değiştirme grafiği Şekil 6.68'de verilmiştir.



Şekil 6.68. CL-PET-CFRP-10-015 yatay yük-yer değiştirme grafiği.

Test sonucunda elde edilen zarf eğrisi grafiği Şekil 6.69'da verilmiştir.



Şekil 6.69. CL-PET-CFRP-10-015 zarf eğrisi.

CL-PET-CFRP-10-015 numunesi için deney sonucunda elde edilen veriler Tablo 6.24'te verilmiştir.

Tablo 6.24. CL-PET-CFRP-10-015 numunesi deney sonuçları.

Numune ismi	Yük yönü	Δ_y (mm)	V_y (kN)	DR_y (%)	Δ_m (mm)	V_m (kN)	DR_m (%)	Δ_u (mm)	V_u (kN)	DR_u (%)	μ
CL-PET-CFRP-10-015	+	11.641	157.836	0.776	26.072	181.946	1.738	71.779	154.654	4.785	6.166
	-	11.511	149.407	0.767	26.082	175.780	1.739	58.202	149.413	3.880	5.056
	ORT	11.576	153.622	0.772	26.077	178.863	1.738	64.990	152.033	4.333	5.611

CL-PET-CFRP-10-015 numunesi için deney sonrasında alınan hasarlar ile ilgili görüntüler Şekil 6.70'te verilmiştir.



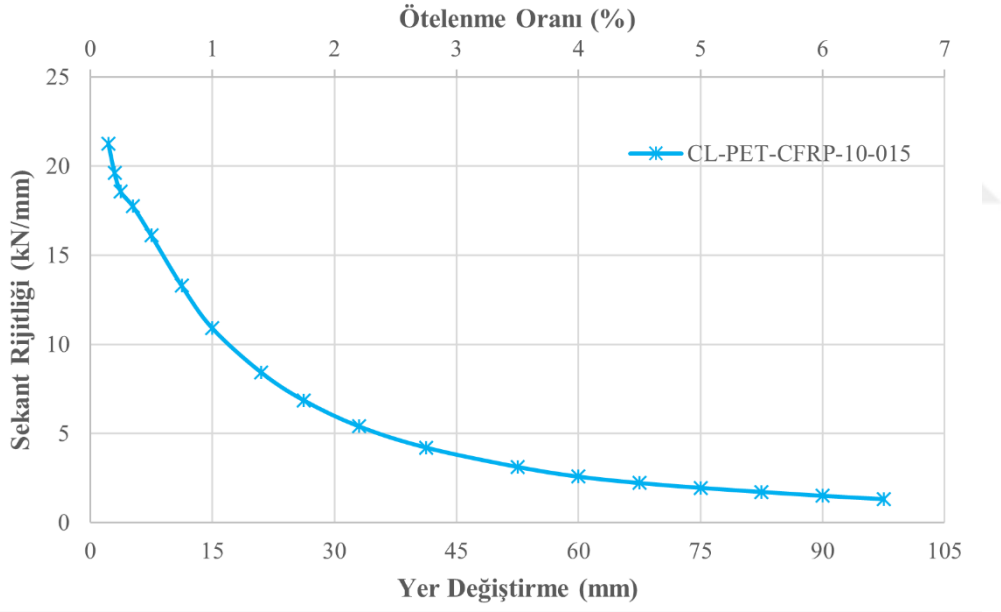
Şekil 6.70. CL-PET-CFRP-10-015 numunesi deney sonrası görüntüleri.

CL-PET-CFRP-10-015 numunesinde her ötelenme oranının ilk döngüsü için sekant rijitliği bulunmuştur. Bulunan sekant rijitlikleri ilk ötelenme oranına bölünerek sekant rijitlik oranları bulunmuştur. Bulunan değerler Tablo 6.25'te verilmiştir.

Tablo 6.25. CL-PET-CFRP-10-015 numunesi için rijitlik değerleri.

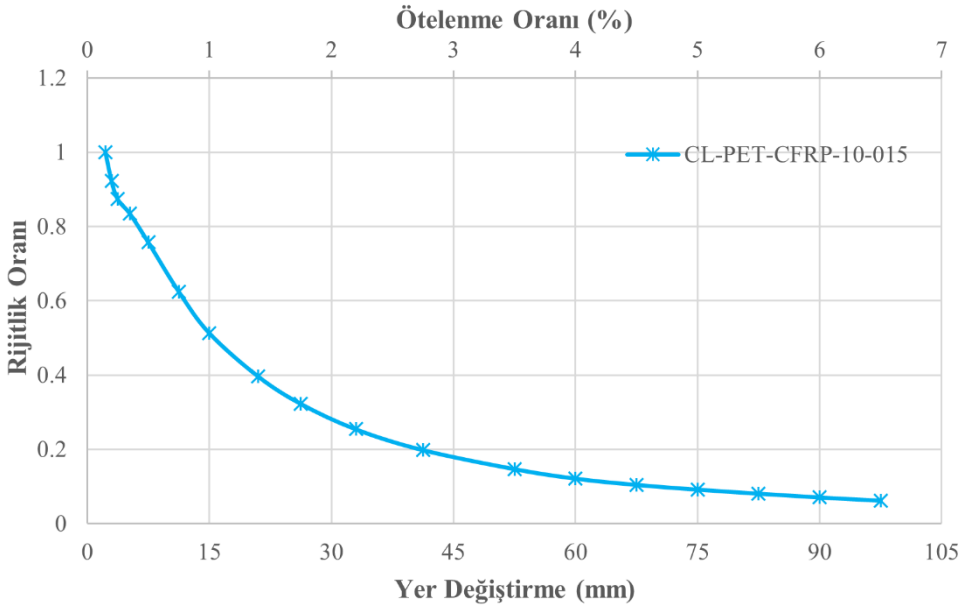
Ötelenme oranı (%)	Sekant rijitliği (K_{DR}) (kN/mm)	Sekant rijitlik oranı ($K_{DR}/K_{0.15}$) (λ_K)
0.15	21.266	1.000
0.2	19.622	0.923
0.25	18.572	0.873
0.35	17.747	0.835
0.5	16.119	0.758
0.75	13.288	0.625
1	10.911	0.513
1.4	8.433	0.397
1.75	6.859	0.323
2.2	5.405	0.254
2.75	4.212	0.198
3.5	3.125	0.147
4	2.578	0.121
4.5	2.219	0.104
5	1.949	0.092
5.5	1.719	0.081
6	1.502	0.071
6.5	1.317	0.062

CL-PET-CFRP-10-015 numunesi için sekant rijitliği ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.71'de verilmiştir.



Şekil 6.71. CL-PET-CFRP-10-015 numunesi sekant rijitliği grafiği.

CL-PET-CFRP-10-015 numunesi için sekant rijitlik oranı ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.72'de verilmiştir.



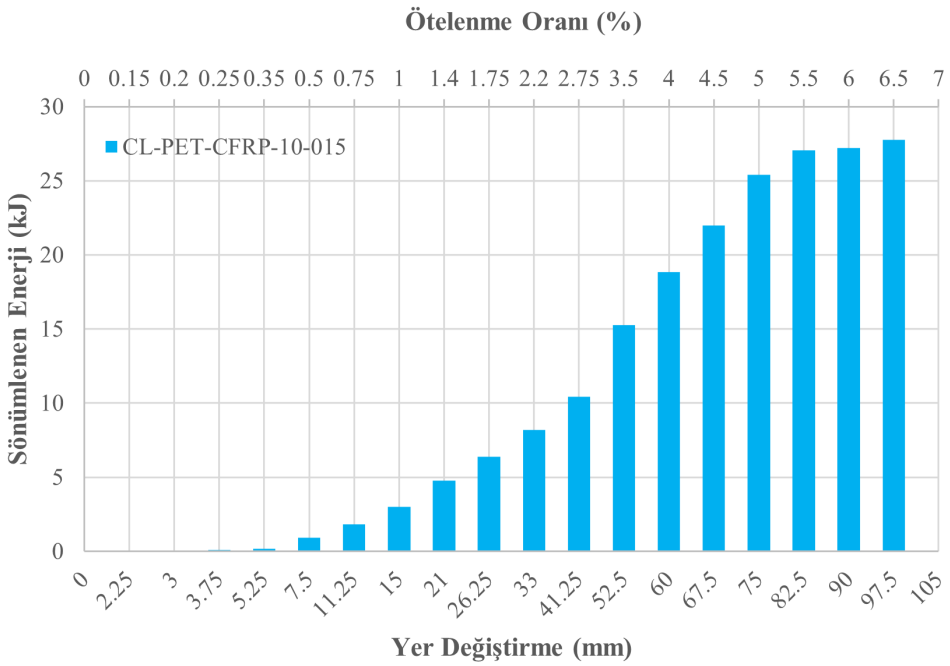
Şekil 6.72. CL-PET-CFRP-10-015 numunesi sekant rijitlik oranı grafiği.

CL-PET-CFRP-10-015 numunesinin her ötelenme oranında sönümlemiş olduğu enerji değerleri (E_{DR}) ayrı ayrı olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan enerji değerleri bir sonraki ötelenme oranındaki sönümlenen enerji değerleri ile toplanarak kümülatif enerji değerleri (E_{cum}) elde edilmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 6.26'da verilmiştir.

Tablo 6.26. CL-PET-CFRP-10-015 numunesi için sönümlenen enerji değerleri.

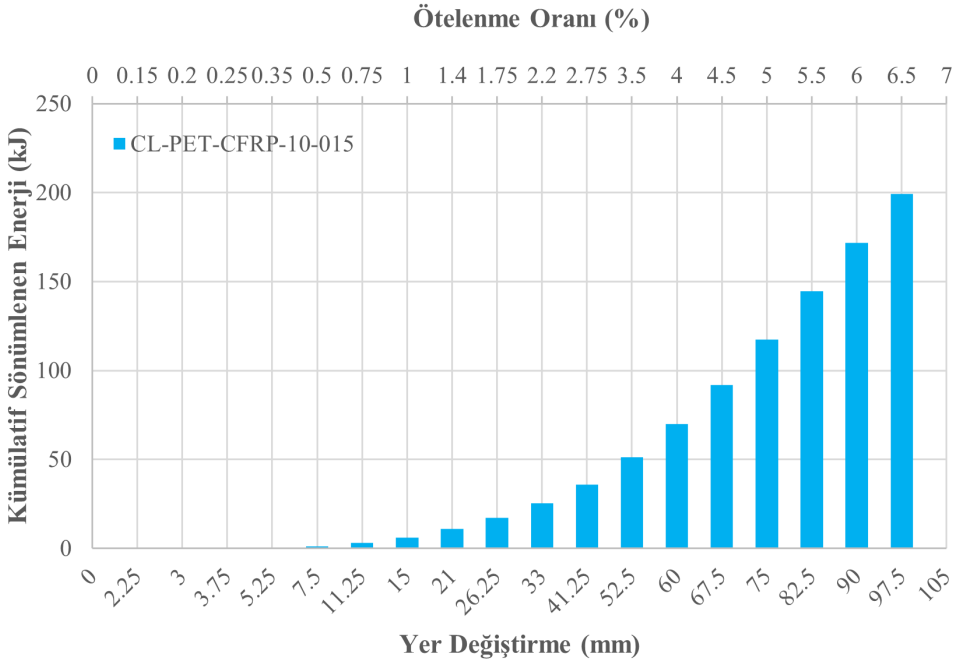
Ötelenme oranı (%)	Sönümlenen enerji (E_{DR}) (kNmm) (J)	Kümülatif sönümlenen enerji (E_{cum}) (kNmm) (J)
0.15	15.666	15.666
0.2	50.988	66.654
0.25	104.513	171.167
0.35	166.428	337.595
0.5	917.989	1255.583
0.75	1830.807	3086.391
1	2994.134	6080.525
1.4	4780.864	10861.389
1.75	6398.771	17260.160
2.2	8189.458	25449.619
2.75	10429.683	35879.302
3.5	15277.056	51156.358
4	18860.484	70016.842
4.5	21991.602	92008.444
5	25395.110	117403.555
5.5	27051.678	144455.232
6	27199.067	171654.300
6.5	27763.134	199417.434

CL-PET-CFRP-10-015 numunesi için her ötelenme oranında elde edilen sönümlenen enerji değeri ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.73'te verilmiştir.



Şekil 6.73. CL-PET-CFRP-10-015 numunesi sönümlenen enerji grafiği.

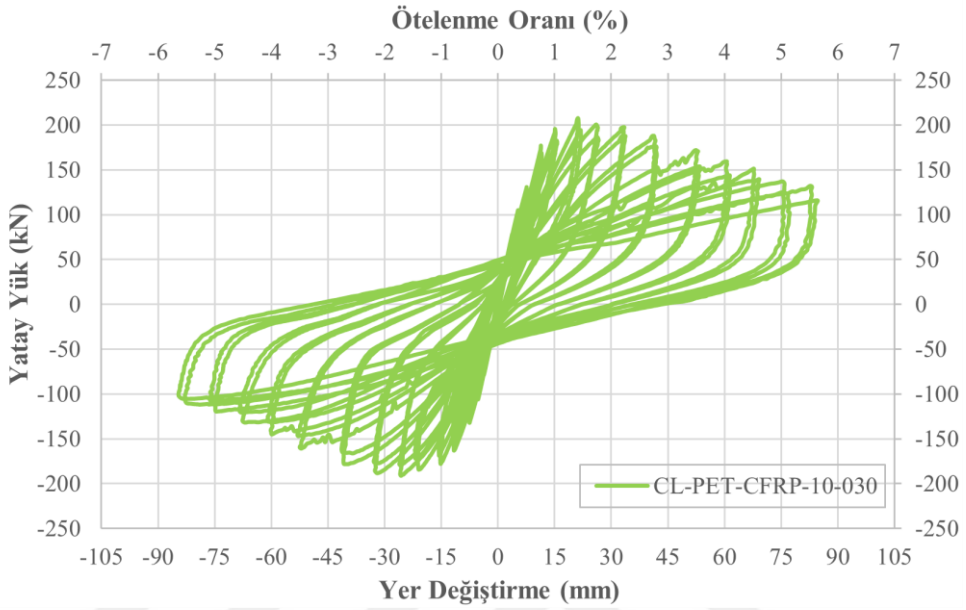
CL-PET-CFRP-10-015 numunesi için her ötelenme oranında elde edilen kümülatif sönümlenen enerji değeri ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.74'te verilmiştir.



Şekil 6.74. CL-PET-CFRP-10-015 numunesi kümülatif sönümlenen enerji grafiği.

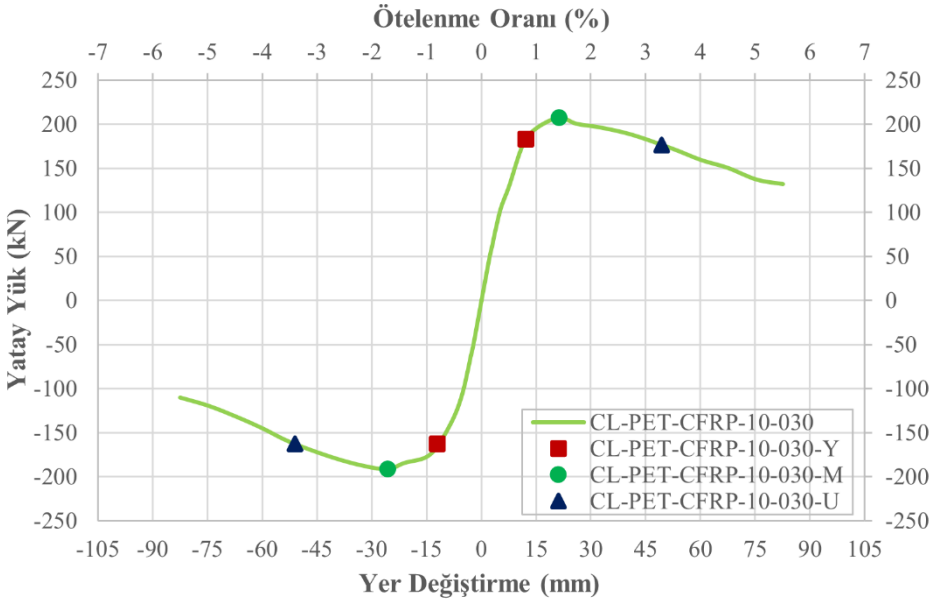
6.4.8. CL-PET-CFRP-10-030 kolonu

CL-PET-CFRP-10-030 numunesi PET ikamesi yapılıp karbon lifli polimer sargı kullanılarak $0.30f_{ck}A_c$ normal kuvveti altında test edilmiştir. Test sonucunda elde edilen yatay yük-yer değiştirme grafiği Şekil 6.75'te verilmiştir.



Şekil 6.75. CL-PET-CFRP-10-030 yatay yük-yer değiştirme grafiği.

Test sonucunda elde edilen zarf eğrisi grafiği Şekil 6.76'da verilmiştir.



Şekil 6.76. CL-PET-CFRP-10-030 zarf eğrisi.

CL-PET-CFRP-10-030 numunesi için deney sonucunda elde edilen veriler Tablo 6.27'de verilmiştir.

Tablo 6.27. CL-PET-CFRP-10-030 numunesi deney sonuçları.

Numune ismi	Yük yönü	Δ_y (mm)	V_y (kN)	DR_y (%)	Δ_m (mm)	V_m (kN)	DR_m (%)	Δ_u (mm)	V_u (kN)	DR_u (%)	μ
CL-PET-CFRP-10-030	+	12.162	182.984	0.811	21.230	207.530	1.415	49.445	176.401	3.296	4.066
	-	11.994	162.856	0.800	25.674	191.112	1.712	51.087	162.446	3.406	4.259
	ORT	12.078	172.920	0.805	23.452	199.321	1.563	50.266	169.423	3.351	4.162

CL-PET-CFRP-10-030 numunesi için deney sonrasında alınan hasarlar ile ilgili görüntüler Şekil 6.77'de verilmiştir.



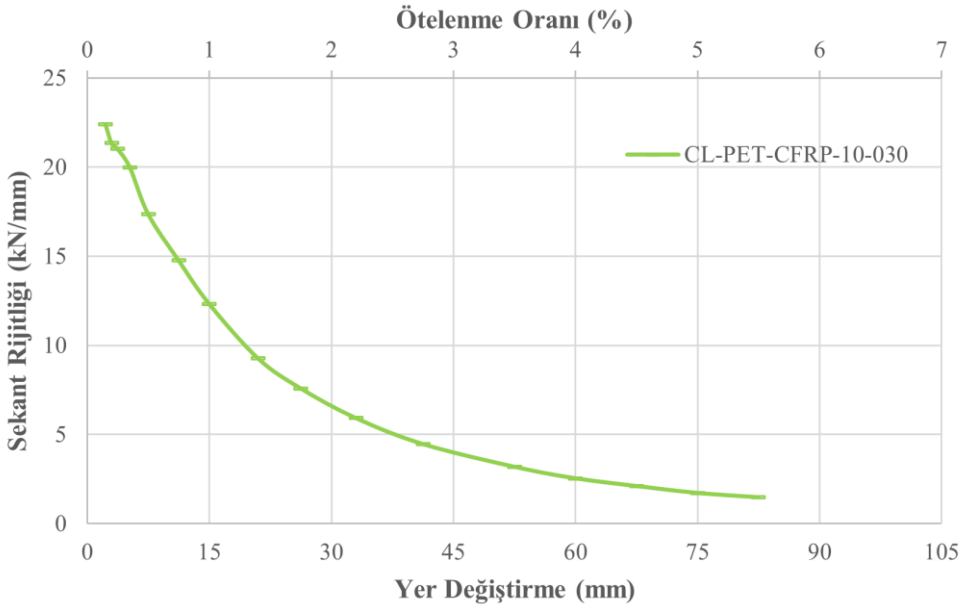
Şekil 6.77. CL-PET-CFRP-10-030 numunesi deney sonrası görüntüleri.

CL-PET-CFRP-10-030 numunesinde her ötelenme oranının ilk döngüsü için sekant rijitliği bulunmuştur. Bulunan sekant rijitlikleri ilk ötelenme oranına bölünerek sekant rijitlik oranları bulunmuştur. Bulunan değerler Tablo 6.28'de verilmiştir.

Tablo 6.28. CL-PET-CFRP-10-030 numunesi için rijitlik değerleri.

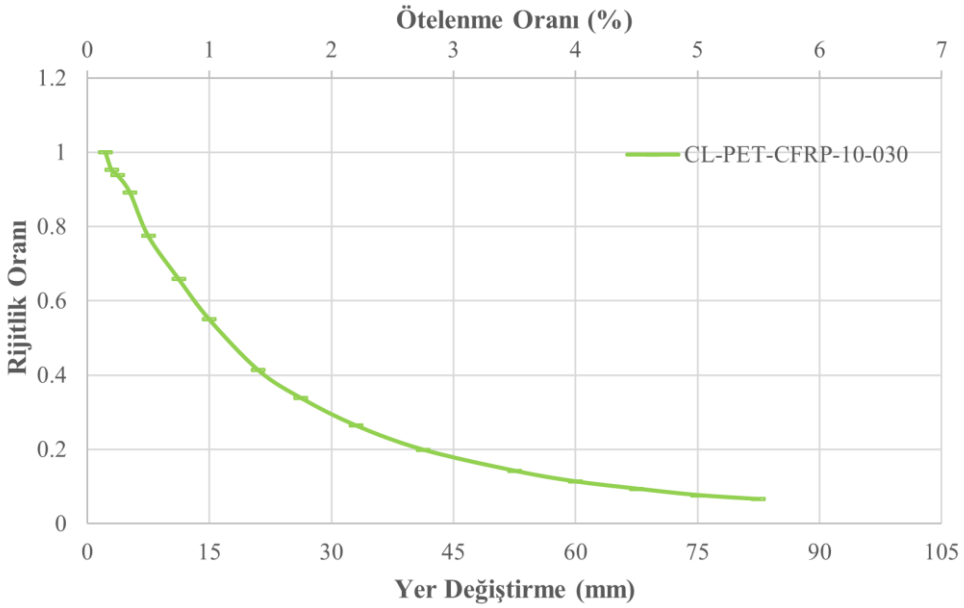
Ötelenme oranı (%)	Sekant rijitliği (K_{DR}) (kN/mm)	Sekant rijitlik oranı ($K_{DR}/K_{0.15}$) (λ_K)
0.15	22.414	1.000
0.2	21.344	0.952
0.25	21.017	0.938
0.35	19.988	0.892
0.5	17.363	0.775
0.75	14.759	0.658
1	12.322	0.550
1.4	9.267	0.413
1.75	7.579	0.338
2.2	5.920	0.264
2.75	4.459	0.199
3.5	3.182	0.142
4	2.535	0.113
4.5	2.101	0.094
5	1.711	0.076
5.5	1.469	0.066

CL-PET-CFRP-10-030 numunesi için sekant rijitliği ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.78'de verilmiştir.



Şekil 6.78. CL-PET-CFRP-10-030 numunesi sekant rijitliği grafiği.

CL-PET-CFRP-10-030 numunesi için sekant rijitlik oranı ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.79'da verilmiştir.



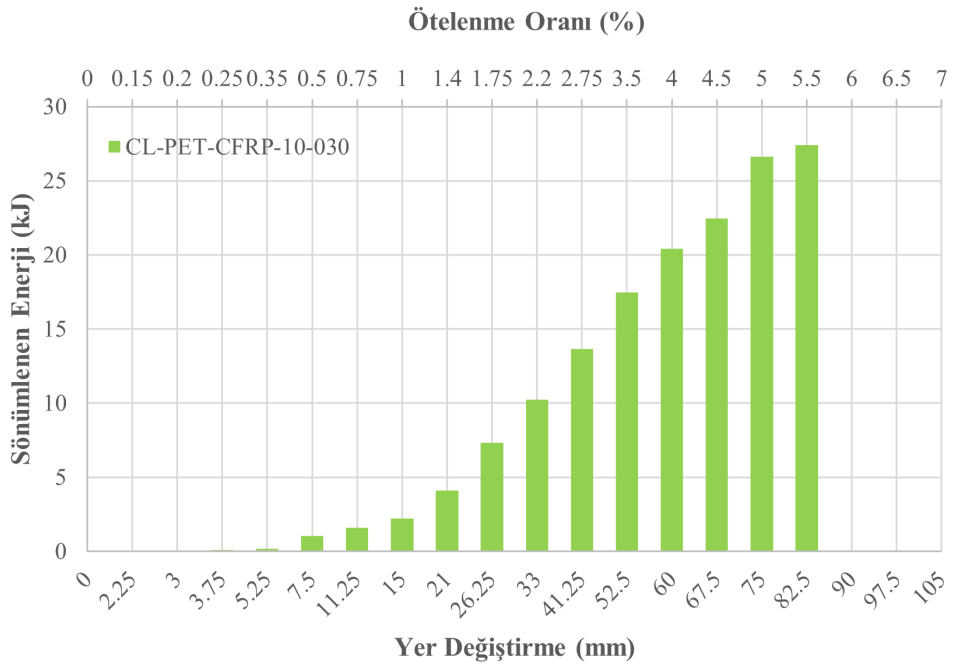
Şekil 6.79. CL-PET-CFRP-10-030 numunesi sekant rijitlik oranı grafiği.

CL-PET-CFRP-10-030 numunesinin her ötelenme oranında sönümlemiş olduğu enerji değerleri (E_{DR}) ayrı ayrı olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan enerji değerleri bir sonraki ötelenme oranındaki sönümlenen enerji değerleri ile toplanarak kümülatif enerji değerleri (E_{cum}) elde edilmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 6.29'da verilmiştir.

Tablo 6.29. CL-PET-CFRP-10-030 numunesi için sönümlenen enerji değerleri.

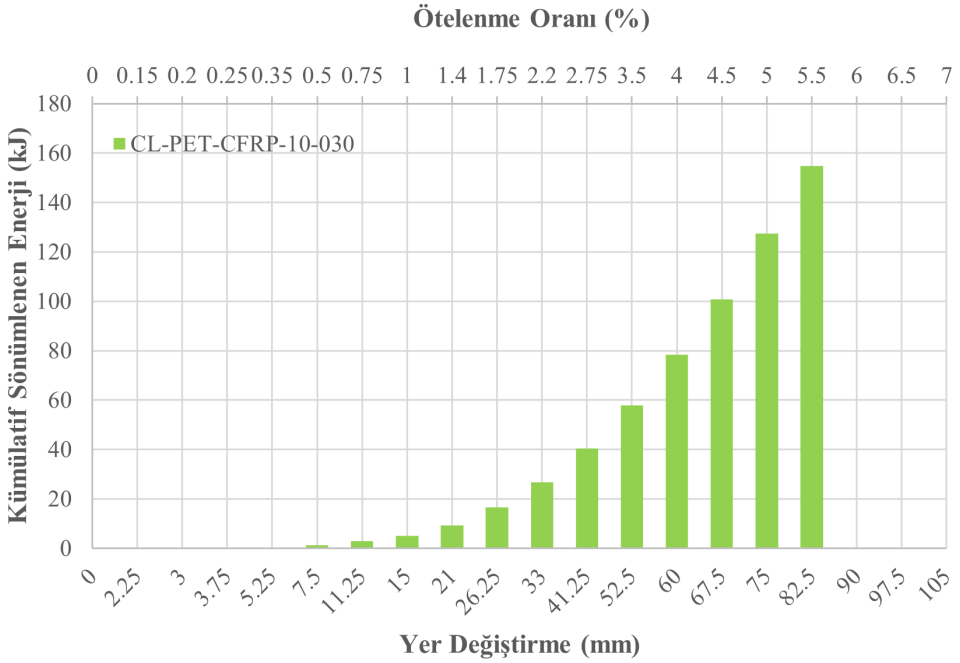
Ötelenme oranı (%)	Sönümlenen enerji (E_{DR}) (kNmm) (J)	Kümülatif sönümlenen enerji (E_{cum}) (kNmm) (J)
0.15	15.376	15.376
0.2	49.243	64.619
0.25	83.068	147.687
0.35	160.188	307.874
0.5	1033.334	1341.208
0.75	1583.985	2925.193
1	2200.022	5125.216
1.4	4097.909	9223.125
1.75	7333.654	16556.779
2.2	10251.874	26808.653
2.75	13671.635	40480.289
3.5	17458.147	57938.436
4	20419.895	78358.331
4.5	22450.515	100808.846
5	26615.089	127423.935
5.5	27423.457	154847.392

CL-PET-CFRP-10-030 numunesi için her ötelenme oranında elde edilen sönümlenen enerji değeri ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.80'de verilmiştir.



Şekil 6.80. CL-PET-CFRP-10-030 numunesi sönümlenen enerji grafiği.

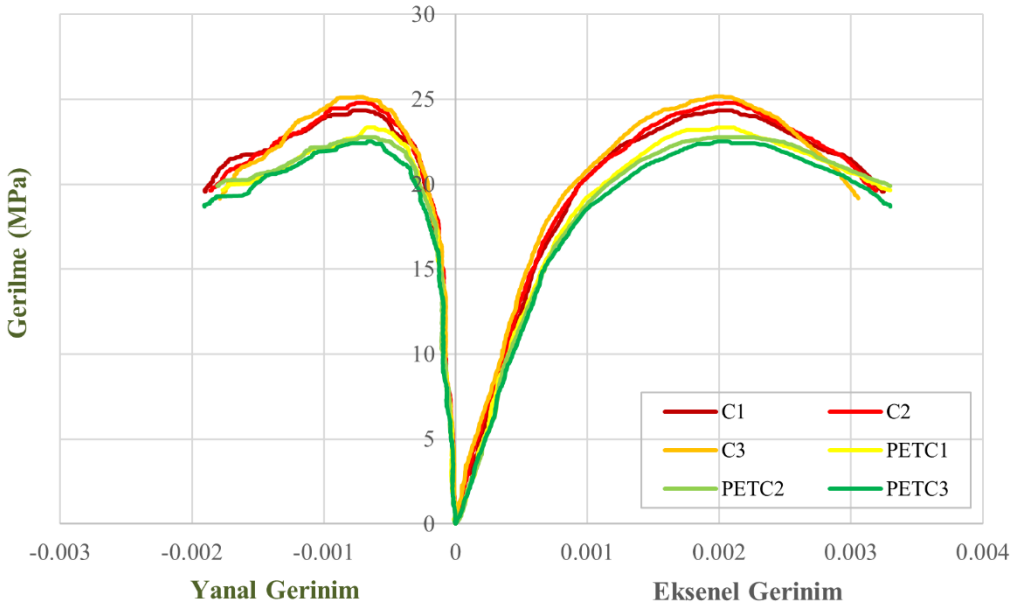
CL-PET-CFRP-10-030 numunesi için her ötelenme oranında elde edilen kümülatif sönümlenen enerji değeri ile ilgili elde edilen grafik Şekil 6.81'de verilmiştir.



Şekil 6.81. CL-PET-CFRP-10-030 numunesi kümülatif sönümlenen enerji grafiği.

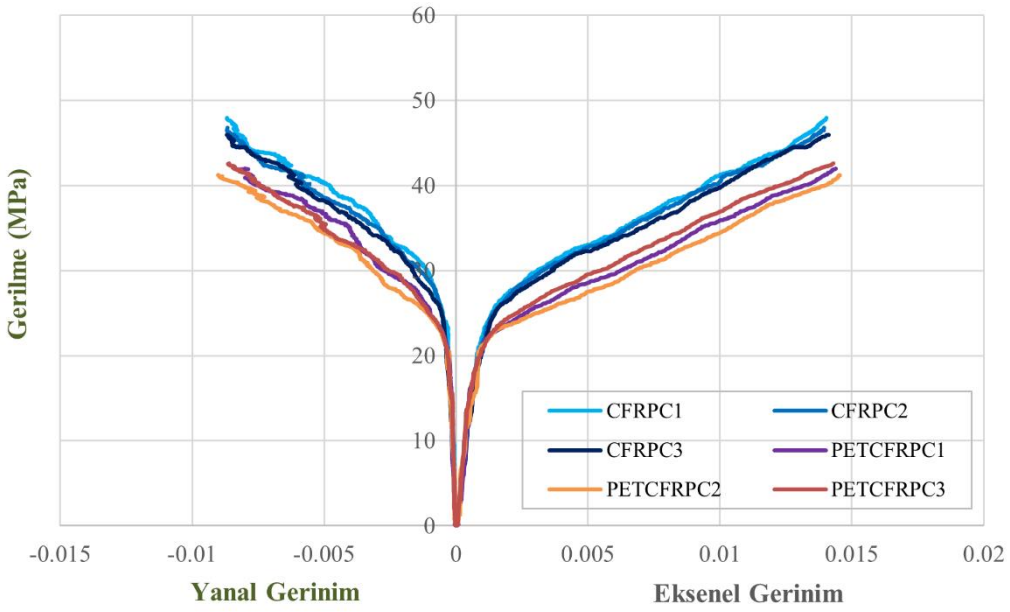
6.5. Kolonlardan Alınan Numuneler İçin Malzeme Deneyleri

Betonarme kolonlar üretilirken kolonların betonlarından silindir numuneler alınmıştır. Alınan numuneler 28 gün boyunca kür havuzunda bekletilmiştir. PET ikamesi yapılmayan ve %10 oranında PET ikamesi yapılan betondan üretilen kolonlardan alınan numunelerin bazılarının etrafında CFRP sargı kullanılmıştır. Alınmış olan numuneler basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Şekil 6.82'de CFRP sargı kullanılmayan PET ikamesi yapılmayan ve %10 PET ikamesi yapılan numunelerin grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.82. CFRP sargı kullanılmayan silindir numunelerin grafikleri.

Şekil 6.83'te CFRP sargı kullanılan PET ikamesi yapılmayan ve %10 PET ikamesi yapılan numunelerin grafikleri verilmiştir.



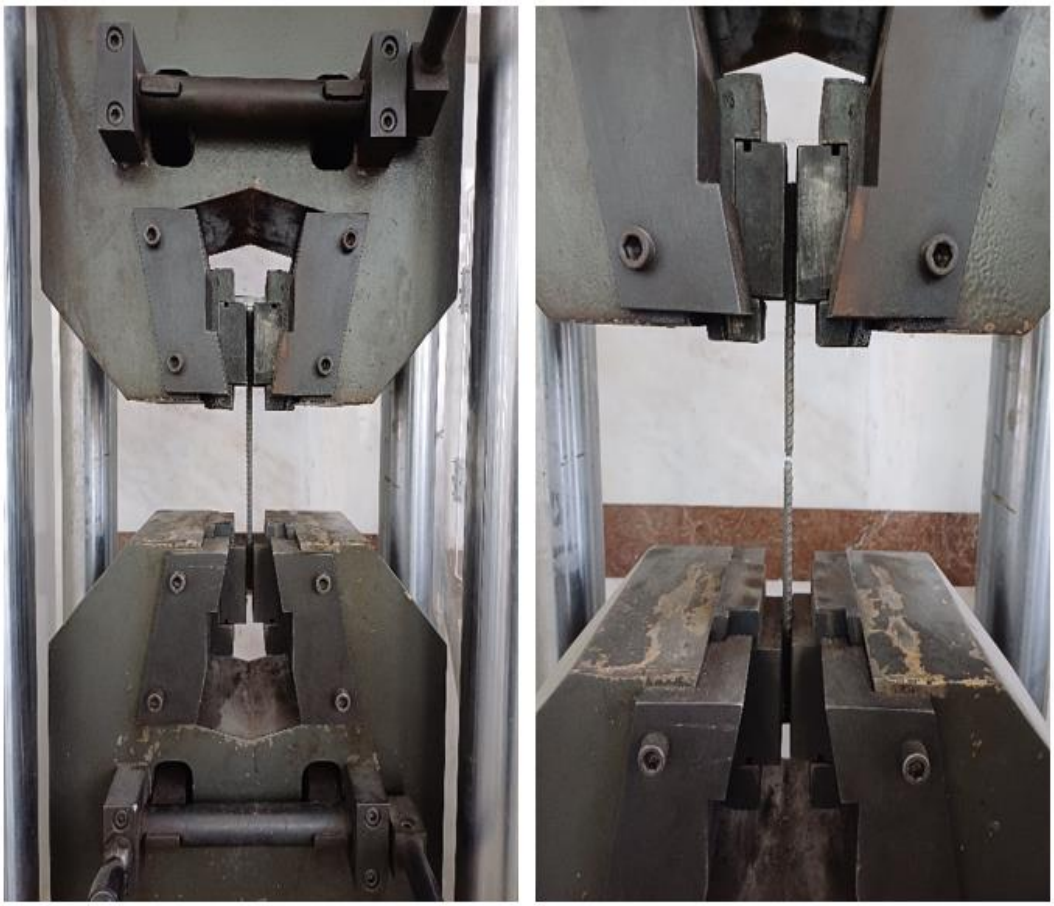
Şekil 6.83. CFRP sargı kullanılan silindir numunelerin grafikleri.

Tablo 6.30'da kolonlardan alınan silindir beton numunelere yapılan basınç deneyinin dayanım sonuçları verilmiştir.

Tablo 6.30. Silindir beton numune dayanımları.

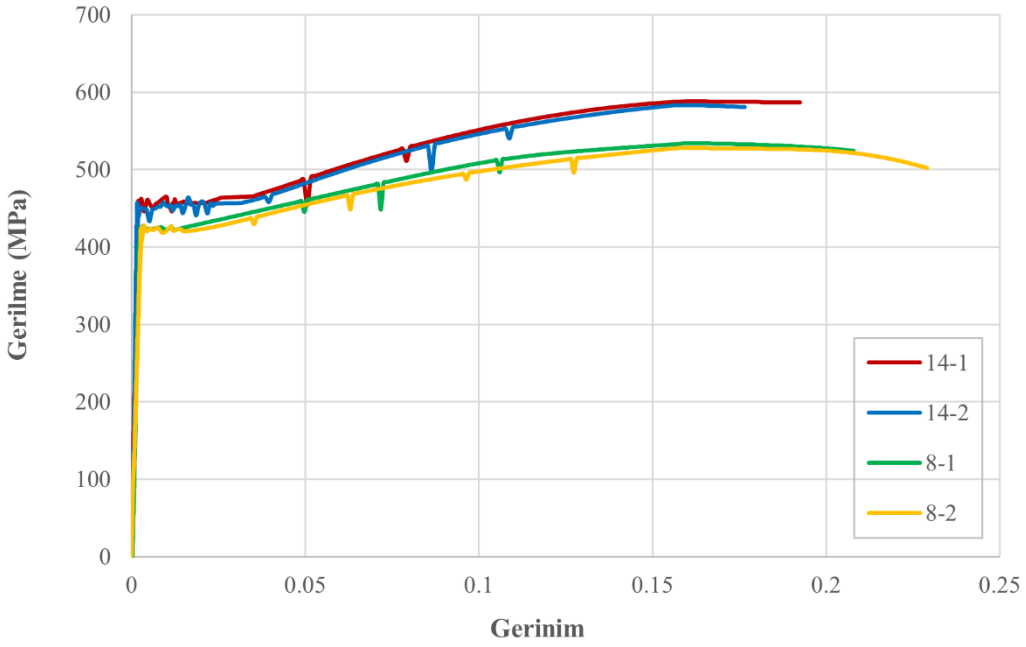
Numune özelliği	Numune ismi	Basınç dayanımı (MPa)
Referans beton	C1	24.49
	C2	24.91
	C3	25.15
%10 PET ikameli beton	PETC1	23.35
	PETC2	22.91
	PETC3	22.65
Referans beton + CFRP sargı	CFRPC1	47.23
	CFRPC2	46.61
	CFRPC3	45.78
%10 PET ikameli beton + CFRP sargı	PETCFRPC1	42.76
	PETCFRPC2	41.84
	PETCFRPC3	43.83

Betonarme kolonlarda kullanılan donatılar için çekme deneyleri yapılmıştır. Şekil 6.84'te deneyler ile ilgili görüntüler verilmiştir.



Şekil 6.84. Donatı çekme deneyi görüntüleri.

Şekil 6.85'te çekme deneylerinden elde edilen gerilme-gerinim grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.85. Donatı çekme deneyi grafikleri.

Tablo 6.31’de donatılara yapılan çekme deneyinin sonuçları verilmiştir.

Tablo 6.31. Donatı çekme deneyi sonuçları.

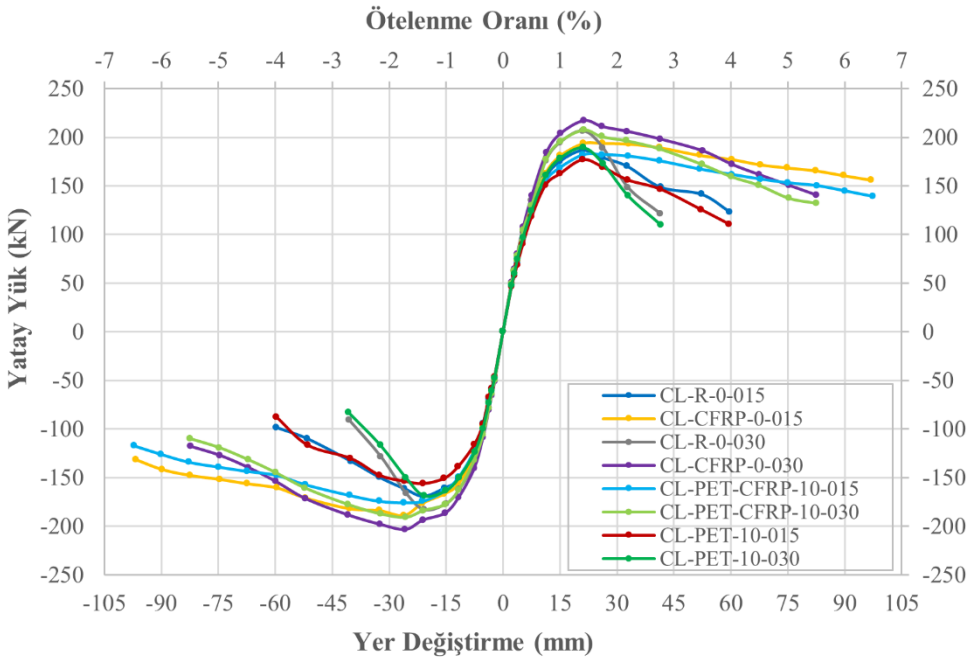
Numune çapı	Numune ismi	Akma dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (MPa)
14	14-1	455.30	588.62	232812.78
	14-2	450.56	583.34	221592.61
8	8-1	425.35	533.98	205643.83
	8-2	421.93	528.22	202392.17

7. KOLON DENEYLERİ İÇİN DEĞERLENDİRME VE TARTIŞMA

Tekrarlı yatay yükleme deneyleri tamamlanmış 8 betonarme kolon numunesinin deney sonuçları taşıdıkları maksimum yük, süneklik katsayısı, rijitlik azalması ve enerji sönümleme kapasiteleri açısından değerlendirilmiştir. PET ikamesinin olup olmaması, karbon lifli polimer sargının kullanılıp kullanılmaması ve eksenel yük düzeyin değişmesi gibi durumlar için karşılaştırmalar yapılmıştır. Numunelerin birbirlerine göre sahip oldukları parametrelerdeki artışları ve azalışları dikkate alınarak davranışları yorumlanmıştır. Ayrıca numunelerin taşıdıkları maksimum yüklerin daha önce literatürde önerilen modeller ile uyumu incelenmiştir.

7.1. Maksimum Yük ve Süneklik Katsayısı Değerlerinin Karşılaştırılması

Birbirlerinden PET ikamesinin varlığına, karbon lifli polimer sargının kullanımına ve eksenel yük değerine göre farklılaşan numuneler, maksimum yük ve süneklik katsayısı değerleri açısından karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalara ait görseller toplu şekilde Şekil 7.1'de verilmiştir.



Şekil 7.1. Tüm kolon numunelerinin zarf eğrileri.

Daha detaylı karşılaştırmalar bölümün ilerleyen kısımlarında yapılmıştır.

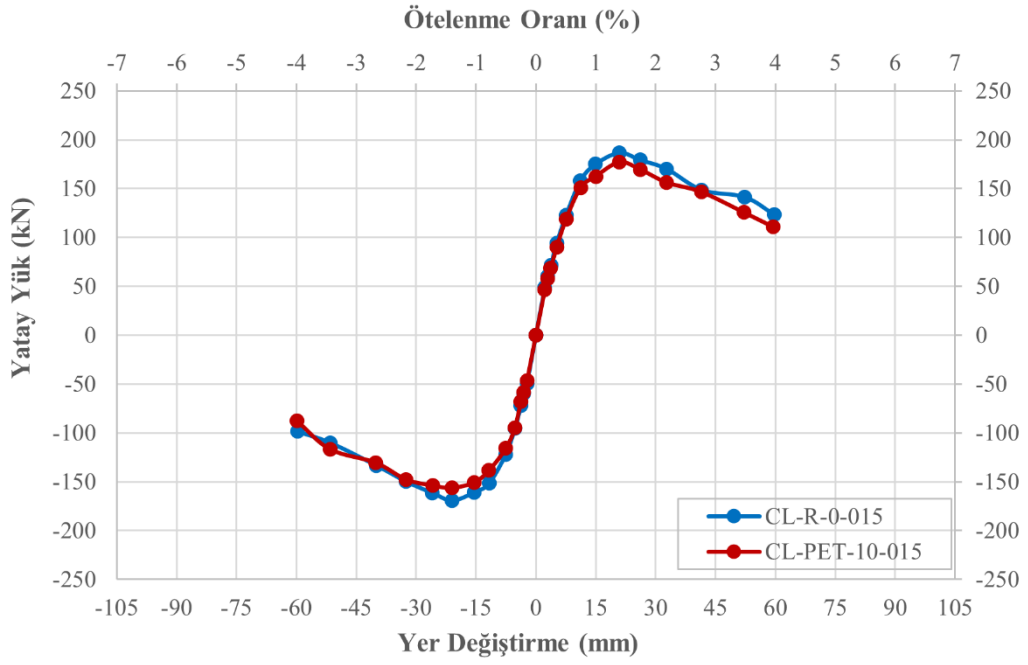
7.1.1. PET ikamesinin varlığına göre maksimum yük ve süneklik katsayısı

Betonarme kolonların betonunda PET ikamesinin yapılması durumunda numunelerin maksimum yüklerindeki ve süneklik katsayılarındaki artışlar veya azalışlar yüzdesel olarak hesaplanmıştır. Tablo 7.1'de değerlerdeki artışlar veya azalışlar toplu şekilde verilmiştir.

Tablo 7.1. Maksimum yük ve süneklik katsayısına PET ikamesinin etkisi.

Numune ismi	Maksimum yük (kN)	Yüzdesel artış (%)	Süneklik katsayısı	Yüzdesel artış (%)
CL-R-0-015	177.943	-	3.081	-
CL-PET-10-015	166.510	-6.425	3.152	2.313
CL-R-0-030	194.833	-	2.227	-
CL-PET-10-030	179.061	-8.095	2.261	1.502
CL-CFRP-0-015	191.287	-	5.483	-
CL-PET-CFRP-10-015	178.863	-6.495	5.611	2.331
CL-CFRP-0-030	210.148	-	4.041	-
CL-PET-CFRP-10-030	199.321	-5.152	4.162	2.996

PET ikamesinin varlığına göre birbirinden farklılaşan CL-R-0-015 ve CL-PET-10-015 numunelerine ait zarf eğrileri Şekil 7.2'de verilmiştir.

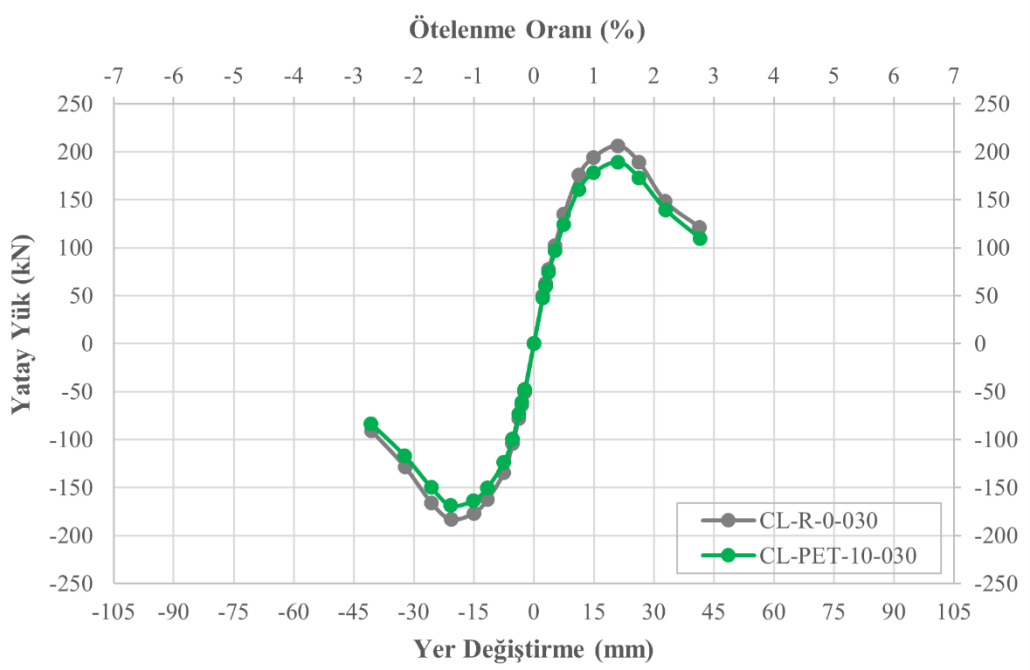


Şekil 7.2. CL-R-0-015 ve CL-PET-10-015 zarf eğrisi karşılaştırması.

Betonunda PET ikamesi bulunmayan, karbon lifli polimer sargı kullanılmamış ve $0.15f_{ck}A_c$ normal kuvveti altında test edilen kolon numunesine (CL-R-0-015) PET ikamesi yapılması (CL-PET-10-015) sonucunda numunenin taşıdığı maksimum yük

değeri 177.943 kN değerinden %6.425 düşüş göstererek 166.510 kN değerine gerilemiştir. Bununla birlikte süneklik katsayısı değeri 3.081 değerinden %2.313 artış göstererek 3.152 değerine çıkmıştır.

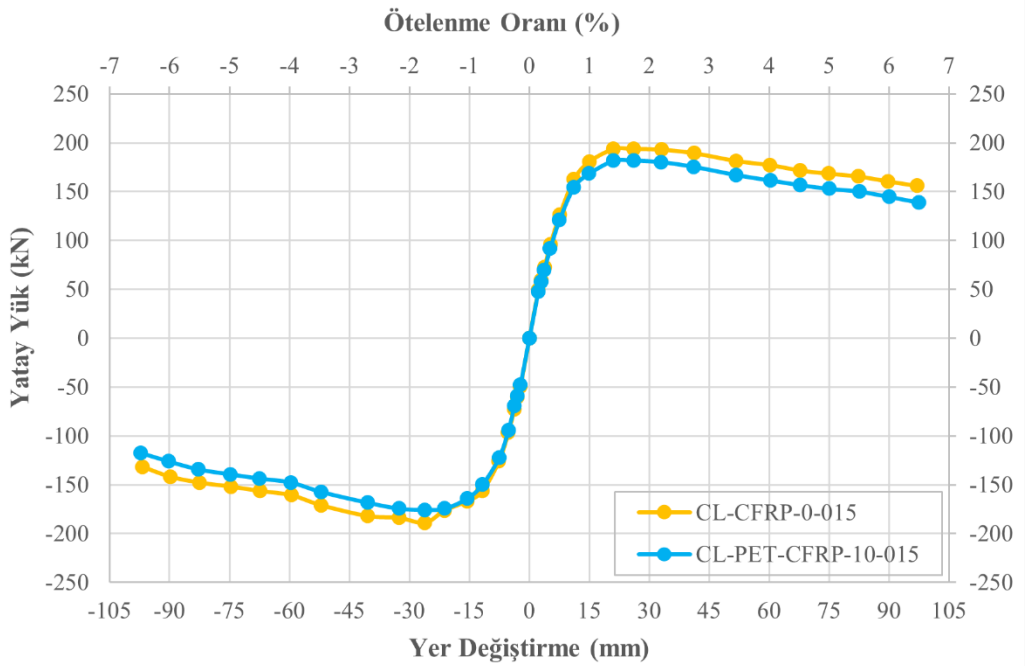
PET ikamesinin varlığına göre birbirinden farklılaşan CL-R-0-030 ve CL-PET-10-030 numunelerine ait zarf eğrileri Şekil 7.3'te verilmiştir.



Şekil 7.3. CL-R-0-030 ve CL-PET-10-030 zarf eğrisi karşılaştırması.

Betonunda PET ikamesi bulunmayan, karbon lifli polimer sargı kullanılmamış ve $0.30f_{ck}A_c$ normal kuvveti altında test edilen kolon numunesine (CL-R-0-030) PET ikamesi yapılması (CL-PET-10-030) sonucunda numunenin taşıdığı maksimum yük değeri 194.833 kN değerinden %8.095 düşüş göstererek 179.061 kN değerine gerilemiştir. Bununla birlikte süneklik katsayısı değeri 2.227 değerinden %1.502 artış göstererek 2.261 değerine çıkmıştır.

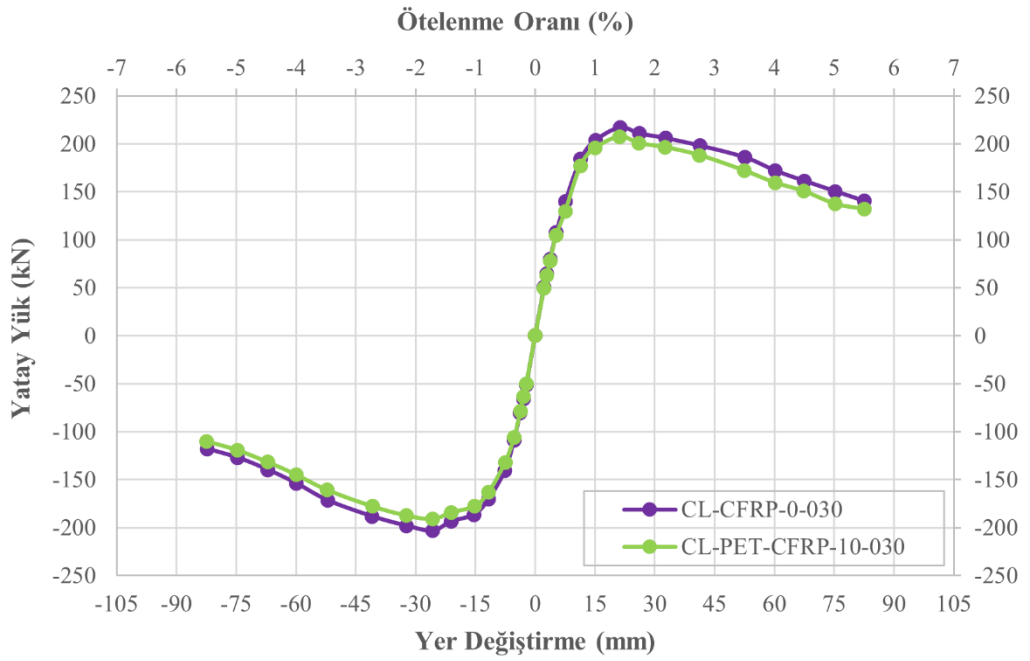
PET ikamesinin varlığına göre birbirinden farklılaşan CL-CFRP-0-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 numunelerine ait zarf eğrileri Şekil 7.4'te verilmiştir.



Şekil 7.4. CL-CFRP-0-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 zarf eğrisi karşılaştırması.

Betonunda PET ikamesi bulunmayan, karbon lifli polimer sargı kullanılmış ve $0.15f_{ck}A_c$ normal kuvveti altında test edilen kolon numunesine (CL-CFRP-0-015) PET ikamesi yapılması (CL-PET-CFRP-10-015) sonucunda numunenin taşıdığı maksimum yük değeri 191.287 kN değerinden %6.495 düşüş göstererek 178.863 kN değerine gerilemiştir. Bununla birlikte süneklik katsayısı değeri 5.483 değerinden %2.331 artış göstererek 5.611 değerine çıkmıştır.

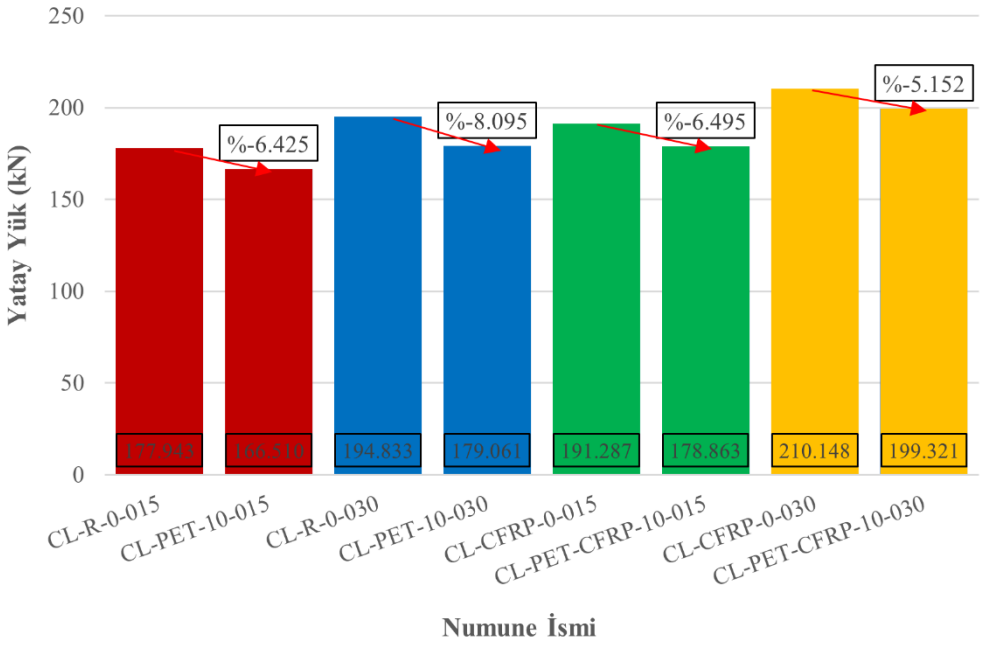
PET ikamesinin varlığına göre birbirinden farklılaşan CL-CFRP-0-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 numunelerine ait zarf eğrileri Şekil 7.5'te verilmiştir.



Şekil 7.5. CL-CFRP-0-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 zarf eğrisi karşılaştırması.

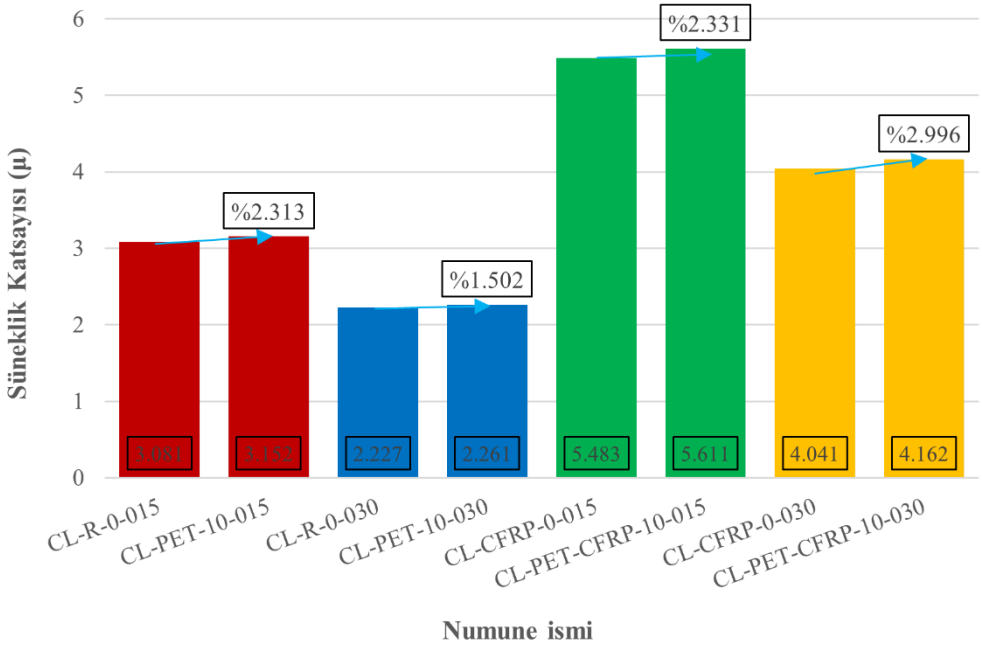
Betonunda PET ikamesi bulunmayan, karbon lifli polimer sargı kullanılmış ve $0.30 f_{ck} A_c$ normal kuvveti altında test edilen kolon numunesine (CL-CFRP-0-030) PET ikamesi yapılması (CL-PET-CFRP-10-030) sonucunda numunenin taşıdığı maksimum yük değeri 210.148 kN değerinden %5.152 düşüş göstererek 199.321 kN değerine gerilemiştir. Bununla birlikte süneklik katsayısı değeri 4.041 değerinden %2.996 artış göstererek 4.162 değerine çıkmıştır.

PET ikamesinin varlığına göre birbirinden farklılaşan numunelerin taşıdıkları maksimum yüklerin yüzdesel olarak artış veya azalışları Şekil 7.6'da verilmiştir.



Şekil 7.6. Maksimum yük değerlerine PET ikamesinin etkisi.

PET ikamesinin varlığına göre birbirinden farklılaşan numunelerin süneklik katsayılarının yüzdesel olarak artış veya azalışları Şekil 7.7'de verilmiştir.



Şekil 7.7. Süneklik katsayısı değerlerine PET ikamesinin etkisi.

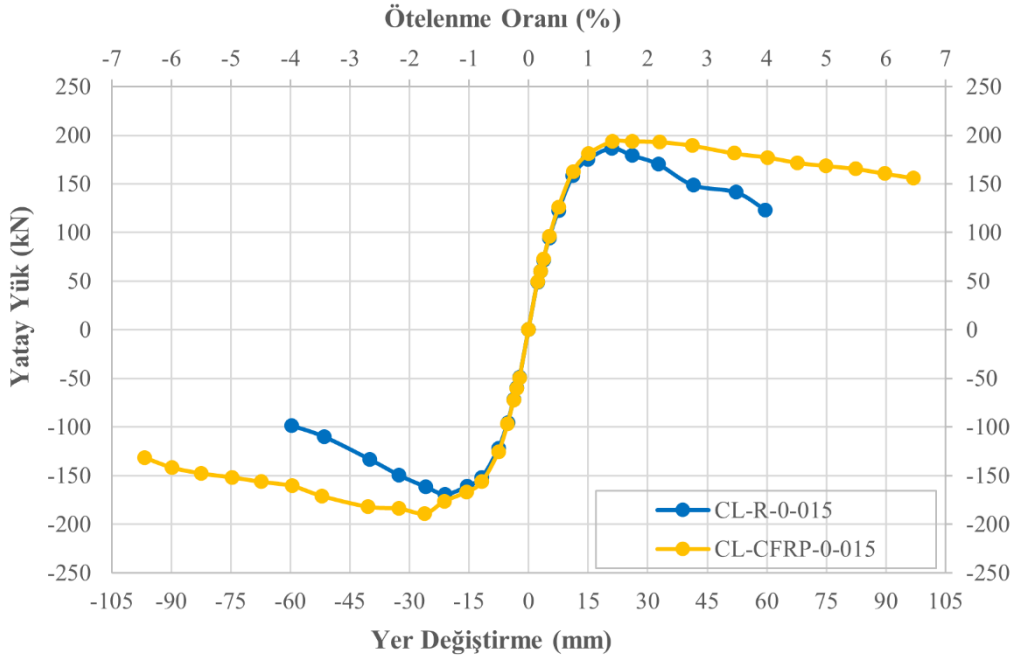
7.1.2. Karbon lifli polimer sargı kullanımına göre maksimum yük ve süneklik katsayısı

Betonarme kolonların etrafında karbon lifli polimer sargı kullanılması durumunda numunelerin maksimum yüklerindeki ve süneklik katsayılarındaki artışlar veya azalışlar yüzdesel olarak hesaplanmıştır. Tablo 7.2'de değerlerdeki artışlar veya azalışlar toplu şekilde verilmiştir.

Tablo 7.2. Maksimum yük ve süneklik katsayısına karbon lifli polimer sargının etkisi.

Numune ismi	Maksimum yük (kN)	Yüzdesel artış (%)	Süneklik katsayısı	Yüzdesel artış (%)
CL-R-0-015	177.943	-	3.081	-
CL-CFRP-0-015	191.287	7.499	5.483	77.964
CL-R-0-030	194.833	-	2.227	-
CL-CFRP-0-030	210.148	7.861	4.041	81.440
CL-PET-10-015	166.510	-	3.152	-
CL-PET-CFRP-10-015	178.863	7.419	5.611	77.997
CL-PET-10-030	179.061	-	2.261	-
CL-PET-CFRP-10-030	199.321	11.315	4.162	84.110

Etrafında karbon lifli polimer sargı kullanılması durumuna göre birbirinden farklılaşan CL-R-0-015 ve CL-CFRP-0-015 numunelerine ait zarf eğrileri Şekil 7.8'de verilmiştir.

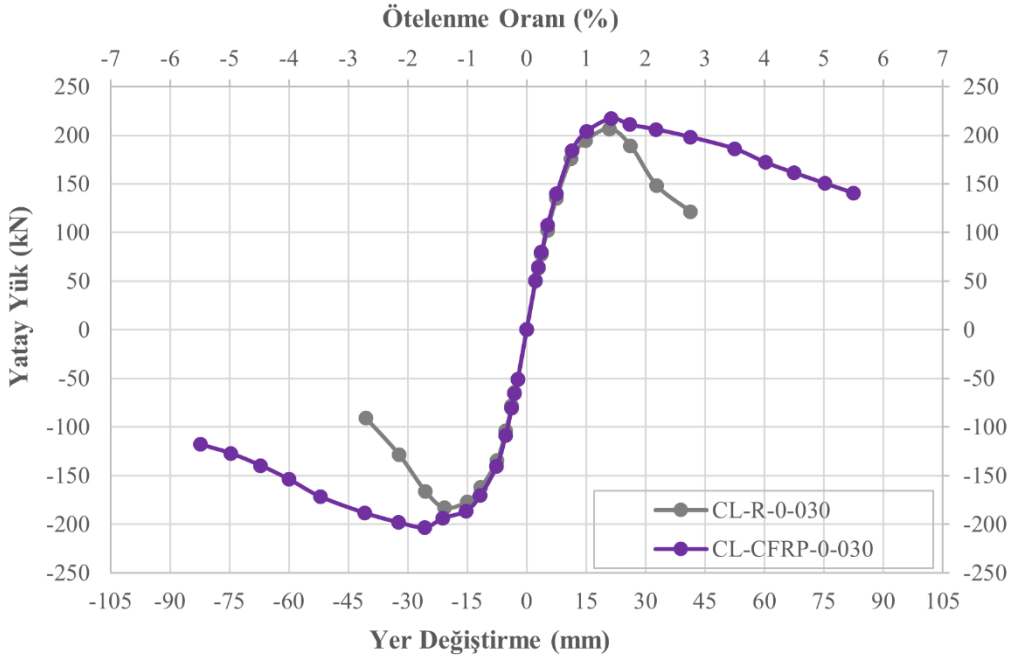


Şekil 7.8. CL-R-0-015 ve CL-CFRP-0-015 zarf eğrisi karşılaştırması.

Karbon lifli polimer ile sarılmamış, betonunda PET ikamesi bulunmayan ve $0.15 f_{ck} A_c$ normal kuvveti altında test edilen kolon numunesinin (CL-R-0-015) etrafına karbon lifli polimer sargı uygulanması (CL-CFRP-0-015) sonucunda numunenin taşıdığı maksimum yük değeri 177.943 kN değerinden %7.499 artarak 191.287 kN değerine

erişmiştir. Bununla birlikte süneklik katsayısı değeri 3.081 değerinden %77.964 artış göstererek 5.483 değerine çıkmıştır.

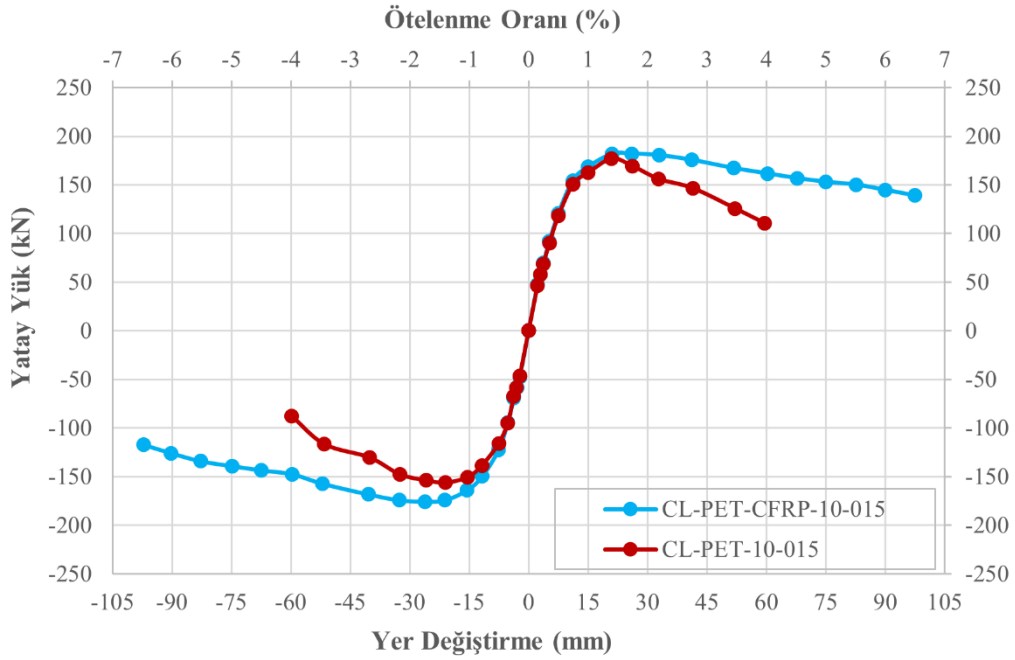
Etrafında karbon lifli polimer sargı kullanılması durumuna göre birbirinden farklılaşan CL-R-0-030 ve CL-CFRP-0-030 numunelerine ait zarf eğrileri Şekil 7.9'da verilmiştir.



Şekil 7.9. CL-R-0-030 ve CL-CFRP-0-030 zarf eğrisi karşılaştırması.

Karbon lifli polimer ile sarılmamış, betonunda PET ikamesi bulunmayan ve $0.30 f_{ck} A_c$ normal kuvveti altında test edilen kolon numunesinin (CL-R-0-030) etrafına karbon lifli polimer sargı uygulanması (CL-CFRP-0-030) sonucunda numunenin taşıdığı maksimum yük değeri 194.833 kN değerinden %7.861 artarak 210.148 kN değerine erişmiştir. Bununla birlikte süneklik katsayısı değeri 2.227 değerinden %81.440 artış göstererek 4.041 değerine çıkmıştır.

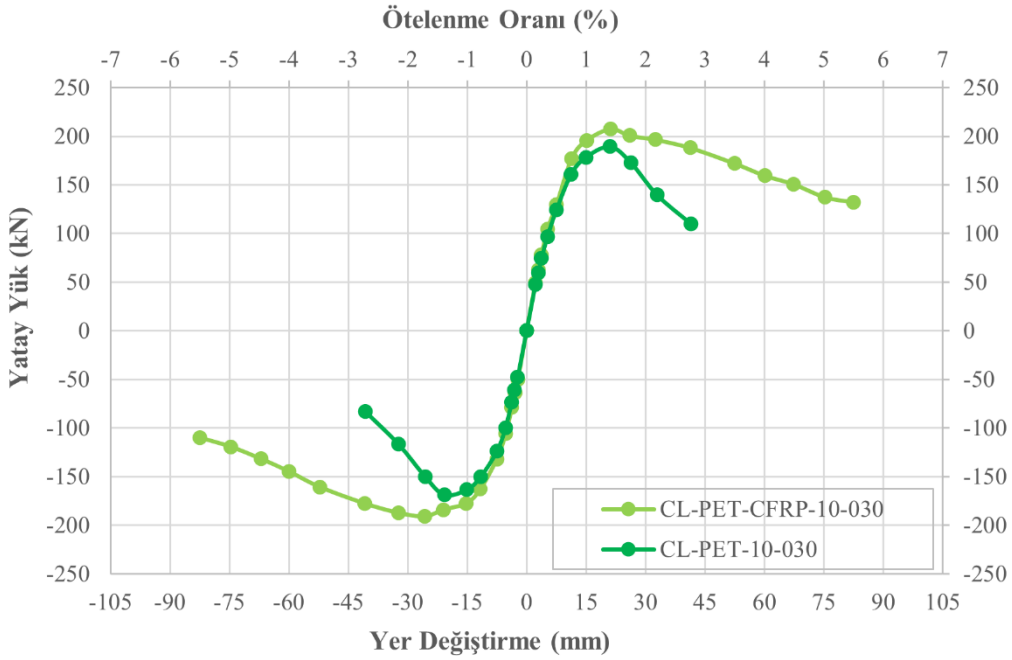
Etrafında karbon lifli polimer sargı kullanılması durumuna göre birbirinden farklılaşan CL-PET-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 numunelerine ait zarf eğrileri Şekil 7.10'da verilmiştir.



Şekil 7.10. CL-PET-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 zarf eğrisi karşılaştırması.

Karbon lifli polimer ile sarılmamış, betonunda PET ikamesi bulunan ve $0.15 f_{ck} A_c$ normal kuvveti altında test edilen kolon numunesinin (CL-PET-10-015) etrafına karbon lifli polimer sargı uygulanması (CL-PET-CFRP-10-015) sonucunda numunenin taşıdığı maksimum yük değeri 166.510 kN değerinden %7.419 artarak 178.863 kN değerine erişmiştir. Bununla birlikte süneklik katsayısı değeri 3.152 değerinden %77.997 artış göstererek 5.611 değerine çıkmıştır.

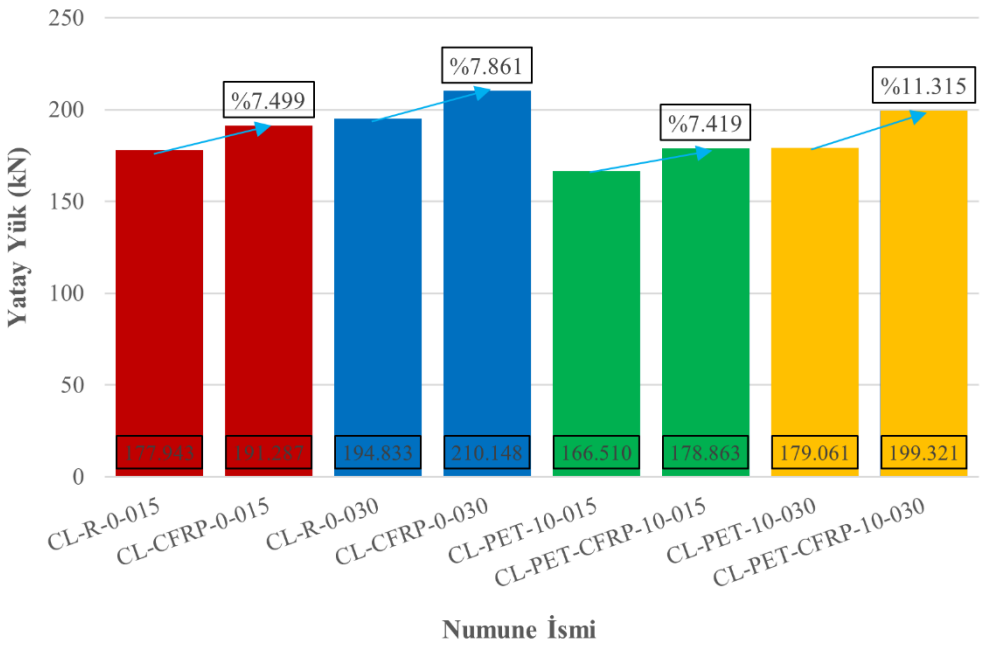
Etrafında karbon lifli polimer sargı kullanılması durumuna göre birbirinden farklılaşan CL-PET-10-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 numunelerine ait zarf eğrileri Şekil 7.11'de verilmiştir.



Şekil 7.11. CL-PET-10-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 zarf eğrisi karşılaştırması.

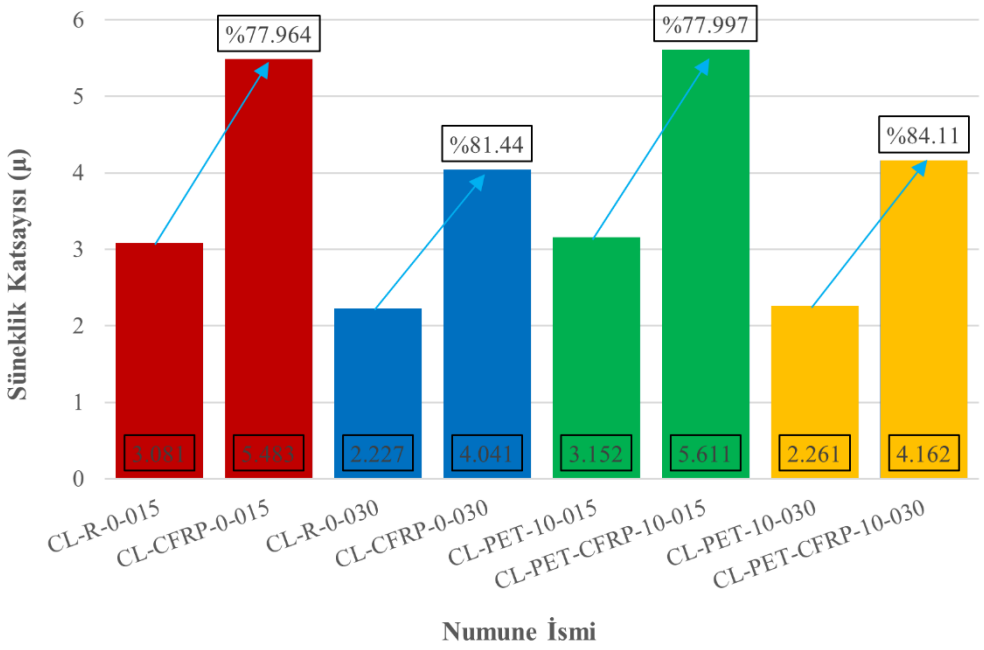
Karbon lifli polimer ile sarılmamış, betonunda PET ikamesi bulunan ve $0.30 f_{ck} A_c$ normal kuvveti altında test edilen kolon numunesinin (CL-PET-10-030) etrafına karbon lifli polimer sargı uygulanması (CL-PET-CFRP-10-030) sonucunda numunenin taşıdığı maksimum yük değeri 179.061 kN değerinden %11.315 artarak 199.321 kN değerine erişmiştir. Bununla birlikte süneklik katsayısı değeri 2.261 değerinden %84.110 artış göstererek 4.162 değerine çıkmıştır.

Karbon lifli polimer sargı kullanılması durumuna göre birbirinden farklılaşan numunelerin taşıdıkları maksimum yüklerin yüzdesel olarak artış veya azalışları Şekil 7.12'de verilmiştir.



Şekil 7.12. Maksimum yük değerlerine karbon lifli polimer sargının etkisi.

Karbon lifli polimer sargı kullanılması durumuna göre birbirinden farklılaşan numunelerin süneklik katsayılarının yüzdesel olarak artış veya azalışları Şekil 7.13'te verilmiştir.



Şekil 7.13. Süneklik katsayısı değerlerine karbon lifli polimer sargının etkisi.

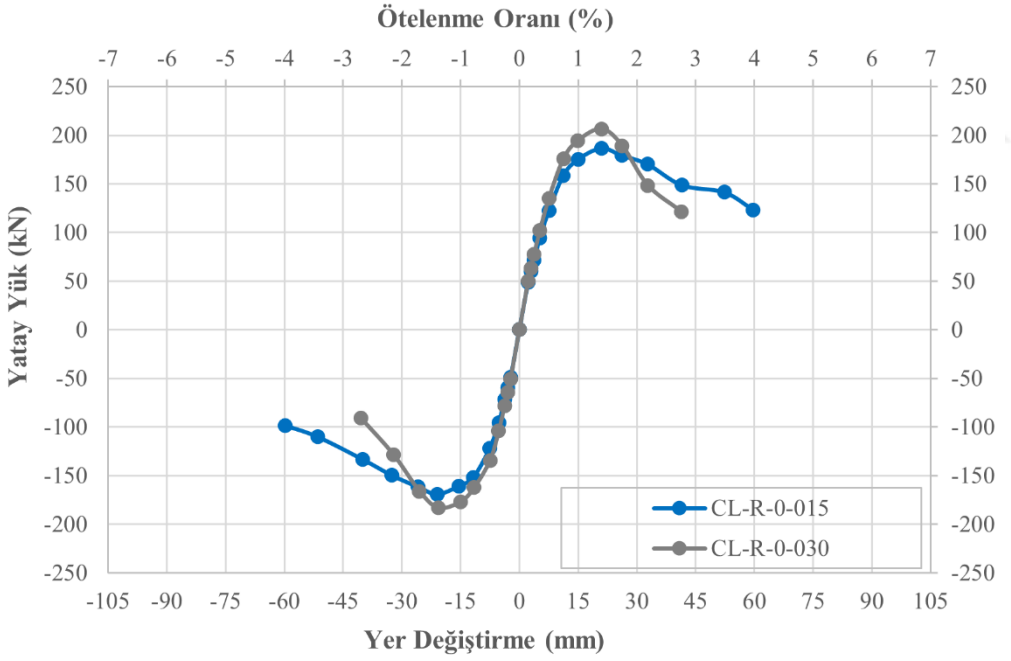
7.1.3. Eksenel yük düzeyine göre maksimum yük ve süneklik katsayısı

Deneyler esnasında betonarme kolonlara uygulanan eksenel kuvvetin artırılması durumunda numunelerin maksimum yüklerindeki ve süneklik katsayılarındaki artışlar veya azalışlar yüzdesel olarak hesaplanmıştır. Tablo 7.3'te değerlerdeki artışlar veya azalışlar toplu şekilde verilmiştir.

Tablo 7.3. Maksimum yük ve süneklik katsayısına eksenel yük düzeyinin etkisi.

Numune ismi	Maksimum yük (kN)	Yüzdesel artış (%)	Süneklik katsayısı	Yüzdesel artış (%)
CL-R-0-015	177.943	-	3.081	-
CL-R-0-030	194.833	9.492	2.227	-27.708
CL-CFRP-0-015	191.287	-	5.483	-
CL-CFRP-0-030	210.148	9.860	4.041	-26.297
CL-PET-10-015	166.510	-	3.152	-
CL-PET-10-030	179.061	7.538	2.261	-28.281
CL-PET-CFRP-10-015	178.863	-	5.611	-
CL-PET-CFRP-10-030	199.321	11.438	4.162	-25.818

Eksenel yük düzeyine göre birbirinden farklılaşan CL-R-0-015 ve CL-R-0-030 numunelerine ait zarf eğrileri Şekil 7.14'te verilmiştir.

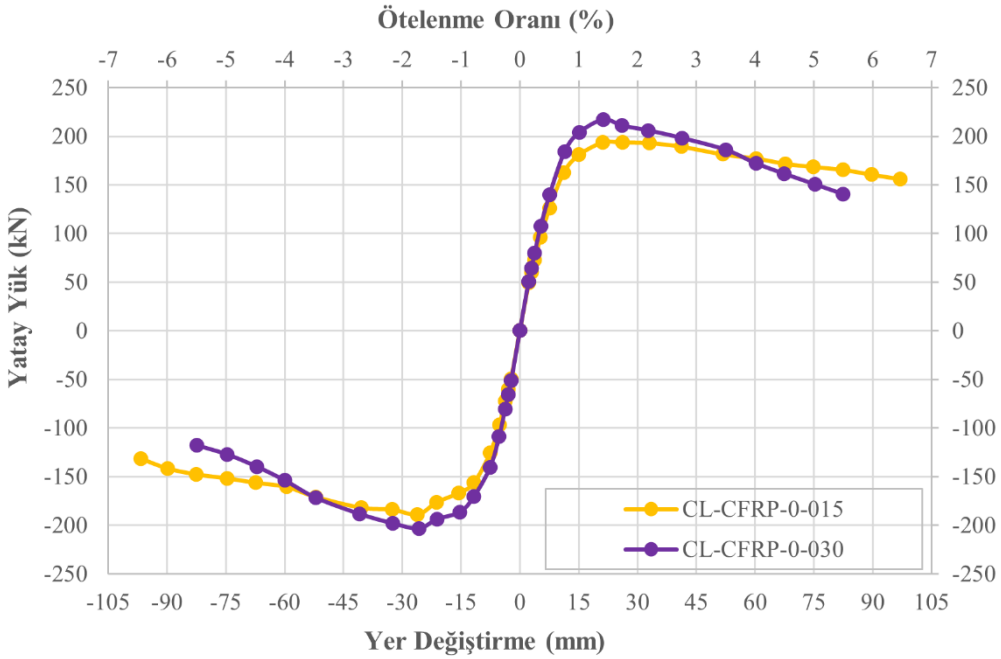


Şekil 7.14. CL-R-0-015 ve CL-R-0-030 zarf eğrisi karşılaştırması.

Eksenel yük düzeyi $0.15f_{ck}A_c$ olan, betonunda PET ikamesi bulunmayan ve karbon lifli polimer sargı ile sarılmamış kolon numunesinin (CL-R-0-015) eksenel yük düzeyinin $0.30f_{ck}A_c$ olarak artırılması (CL-R-0-030) sonucunda numunenin taşıdığı maksimum yük değeri 177.943 kN değerinden %9.492 artarak 194.833 kN değerine

erişmiştir. Bununla birlikte süneklik katsayısı değeri 3.081 değerinden %27.708 düşüş göstererek 2.227 değerine düşmüştür.

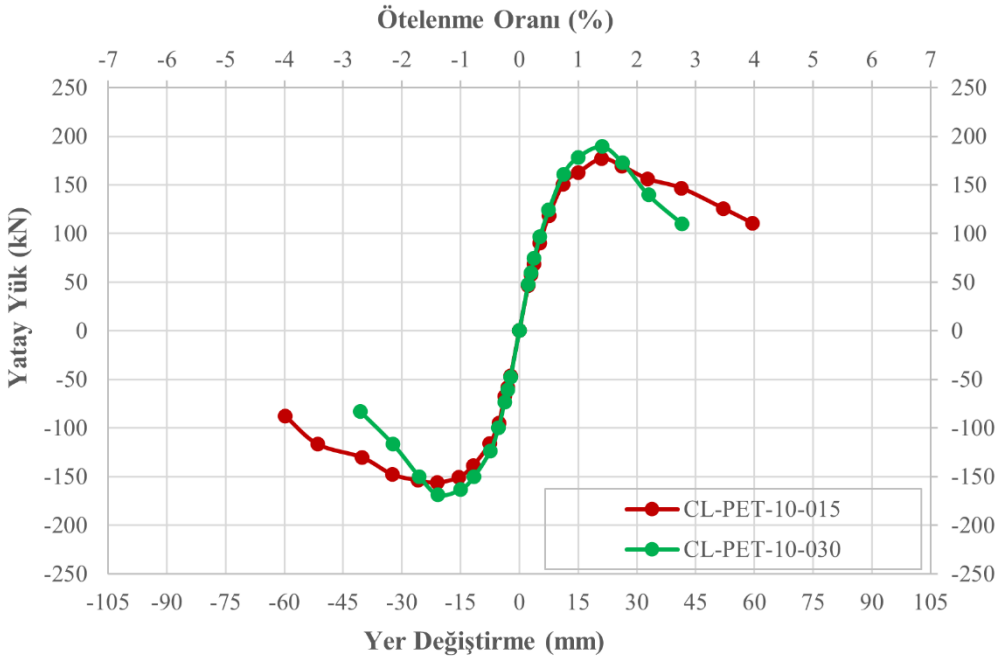
Eksenel yük düzeyine göre birbirinden farklılaşan CL-CFRP-0-015 ve CL-CFRP-0-030 numunelerine ait zarf eğrileri Şekil 7.15'te verilmiştir.



Şekil 7.15. CL-CFRP-0-015 ve CL-CFRP-0-030 zarf eğrisi karşılaştırması.

Eksenel yük düzeyi $0.15f_{ck}A_c$ olan, betonunda PET ikamesi bulunmayan ve karbon lifli polimer sargı ile sarılmış kolon numunesinin (CL-CFRP-0-015) eksenel yük düzeyinin $0.30f_{ck}A_c$ olarak artırılması (CL-CFRP-0-030) sonucunda numunenin taşıdığı maksimum yük değeri 191.287 kN değerinden %9.860 artarak 210.148 kN değerine erişmiştir. Bununla birlikte süneklik katsayısı değeri 5.483 değerinden %26.297 düşüş göstererek 4.041 değerine düşmüştür.

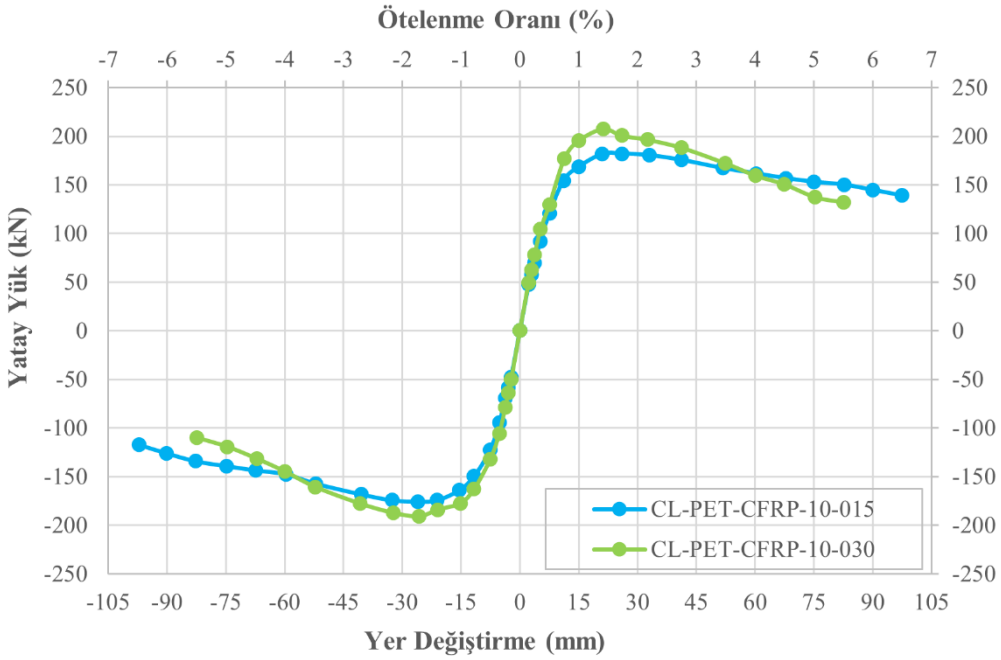
Eksenel yük düzeyine göre birbirinden farklılaşan CL-PET-10-015 ve CL-PET-10-030 numunelerine ait zarf eğrileri Şekil 7.16'da verilmiştir.



Şekil 7.16. CL-PET-10-015 ve CL-PET-10-030 zarf eğrisi karşılaştırması.

Eksenel yük düzeyi $0.15f_{ck}A_c$ olan, betonunda PET ikamesi bulunan ve karbon lifli polimer sargı ile sarılmamış kolon numunesinin (CL-PET-10-015) eksenel yük düzeyinin $0.30f_{ck}A_c$ olarak artırılması (CL-PET-10-030) sonucunda numunenin taşıdığı maksimum yük değeri 166.510 kN değerinden %7.538 artarak 179.061 kN değerine erişmiştir. Bununla birlikte süneklik katsayısı değeri 3.152 değerinden %28.281 düşüş göstererek 2.261 değerine düşmüştür.

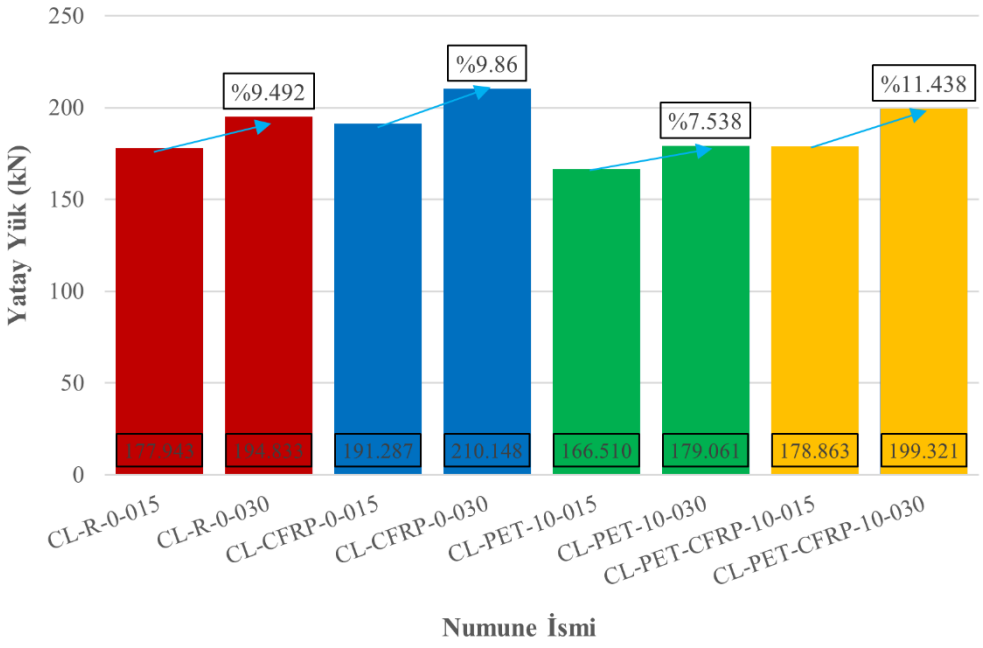
Eksenel yük düzeyine göre birbirinden farklılaşan CL-PET-CFRP-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-030 numunelerine ait zarf eğrileri Şekil 7.17'de verilmiştir.



Şekil 7.17. CL-PET-CFRP-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-030 zarf eğrisi karşılaştırması.

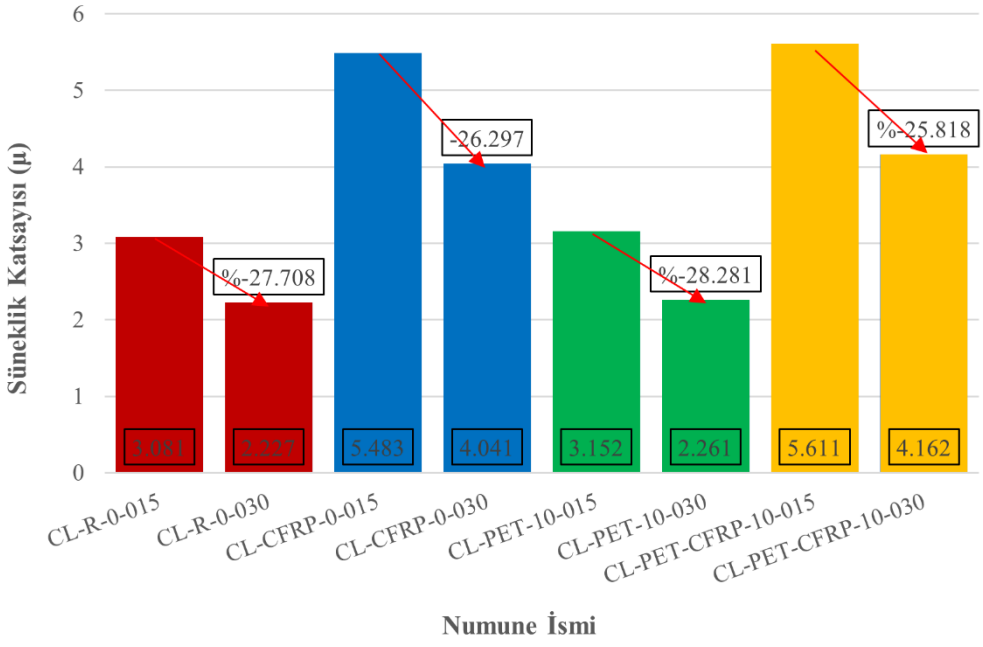
Eksenel yük düzeyi $0.15f_{ck}A_c$ olan, betonunda PET ikamesi bulunan ve karbon lifli polimer sargı ile sarılmış kolon numunesinin (CL-PET-CFRP-10-015) eksenel yük düzeyinin $0.30f_{ck}A_c$ olarak artırılması (CL-PET-CFRP-10-030) sonucunda numunenin taşıdığı maksimum yük değeri 178.863 kN değerinden %11.438 artarak 199.321 kN değerine erişmiştir. Bununla birlikte süneklik katsayısı değeri 5.611 değerinden %25.818 düşüş göstererek 4.162 değerine düşmüştür.

Eksenel yük düzeyine göre birbirinden farklılaşan numunelerin taşıdıkları maksimum yüklerin yüzdesel olarak artış veya azalışları Şekil 7.18'de verilmiştir.



Şekil 7.18. Maksimum yük değerlerine eksenel yük düzeyinin etkisi.

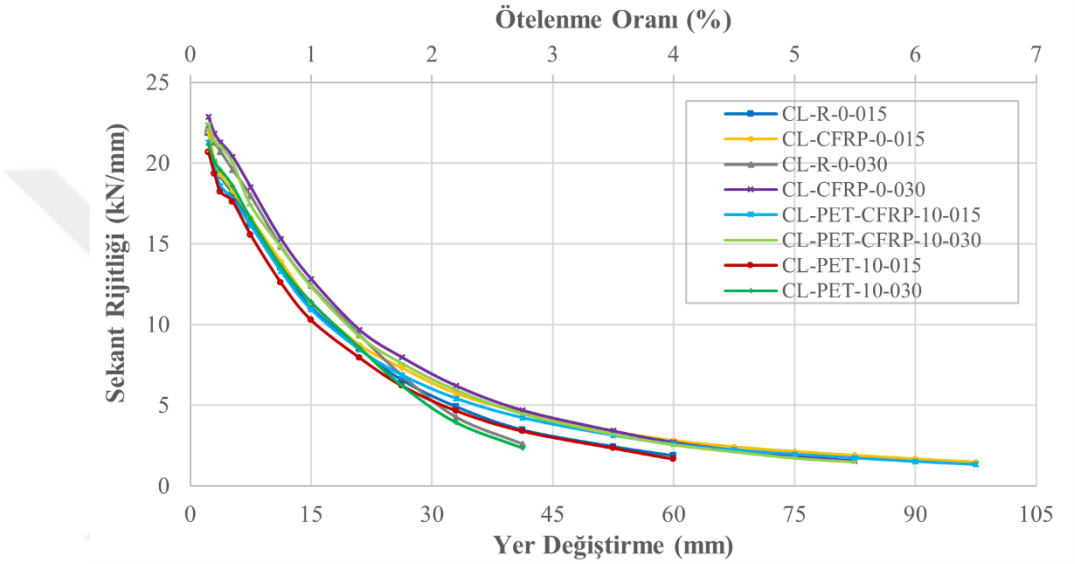
Eksenel yük düzeyine göre birbirinden farklılaşan numunelerin süneklik katsayılarının yüzdesel olarak artış veya azalışları Şekil 7.19'da verilmiştir.



Şekil 7.19. Süneklik katsayısı değerlerine eksenel yük düzeyinin etkisi.

7.2. Rijitlik Değerlerinin Karşılaştırılması

Birbirlerinden PET ikamesinin varlığına, karbon lifli polimer sargının kullanımına ve eksenel yük değerine göre farklılaşan numuneler, akma rijitlik değerleri (K_y), nihai rijitlik değerleri (K_u) ve rijitlik katsayısı değerleri (μ_K) açısından karşılaştırılmıştır. Ayrıca numunelerin sekant rijitlikleri ve rijitlik oranları açısından farklılıkları grafikler aracılığıyla toplu şekilde Şekil 7.20'de verilmiştir. Daha detaylı karşılaştırmalar bölümün ilerleyen kısımlarında yapılmıştır.



Şekil 7.20. Tüm kolon numunelerinin sekant rijitlikleri.

7.2.1. PET ikamesinin varlığına göre rijitlik değerleri

Betonarme kolonların betonunda PET ikamesinin yapılması durumunda numunelerin akma rijitlik değerleri, nihai rijitlik değerleri ve rijitlik katsayısı değerlerindeki artışlar veya azalışlar yüzdesel olarak hesaplanmıştır. Tablo 7.4'te değerlerdeki artışlar veya azalışlar toplu şekilde verilmiştir.

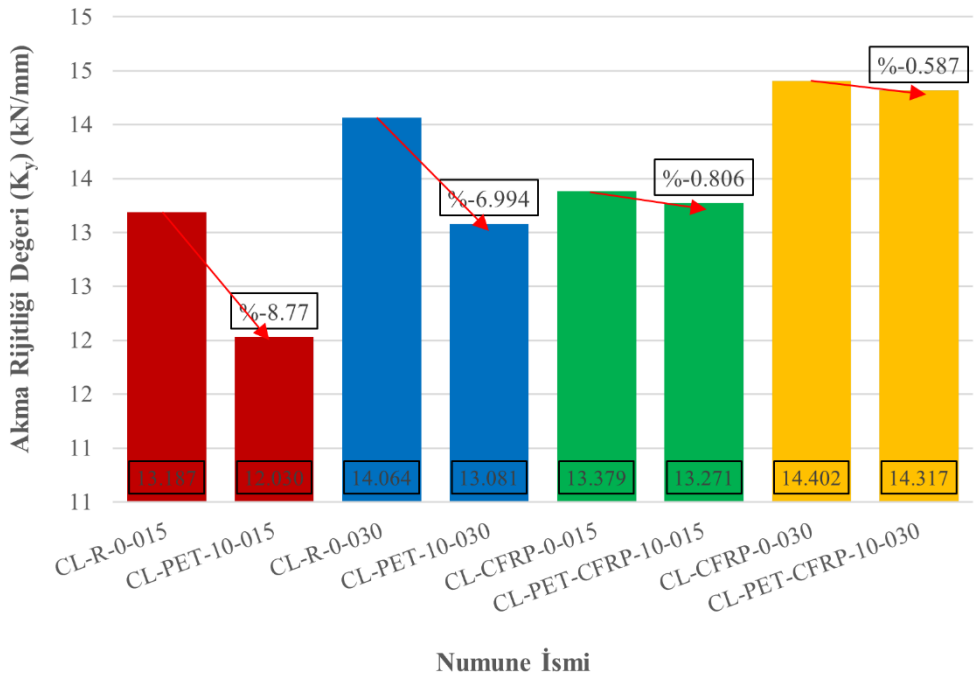
Tablo 7.4. Rijitlik değerlerine PET ikamesinin etkisi.

Numune ismi	Akma rijitlik değeri (K_y) (kN/mm)	Yüzdesel artış (%)	Nihai rijitlik değeri (K_u) (kN/mm)	Yüzdesel artış (%)	Rijitlik katsayısı (K_u/K_y) (μ_K)	Yüzdesel artış (%)
CL-R-0-015	13.187		4.160		0.315	
CL-PET-10-015	12.030	-8.770	3.675	-11.638	0.306	-3.144
CL-R-0-030	14.064		5.936		0.422	
CL-PET-10-030	13.081	-6.994	5.472	-7.811	0.418	-0.878
CL-CFRP-0-015	13.379		2.369		0.177	
CL-PET-CFRP-10-015	13.271	-0.806	2.339	-1.241	0.176	-0.438
CL-CFRP-0-030	14.402		3.414		0.237	
CL-PET-CFRP-10-030	14.317	-0.587	3.371	-1.276	0.235	-0.692

CL-R-0-015 numunesinin betonunda PET ikamesinin yapılması akma rijitliğini %8.770, nihai rijitliğini %11.638, rijitlik katsayısını %3.144 oranında düşürmüştür. CL-R-0-030 numunesinin betonunda PET ikamesinin yapılması akma rijitliğini %6.994, nihai rijitliğini %7.811, rijitlik katsayısını %0.878 oranında düşürmüştür. CL-CFRP-10-015 numunesinin betonunda PET ikamesinin yapılması akma rijitliğini %0.806, nihai rijitliğini %1.241, rijitlik katsayısını %0.438 oranında düşürmüştür. CL-CFRP-10-030 numunesinin betonunda PET ikamesinin yapılması akma rijitliğini %0.587, nihai rijitliğini %1.276, rijitlik katsayısını %0.692 oranında düşürmüştür.

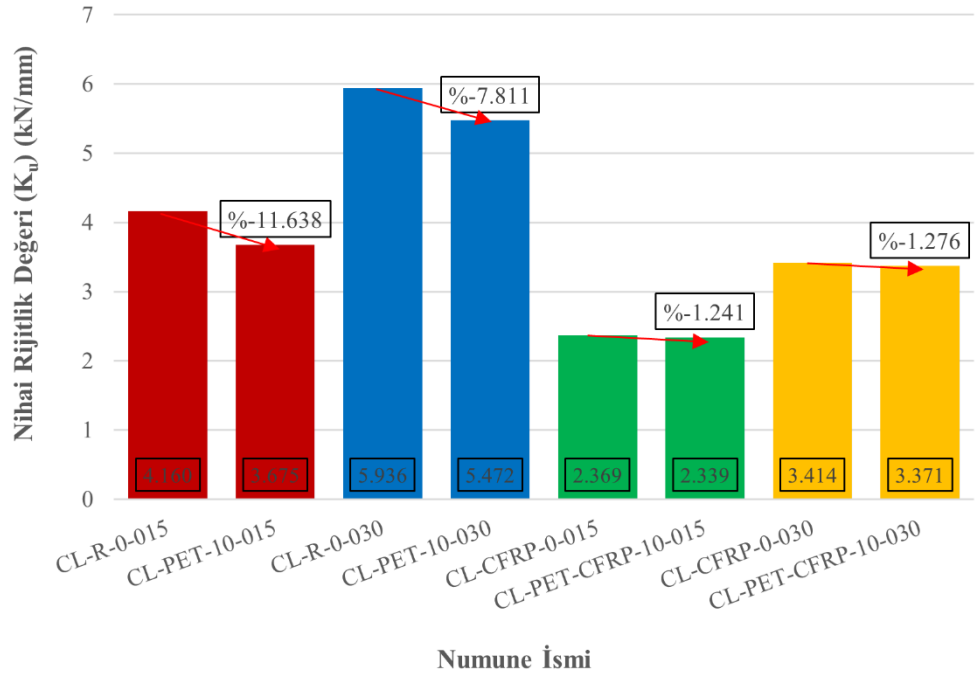
Tüm kolon numunelerinde PET ikamesi yapılması sonucunda numunelerin başlangıç rijitlik değerlerinde, nihai rijitlik değerlerinde ve rijitlik katsayısı değerlerinde düşüşler gözlenmiştir.

PET ikamesinin varlığına göre birbirinden farklılaşan numunelerin akma rijitlik değerlerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Şekil 7.21'de verilmiştir.



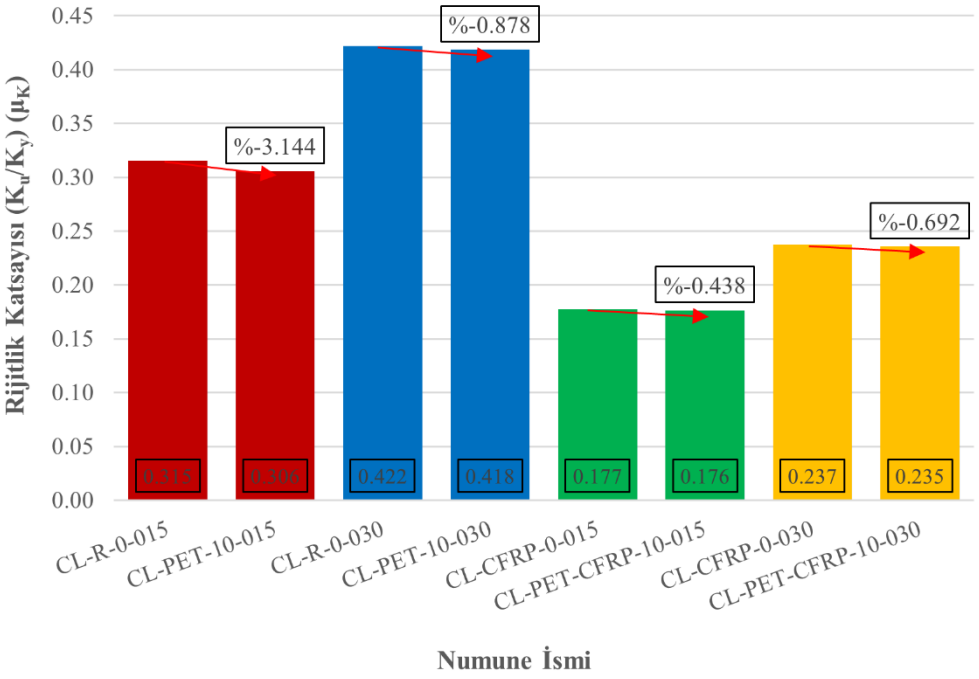
Şekil 7.21. Akma rijitliği değerlerine PET ikamesinin etkisi.

PET ikamesinin varlığına göre birbirinden farklılaşan numunelerin nihai rijitlik değerlerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Şekil 7.22'de verilmiştir.



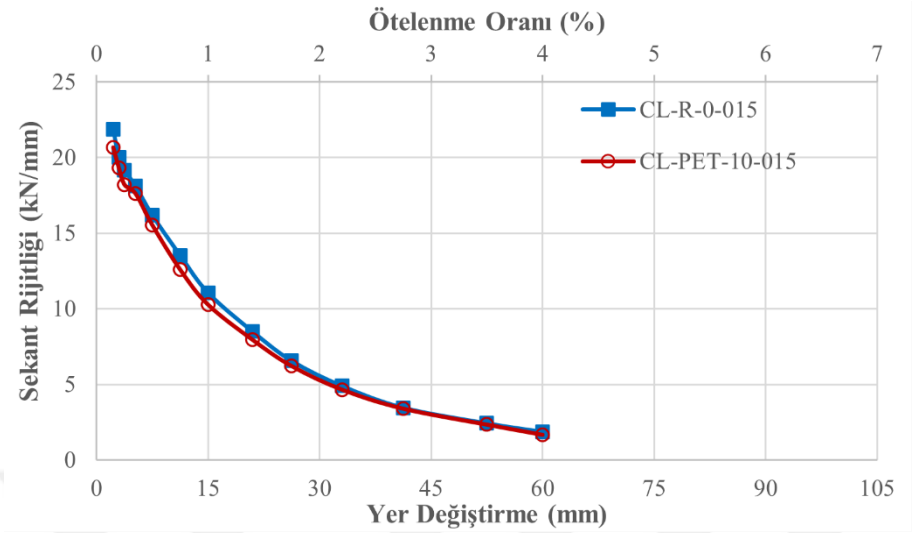
Şekil 7.22. Nihai rijitlik değerlerine PET ikamesinin etkisi.

PET ikamesinin varlığına göre birbirinden farklılaşan numunelerin rijitlik katsayısı değerlerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Şekil 7.23'te verilmiştir.



Şekil 7.23. Rijitlik katsayısı değerlerine PET ikamesinin etkisi.

PET ikamesinin varlığına göre birbirinden farklılaşan CL-R-0-015 ve CL-PET-10-015 numunelerinin sekant rijitlikleri Şekil 7.24'te verilmiştir.



Şekil 7.24. CL-R-0-015 ve CL-PET-10-015 sekant rijitliği karşılaştırması.

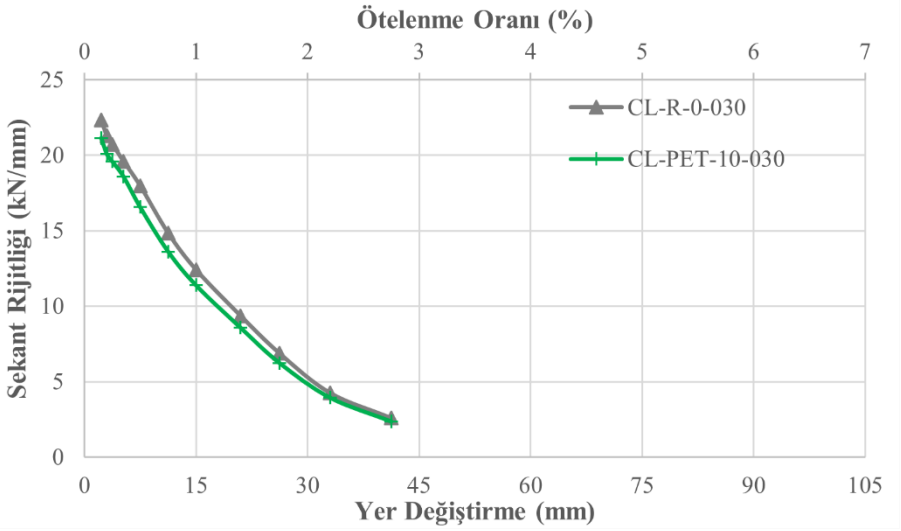
Sekant rijitliklerinde oluşan yüzdesel artış veya azalışlar Tablo 7.5'te verilmiştir.

Tablo 7.5. CL-R-0-015 ve CL-PET-10-015 sekant rijitliği farklılıkları.

Ötelenme oranı (%)	CL-R-0-015 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	CL-PET-10-015 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	Yüzdesel artış (%)
0.15	21.867	20.659	-5.526
0.2	20.005	19.310	-3.476
0.25	19.169	18.202	-5.048
0.35	18.119	17.605	-2.834
0.5	16.193	15.533	-4.072
0.75	13.531	12.584	-7.001
1	11.058	10.268	-7.146
1.4	8.490	7.940	-6.489
1.75	6.552	6.208	-5.247
2.2	4.898	4.653	-5.009
2.75	3.456	3.392	-1.860
3.5	2.423	2.338	-3.522
4	1.858	1.663	-10.526

CL-R-0-015 ve CL-PET-10-015 numunelerinin %0.15 ötelenme oranına karşılık gelen birinci sekant rijitlikleri arasında %5.526 fark oluşmuştur. CL-R-0-015 numunesine PET ikamesinin gerçekleştirilmesi sekant rijitliklerini %1.860 ile %10.526 oranları arasında zarara uğratmıştır.

PET ikamesinin varlığına göre birbirinden farklılaşan CL-R-0-030 ve CL-PET-10-030 numunelerinin sekant rijitlikleri Şekil 7.25'te verilmiştir.



Şekil 7.25. CL-R-0-030 ve CL-PET-10-030 sekant rijitliği karşılaştırması.

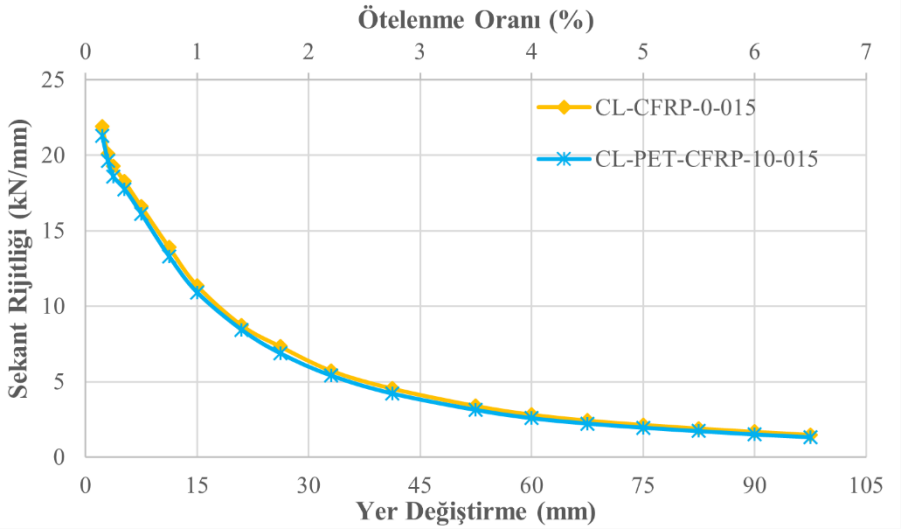
Sekant rijitliklerinde oluşan yüzdesel artış veya azalışlar Tablo 7.6'da verilmiştir.

Tablo 7.6. CL-R-0-030 ve CL-PET-10-030 sekant rijitliği farklılıkları.

Ötelenme oranı (%)	CL-R-0-030 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	CL-PET-10-030 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	Yüzdesel artış (%)
0.15	22.310	21.145	-5.223
0.2	21.271	20.090	-5.555
0.25	20.710	19.584	-5.436
0.35	19.581	18.587	-5.075
0.5	17.949	16.556	-7.764
0.75	14.836	13.615	-8.228
1	12.407	11.382	-8.263
1.4	9.356	8.561	-8.498
1.75	6.863	6.215	-9.439
2.2	4.257	3.929	-7.700
2.75	2.595	2.348	-9.528

CL-R-0-030 ve CL-PET-10-030 numunelerinin %0.15 ötelenme oranına karşılık gelen birinci sekant rijitlikleri arasında %5.223 fark oluşmuştur. CL-R-0-030 numunesine PET ikamesinin gerçekleştirilmesi sekant rijitliklerini %5.075 ile %9.528 oranları arasında zarara uğratmıştır.

PET ikamesinin varlığına göre birbirinden farklılaşan CL-CFRP-0-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 numunelerinin sekant rijitlikleri Şekil 7.26'da verilmiştir.



Şekil 7.26. CL-CFRP-0-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 sekant rijitliği karşılaştırması.

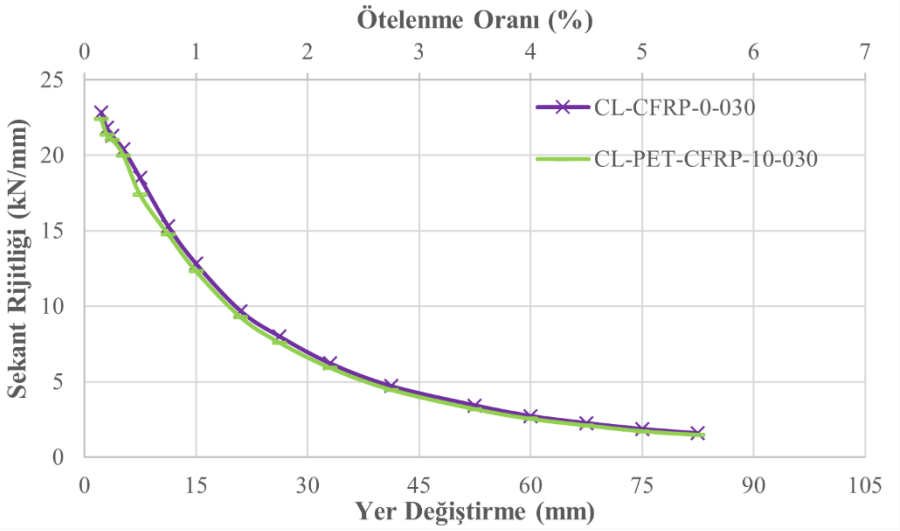
Sekant rijitliklerinde oluşan yüzdesel artış veya azalışlar Tablo 7.7'de verilmiştir.

Tablo 7.7. CL-CFRP-0-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 sekant rijitliği farklılıkları.

Ötelenme oranı (%)	CL-CFRP-0-015 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	CL-PET-CFRP-10-015 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	Yüzdesel artış (%)
0.15	21.919	21.266	-2.980
0.2	20.088	19.622	-2.321
0.25	19.287	18.572	-3.708
0.35	18.269	17.747	-2.860
0.5	16.609	16.119	-2.948
0.75	13.895	13.288	-4.365
1	11.367	10.911	-4.007
1.4	8.736	8.433	-3.468
1.75	7.320	6.859	-6.293
2.2	5.735	5.405	-5.756
2.75	4.547	4.212	-7.353
3.5	3.394	3.125	-7.943
4	2.819	2.578	-8.529
4.5	2.428	2.219	-8.593
5	2.142	1.949	-8.968
5.5	1.899	1.719	-9.510
6	1.683	1.502	-10.766
6.5	1.484	1.317	-11.247

CL-CFRP-0-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 numunelerinin %0.15 ötelenme oranına karşılık gelen birinci sekant rijitlikleri arasında %2.980 fark oluşmuştur. CL-CFRP-0-015 numunesine PET ikamesinin gerçekleştirilmesi sekant rijitliklerini %2.321 ile %11.247 oranları arasında zarara uğratmıştır.

PET ikamesinin varlığına göre birbirinden farklılaşan CL-CFRP-0-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 numunelerinin sekant rijitlikleri Şekil 7.27'de verilmiştir.



Şekil 7.27. CL-CFRP-0-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 sekant rijitliği karşılaştırması.

Sekant rijitliklerinde oluşan yüzdesel artış veya azalışlar Tablo 7.8'de verilmiştir.

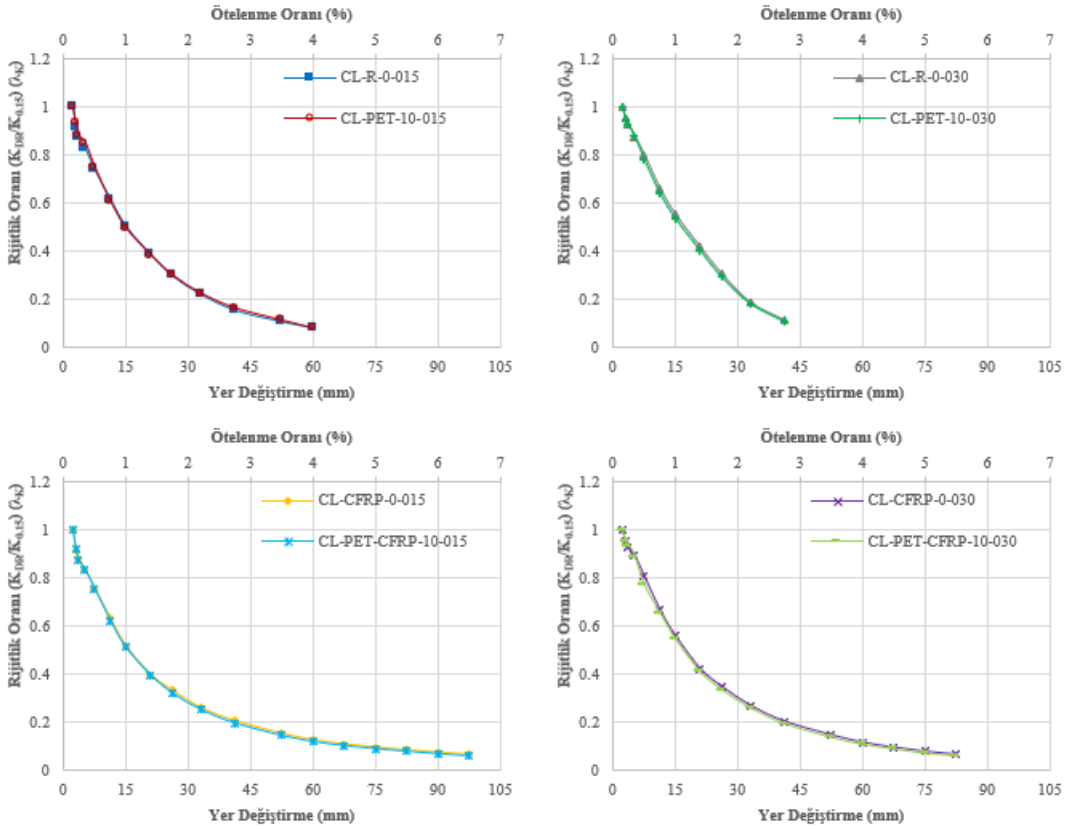
Tablo 7.8. CL-CFRP-0-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 sekant rijitliği farklılıkları.

Ötelenme oranı (%)	CL-CFRP-0-030 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	CL-PET-CFRP-10-030 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	Yüzdesel artış (%)
0.15	22.845	22.414	-1.888
0.2	21.815	21.344	-2.158
0.25	21.285	21.017	-1.257
0.35	20.386	19.988	-1.955
0.5	18.490	17.363	-6.094
0.75	15.305	14.759	-3.569
1	12.815	12.322	-3.846
1.4	9.674	9.267	-4.211
1.75	7.983	7.579	-5.053
2.2	6.212	5.920	-4.691
2.75	4.696	4.459	-5.053
3.5	3.418	3.182	-6.890
4	2.713	2.535	-6.537
4.5	2.238	2.101	-6.164
5	1.850	1.711	-7.528
5.5	1.568	1.469	-6.315

CL-CFRP-0-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 numunelerinin %0.15 ötelenme oranına karşılık gelen birinci sekant rijitlikleri arasında %1.888 fark oluşmuştur. CL-CFRP-0-030 numunesine PET ikamesinin gerçekleştirilmesi sekant rijitliklerini %1.257 ile %7.528 oranları arasında zarara uğratmıştır.

Tüm betonarme kolon numunelerinde PET ikamesinin yapılması, her ötelenme oranı için numunelerin sahip olduğu sekant rijitlik değerlerinde %1.257 ile %11.247 arasında değişen oranlarda azalmalara neden olmuştur. Bu azalmalar bazı ötelenme oranları için %11.247 değerine çıkabilmiş olsa bile genel olarak sekant rijitlik değerlerinde ciddi farklılıklar gözlenmemiştir.

Betonarme kolon numunelerin her ötelenme oranındaki rijitlik azalmasını temsil eden sekant rijitlik oranları (λ_K) hesaplanmış ve Bölüm 6 içerisinde her kolon için ayrı ayrı verilmiştir. Kolonların betonunda PET ikamesinin yapılması durumunda numunenin sahip olduğu sekant rijitlik oranlarındaki değişimin grafikleri Şekil 7.28'de verilmiştir.



Şekil 7.28. Sekant rijitlik oranına PET ikamesinin etkisi.

Sekant rijitlik oranlarının PET ikamesinin varlığına göre karşılaştırılması, her ötelenme oranı için sekant rijitlik değerlerinin verildiği karşılaştırma grafikleri ile benzerlik göstermektedir. Numunelerin sekant rijitlik oranı değerlerinin %0.5 ötelenme oranına kadar yavaş bir şekilde azaldığı %0.5 ile %2.75 arasında hızlı bir şekilde azaldığı ve %2.75 ötelenme oranından sonra çok yavaş bir şekilde azaldığı görülmüştür. PET ikamesi yapılmayan numuneler ile yapılanlar arasında ciddi farklılıkların bulunmadı genel benzerliklerin yüksek olduğu tespit edilmiştir.

7.2.2. Karbon lifli polimer sargı kullanımına göre rijitlik değerleri

Betonarme kolonların etrafında karbon lifli polimer sargı kullanılması durumunda numunelerin akma rijitlik değerleri, nihai rijitlik değerleri ve rijitlik katsayısı değerlerindeki artışlar veya azalışlar yüzdesel olarak hesaplanmıştır. Tablo 7.9'da değerlerdeki artışlar veya azalışlar toplu şekilde verilmiştir.

Tablo 7.9. Rijitlik değerlerine karbon lifli polimer sargının etkisi.

Numune ismi	Akma rijitlik değeri (K_y) (kN/mm)	Yüzdesel artış (%)	Nihai rijitlik değeri (K_u) (kN/mm)	Yüzdesel artış (%)	Rijitlik katsayısı (K_u/K_y) (μ_K)	Yüzdesel artış (%)
CL-R-0-015	13.187		4.160		0.315	
CL-CFRP-0-015	13.379	1.455	2.369	-43.053	0.177	-43.870
CL-R-0-030	14.064		5.936		0.422	
CL-CFRP-0-030	14.402	2.398	3.414	-42.481	0.237	-43.828
CL-PET-10-015	12.030		3.675		0.306	
CL-PET-CFRP-10-015	13.271	10.311	2.339	-36.353	0.176	-42.302
CL-PET-10-030	13.081		5.472		0.418	
CL-PET-CFRP-10-030	14.317	9.452	3.371	-38.404	0.235	-43.723

CL-R-0-015 numunesinin etrafında karbon lifli polimer sargı kullanılması akma rijitlik değerini %1.455 artırmış, nihai rijitlik değerini %43.053 düşürmüş ve rijitlik katsayısı değerini %43.870 düşürmüştür.

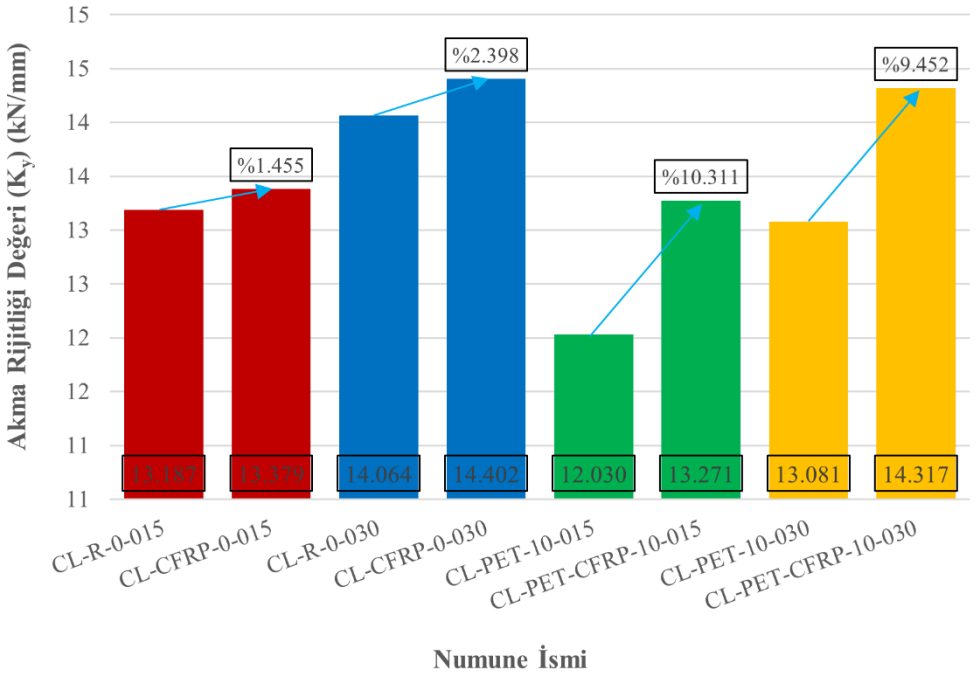
CL-R-0-030 numunesinin etrafında karbon lifli polimer sargı kullanılması akma rijitlik değerini %2.398 artırmış, nihai rijitlik değerini %42.481 düşürmüş ve rijitlik katsayısı değerini %43.828 düşürmüştür.

CL-PET-10-015 numunesinin etrafında karbon lifli polimer sargı kullanılması akma rijitlik değerini %10.311 artırmış, nihai rijitlik değerini %36.353 düşürmüş ve rijitlik katsayısı değerini %42.302 düşürmüştür.

CL-PET-10-030 numunesinin etrafında karbon lifli polimer sargı kullanılması akma rijitlik değerini %9.452 artırmış, nihai rijitlik değerini %38.404 düşürmüş ve rijitlik katsayısı değerini %43.723 düşürmüştür.

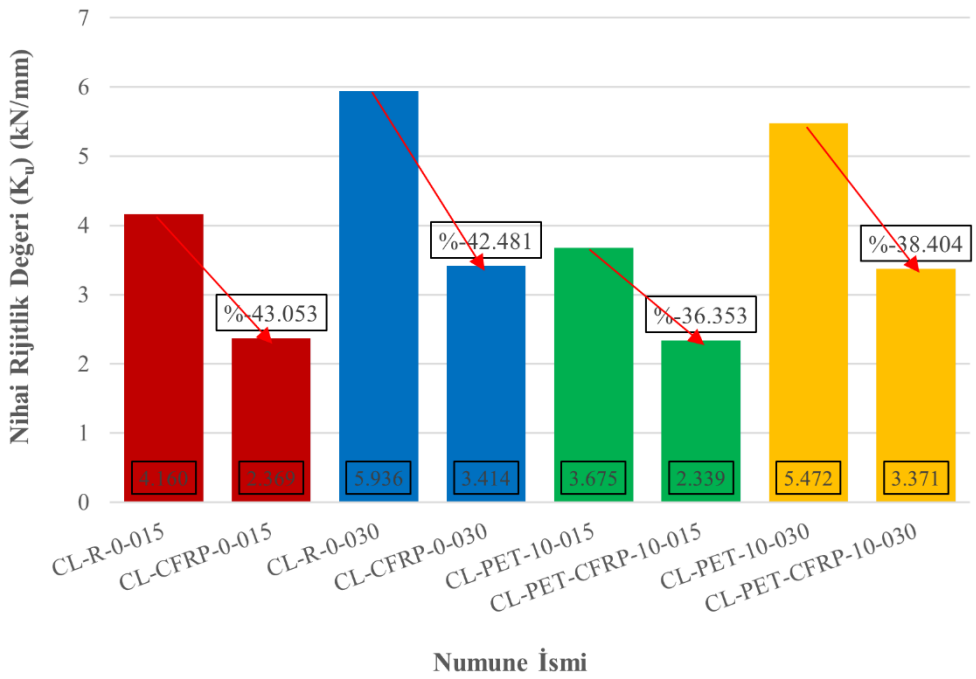
Tüm kolon numunelerinde karbon lifli polimer sargı kullanılması sonucunda numunelerin başlangıç rijitlik değerlerinde artışlar, nihai rijitlik değerlerinde ve rijitlik katsayısı değerlerinde düşüşler gözlenmiştir. Başlangıç rijitlik değerlerinde CL-PET-CFRP-10-015 numunesi %10.311 artış göstererek en çok artış gösteren, CL-CFRP-0-015 numunesi %1.455 artış göstererek en az artış gösteren numune olmuştur. Nihai rijitlik değerlerinde ise CL-CFRP-0-015 numunesi %43.053 düşüş göstererek en çok düşüş gösteren, CL-PET-CFRP-10-015 numunesi %36.353 düşüş göstererek en az düşüş gösteren numune olmuştur. Bununla birlikte rijitlik katsayısı değerlerinde CL-CFRP-0-015 numunesi %43.870 düşüş göstererek en çok düşüş gösteren, CL-PET-CFRP-10-015 numunesi %42.302 düşüş göstererek en az düşüş gösteren numune olmuştur.

Karbon lifli polimer sargı kullanımına göre birbirinden farklılaşan numunelerin akma rijitlik değerlerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Şekil 7.29'da verilmiştir.



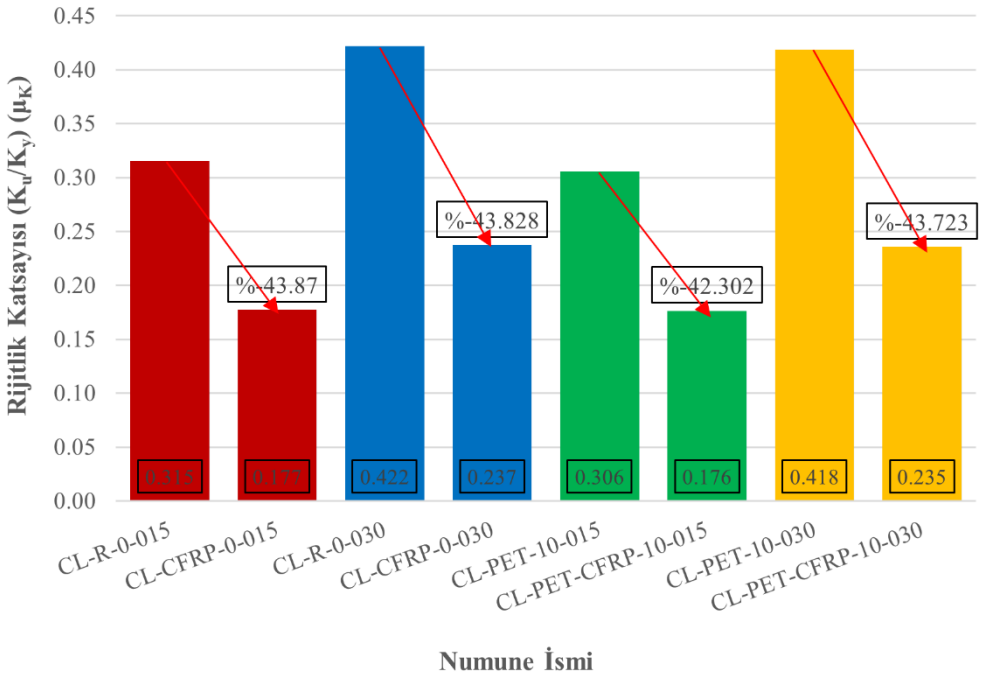
Şekil 7.29. Akma rijitliği değerlerine karbon lifli polimer sargının etkisi.

Karbon lifli polimer sargı kullanımına göre birbirinden farklılaşan numunelerin nihai rijitlik değerlerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Şekil 7.30'da verilmiştir.



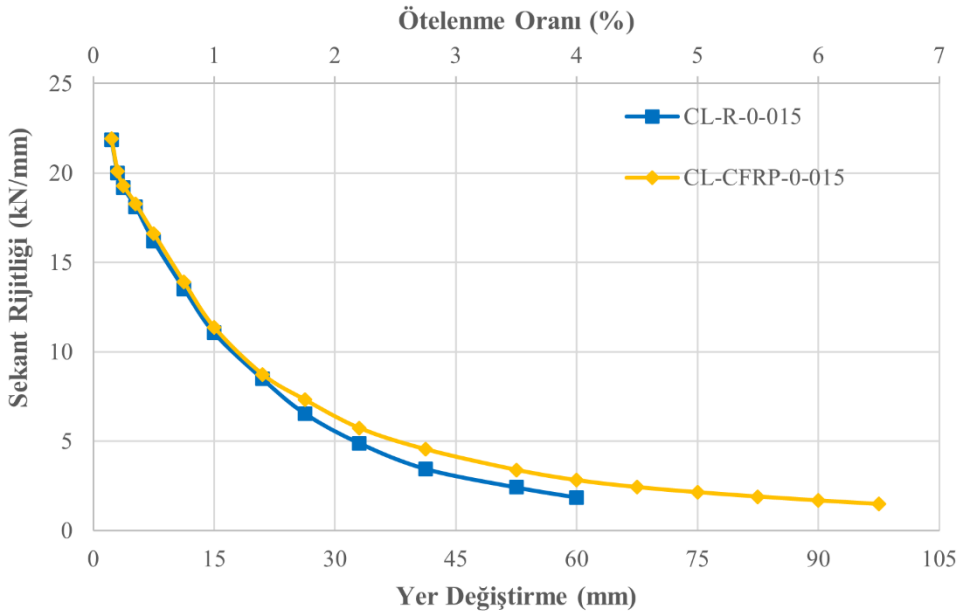
Şekil 7.30. Nihai rijitlik değerlerine karbon lifli polimer sargının etkisi.

Karbon lifli polimer sargı kullanımına göre birbirinden farklılaşan numunelerin rijitlik katsayısı değerlerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Şekil 7.31'de verilmiştir.



Şekil 7.31. Rijitlik katsayısı değerlerine karbon lifli polimer sargının etkisi.

Karbon lifli polimer sargı kullanımına göre birbirinden farklılaşan CL-R-0-015 ve CL-CFRP-0-015 numunelerinin sekant rijitlikleri Şekil 7.32'de verilmiştir.



Şekil 7.32. CL-R-0-015 ve CL-CFRP-0-015 sekant rijitliği karşılaştırması.

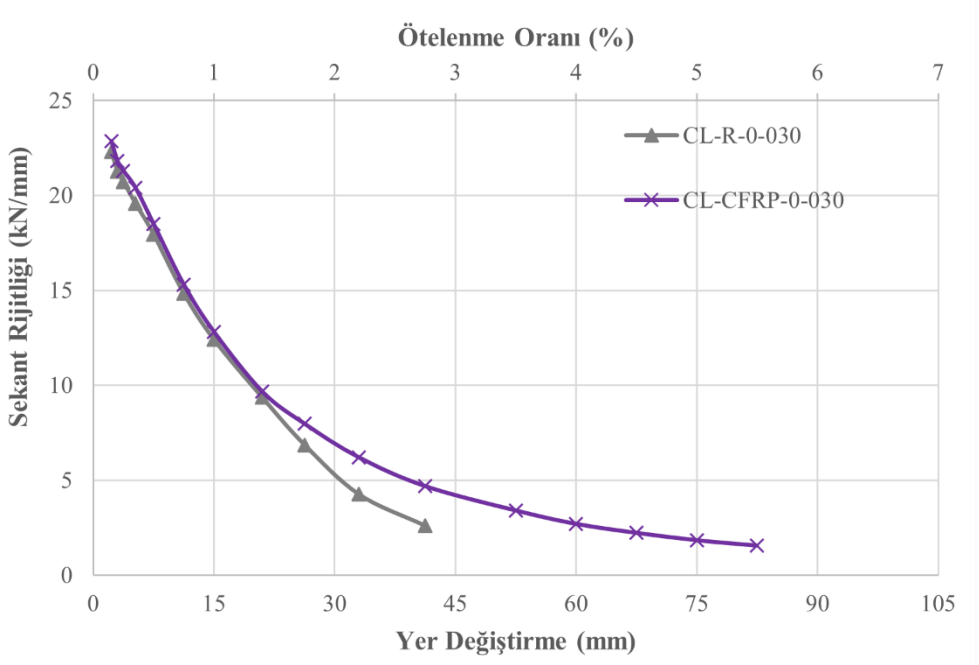
Sekant rijitliğinde oluşan yüzdesel artış veya azalışlar Tablo 7.10'da verilmiştir.

Tablo 7.10. CL-R-0-015 ve CL-CFRP-0-015 sekant rijitliği farklılıkları.

Ötelenme oranı (%)	CL-R-0-015 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	CL-CFRP-0-015 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	Yüzdesel artış (%)
0.15	21.867	21.919	0.237
0.2	20.005	20.088	0.414
0.25	19.169	19.287	0.612
0.35	18.119	18.269	0.831
0.5	16.193	16.609	2.570
0.75	13.531	13.895	2.685
1	11.058	11.367	2.792
1.4	8.490	8.736	2.894
1.75	6.552	7.320	11.713
2.2	4.898	5.735	17.080
2.75	3.456	4.547	31.563
3.5	2.423	3.394	40.103
4	1.858	2.819	51.688
4.5	-	2.428	-
5	-	2.142	-
5.5	-	1.899	-
6	-	1.683	-
6.5	-	1.484	-

CL-R-0-015 ve CL-CFRP-0-015 numunelerinin %0.15 ötelenme oranına karşılık gelen birinci sekant rijitlikleri arasında %0.237 fark oluşmuştur. CL-R-0-015 numunesinin etrafında karbon lifli polimer sargı kullanılması sekant rijitliklerini %0.237 ile %51.688 oranları arasında artırmıştır.

Karbon lifli polimer sargı kullanımına göre birbirinden farklılaşan CL-R-0-030 ve CL-CFRP-0-030 numunelerinin sekant rijitlikleri Şekil 7.33'te verilmiştir.



Şekil 7.33. CL-R-0-030 ve CL-CFRP-0-030 sekant rijitliği karşılaştırması.

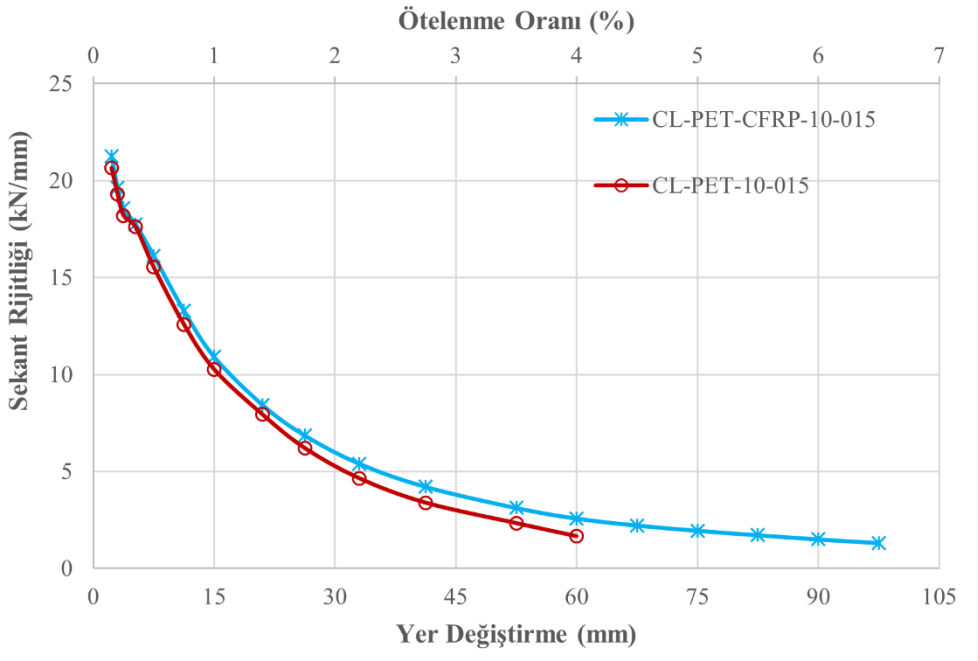
Sekant rijitliğinde oluşan yüzdesel artış veya azalışlar Tablo 7.11'de verilmiştir.

Tablo 7.11. CL-R-0-030 ve CL-CFRP-0-030 sekant rijitliği farklılıkları.

Ötelenme oranı (%)	CL-R-0-030 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	CL-CFRP-0-030 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	Yüzdesel artış (%)
0.15	22.310	22.845	2.398
0.2	21.271	21.815	2.556
0.25	20.710	21.285	2.778
0.35	19.581	20.386	4.114
0.5	17.949	18.490	3.014
0.75	14.836	15.305	3.165
1	12.407	12.815	3.285
1.4	9.356	9.674	3.402
1.75	6.863	7.983	16.321
2.2	4.257	6.212	45.917
2.75	2.595	4.696	80.939
3.5	-	3.418	-
4	-	2.713	-
4.5	-	2.238	-
5	-	1.850	-
5.5	-	1.568	-

CL-R-0-030 ve CL-CFRP-0-030 numunelerinin %0.15 ötelenme oranına karşılık gelen birinci sekant rijitlikleri arasında %2.398 fark oluşmuştur. CL-R-0-030 numunesinin etrafında karbon lifli polimer sargı kullanılması sekant rijitliklerini %2.398 ile %80.939 oranları arasında artırmıştır.

Karbon lifli polimer sargı kullanımına göre birbirinden farklılaşan CL-PET-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 numunelerinin sekant rijitlikleri Şekil 7.34'te verilmiştir.



Şekil 7.34. CL-PET-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 sekant rijitliği karşılaştırması.

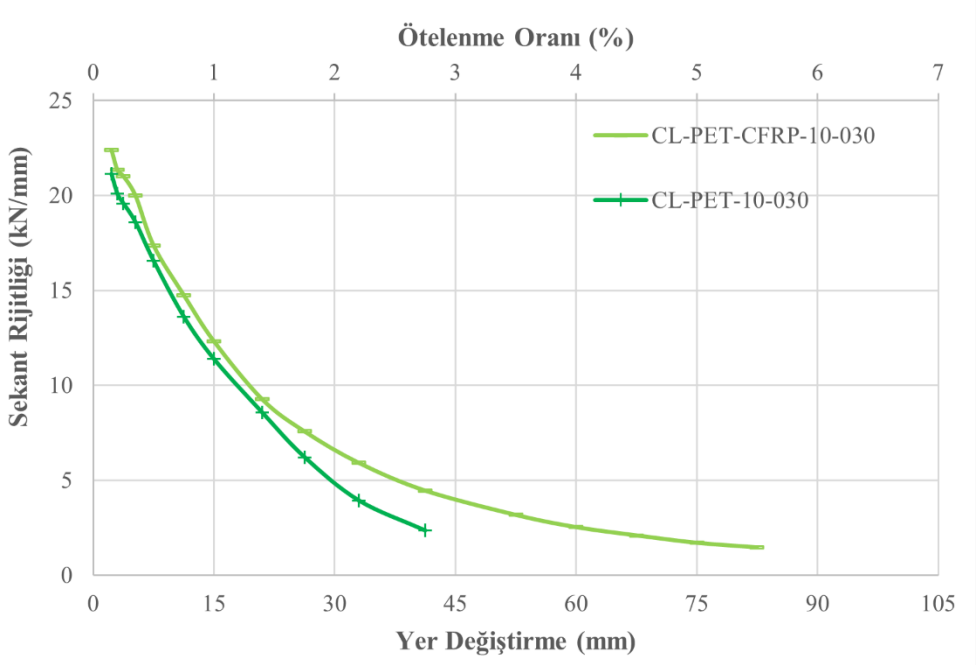
Sekant rijitliğinde oluşan yüzdesel artış veya azalışlar Tablo 7.12'de verilmiştir.

Tablo 7.12. CL-PET-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 sekant rijitliği farklılıkları.

Ötelenme oranı (%)	CL-PET-10-015 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	CL-PET-CFRP-10-015 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	Yüzdesel artış (%)
0.15	20.659	21.266	2.939
0.2	19.310	19.622	1.616
0.25	18.202	18.572	2.032
0.35	17.605	17.747	0.804
0.5	15.533	16.119	3.772
0.75	12.584	13.288	5.595
1	10.268	10.911	6.266
1.4	7.940	8.433	6.218
1.75	6.208	6.859	10.480
2.2	4.653	5.405	16.159
2.75	3.392	4.212	24.198
3.5	2.338	3.125	33.683
4	1.663	2.578	55.074
4.5	-	2.219	-
5	-	1.949	-
5.5	-	1.719	-
6	-	1.502	-
6.5	-	1.317	-

CL-PET-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 numunelerinin %0.15 ötelenme oranına karşılık gelen birinci sekant rijitlikleri arasında %2.939 fark oluşmuştur. CL-PET-10-015 numunesinin etrafında karbon lifli polimer sargı kullanılması sekant rijitliklerini %0.804 ile %55.074 oranları arasında artırmıştır.

Karbon lifli polimer sargı kullanımına göre birbirinden farklılaşan CL-PET-10-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 numunelerinin sekant rijitlikleri Şekil 7.35'te verilmiştir.



Şekil 7.35. CL-PET-10-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 sekant rijitliği karşılaştırması.

Sekant rijitliğinde oluşan yüzdesel artış veya azalışlar Tablo 7.13'te verilmiştir.

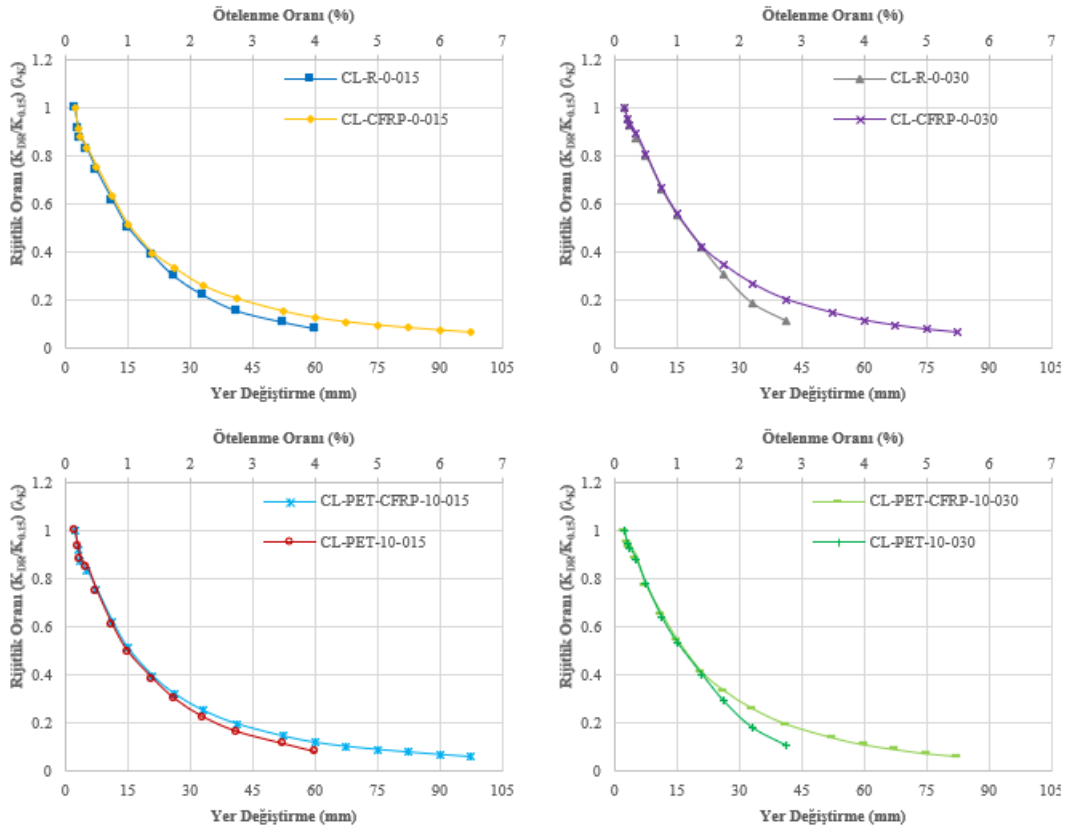
Tablo 7.13. CL-PET-10-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 sekant rijitliği farklılıkları.

Ötelenme oranı (%)	CL-PET-10-030 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	CL-PET-CFRP-10-030 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	Yüzdesel artış (%)
0.15	21.145	22.414	6.000
0.2	20.090	21.344	6.244
0.25	19.584	21.017	7.319
0.35	18.587	19.988	7.536
0.5	16.556	17.363	4.879
0.75	13.615	14.759	8.402
1	11.382	12.322	8.258
1.4	8.561	9.267	8.246
1.75	6.215	7.579	21.954
2.2	3.929	5.920	50.674
2.75	2.348	4.459	89.889
3.5	-	3.182	-
4	-	2.535	-
4.5	-	2.101	-
5	-	1.711	-
5.5	-	1.469	-

CL-PET-10-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 numunelerinin %0.15 ötelenme oranına karşılık gelen birinci sekant rijitlikleri arasında %6.000 fark oluşmuştur. CL-PET-10-030 numunesinin etrafında karbon lifli polimer sargı kullanılması sekant rijitliklerini %6.000 ile %89.889 oranları arasında artırmıştır.

Tüm betonarme kolon numunelerinde karbon lifli polimer sargı yapılması, her ötelenme oranı için numunelerin sahip olduğu sekant rijitlik değerlerinde %0.237 ile %89.889 arasında değişen oranlarda artışlara neden olmuştur. Bu artışlar karbon lifli polimer sargı kullanılmamış numunelerin çıkabildikleri maksimum ötelenme oranlarına kadar hesap edilmiştir.

Betonarme kolon numunelerin her ötelenme oranındaki rijitlik azalmasını temsil eden sekant rijitlik oranları (λ_K) hesaplanmış ve Bölüm 6 içerisinde her kolon için ayrı ayrı verilmiştir. Kolonların etrafında karbon lifli polimer sargı kullanılması durumunda numunenin sekant rijitlik oranlarındaki değişimin grafikleri Şekil 7.36'da verilmiştir.



Şekil 7.36. Sekant rijitlik oranına karbon lifli polimer sargının etkisi.

Sekant rijitlik oranlarının karbon lifli polimer sargı varlığına göre karşılaştırılması, sekant rijitlik değerlerinin verildiği karşılaştırma grafikleri ile benzerlik göstermektedir. Numunelerin sekant rijitlik oranı değerlerinin %0.5 ötelenme oranına kadar yavaş, %0.5 ile %2.75 arasında hızlı ve %2.75 ötelenme oranından sonra çok yavaş bir şekilde azaldığı görülmüştür. Karbon lifli polimer sargı kullanılan numunelerin %1.4 ötelenme oranından sonra rijitlik oranlarındaki azalmaların kullanılmayanlara göre daha yavaş azaldığı tespit edilmiştir. Bu nedenle karbon lifli polimer sargının elastik ötesi davranışta etkisini artırdığı sonucuna varılmıştır.

7.2.3. Eksenel yük düzeyine göre rijitlik değerleri

Deneyler esnasında betonarme kolonlara uygulanan eksenel kuvvetin artırılması durumunda numunelerin akma rijitlik değerleri, nihai rijitlik değerleri ve rijitlik katsayısı değerlerindeki artışlar veya azalışlar yüzdesel olarak hesaplanmıştır. Tablo 7.14'te değerlerdeki artışlar veya azalışlar toplu şekilde verilmiştir.

CL-R-0-015 numunesinin eksenel yük düzeyinin artırılması akma rijitlik değerini %6.653, nihai rijitlik değerini %42.697 ve rijitlik katsayısı değerini %33.795 oranında artırmıştır.

CL-CFRP-0-015 numunesinin eksenel yük düzeyinin artırılması akma rijitlik değerini %7.646, nihai rijitlik değerini %44.131 ve rijitlik katsayısı değerini %33.894 oranında artırmıştır.

CL-PET-10-015 numunesinin eksenel yük düzeyinin artırılması akma rijitlik değerini %8.729, nihai rijitlik değerini %48.877 ve rijitlik katsayısı değerini %36.925 oranında artırmıştır.

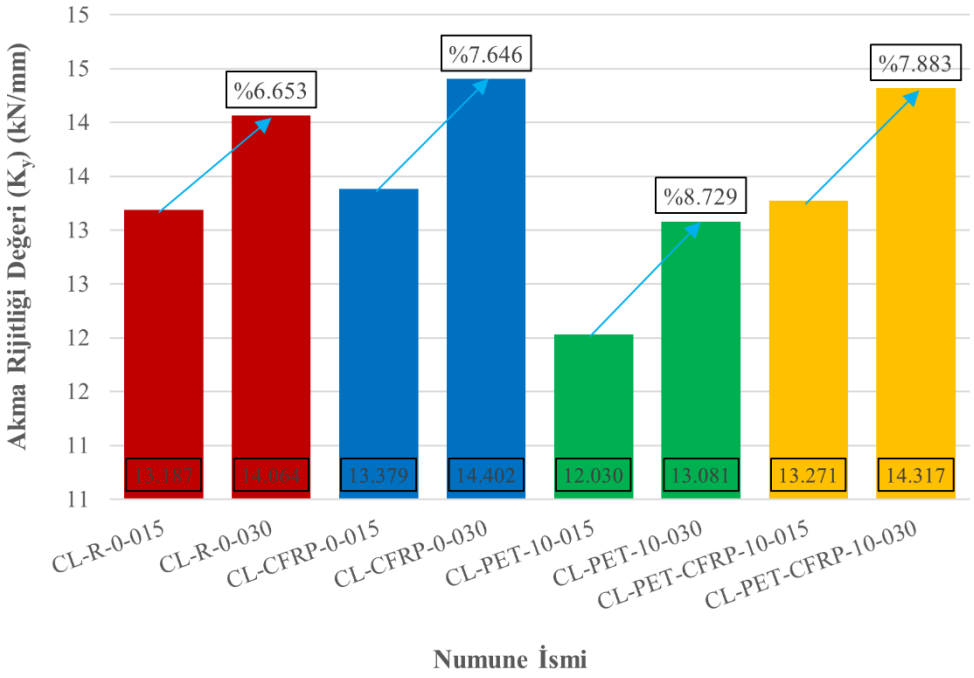
CL-PET-CFRP-10-015 numunesinin eksenel yük düzeyinin artırılması akma rijitlik değerini %7.883, nihai rijitlik değerini %44.080 ve rijitlik katsayısı değerini %33.552 oranında artırmıştır.

Tablo 7.14. Rijitlik değerlerine eksenel yük düzeyinin etkisi.

Numune ismi	Akma rijitlik değeri (K_y) (kN/mm)	Yüzdesel artış (%)	Nihai rijitlik değeri (K_u) (kN/mm)	Yüzdesel artış (%)	Rijitlik katsayısı (K_u/K_y) (μ_K)	Yüzdesel artış (%)
CL-R-0-015	13.187		4.160		0.315	
CL-R-0-030	14.064	6.653	5.936	42.697	0.422	33.795
CL-CFRP-0-015	13.379		2.369		0.177	
CL-CFRP-0-030	14.402	7.646	3.414	44.131	0.237	33.894
CL-PET-10-015	12.030		3.675		0.306	
CL-PET-10-030	13.081	8.729	5.472	48.877	0.418	36.925
CL-PET-CFRP-10-015	13.271		2.339		0.176	
CL-PET-CFRP-10-030	14.317	7.883	3.371	44.080	0.235	33.552

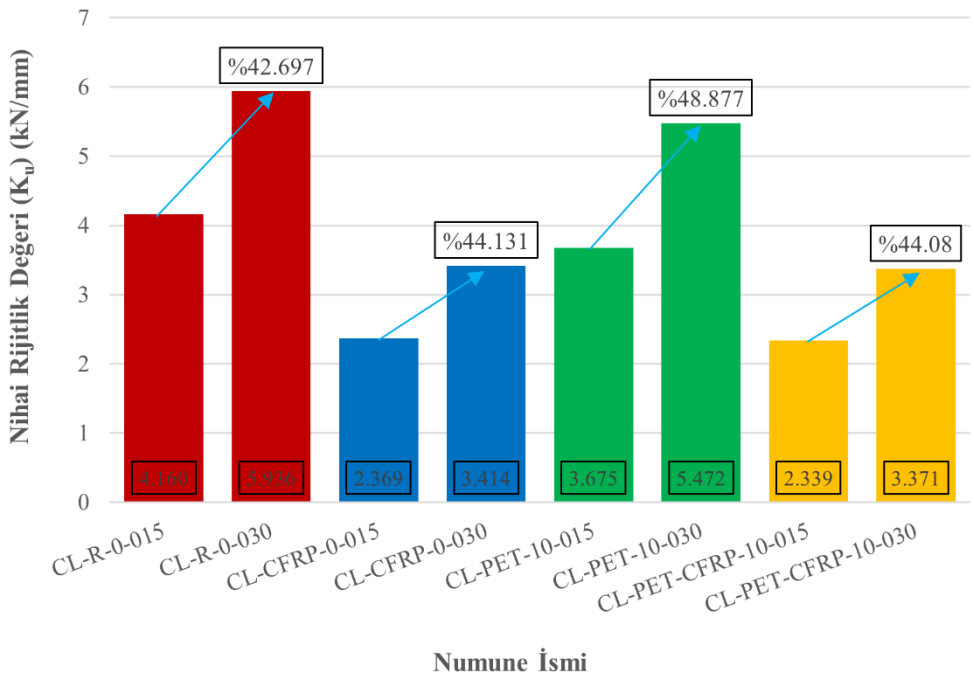
Tüm kolon numunelerinde eksenel yük düzeyinin artırılması sonucunda numunelerin başlangıç rijitlik değerlerinde, nihai rijitlik değerlerinde ve rijitlik katsayısı değerlerinde artışlar gözlenmiştir. Başlangıç rijitlik değerlerinde CL-PET-10-030 numunesi %8.729 artış göstererek en çok artış gösteren, CL-R-0-030 numunesi %6.653 artış göstererek en az artış gösteren numune olmuştur. Nihai rijitlik değerlerinde CL-PET-10-030 numunesi %48.877 artış göstererek en çok artış gösteren, CL-R-0-030 numunesi %42.697 artış göstererek en az artış gösteren numune olmuştur. Bununla birlikte rijitlik katsayısı değerlerinde CL-PET-10-030 numunesi %36.925 artış göstererek en çok artış gösteren, CL-PET-CFRP-10-030 numunesi %33.552 artış göstererek en az artış gösteren numune olmuştur.

Eksenel yük düzeyine göre birbirinden farklılaşan numunelerin akma rijitlik değerlerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Şekil 7.37'de verilmiştir.



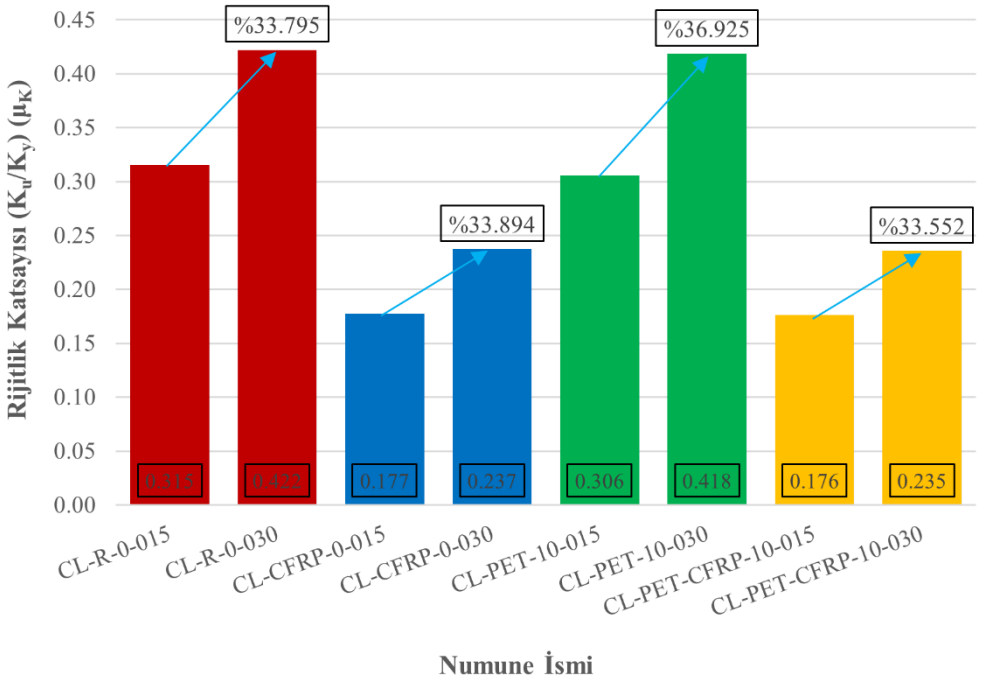
Şekil 7.37. Akma rijitliği değerlerine eksenel yük düzeyinin etkisi.

Eksenel yük düzeyine göre birbirinden farklılaşan numunelerin nihai rijitlik değerlerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Şekil 7.38'de verilmiştir.



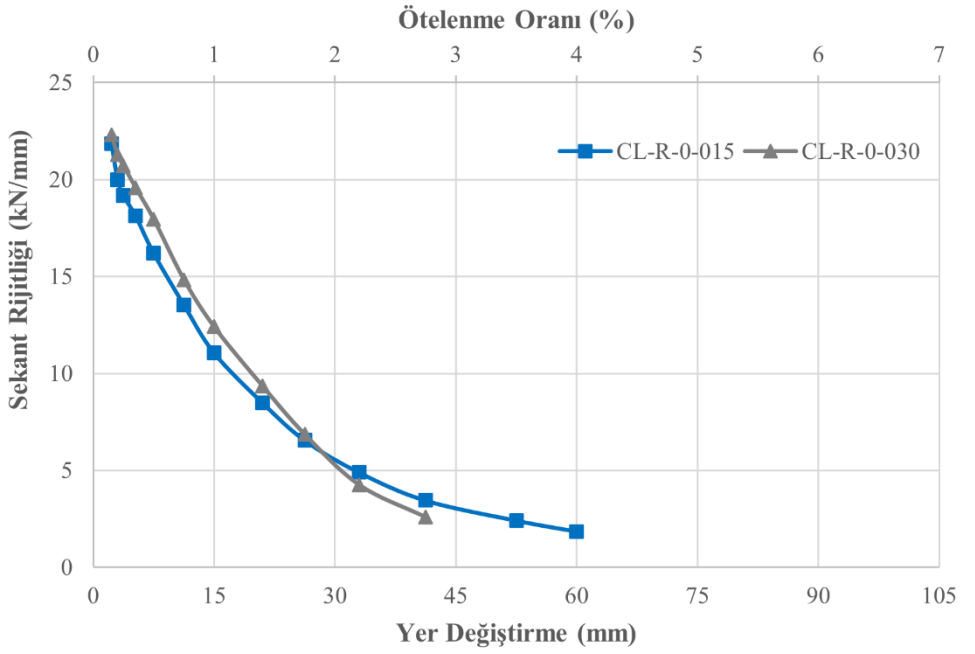
Şekil 7.38. Nihai rijitlik değerlerine eksenel yük düzeyinin etkisi.

Eksenel yük düzeyine göre birbirinden farklılaşan numunelerin rijitlik katsayısı değerlerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Şekil 7.39'da verilmiştir.



Şekil 7.39. Rijitlik katsayısı değerlerine eksenel yük düzeyinin etkisi.

Eksenel yük düzeyine göre birbirinden farklılaşan CL-R-0-015 ve CL-R-0-030 numunelerinin sekant rijitlikleri Şekil 7.40'ta verilmiştir.



Şekil 7.40. CL-R-0-015 ve CL-R-0-030 sekant rijitliği karşılaştırması.

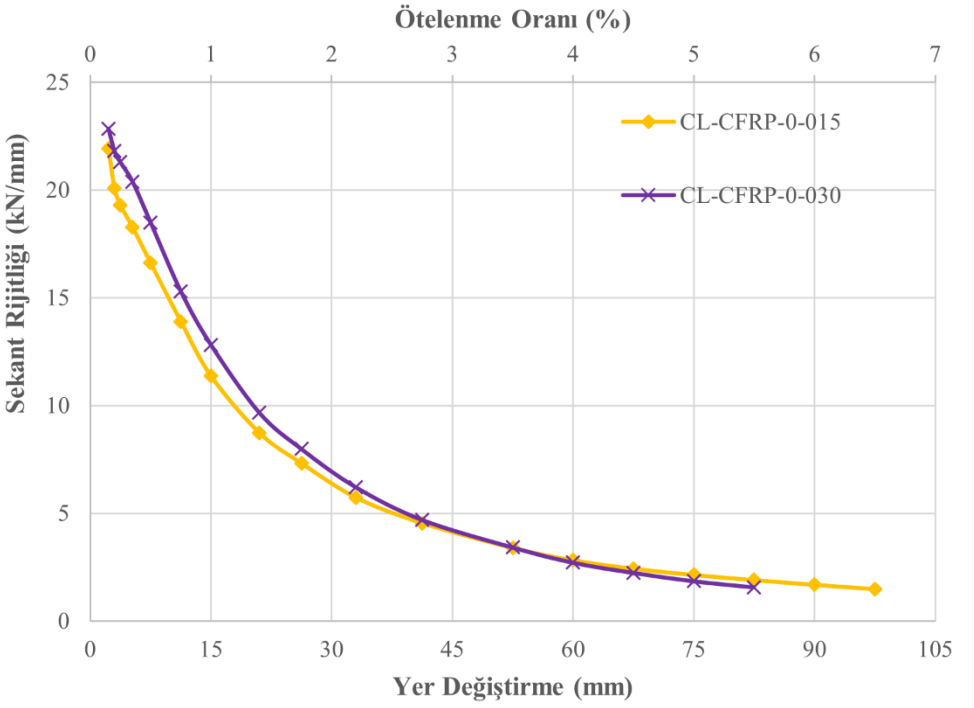
Sekant rijitliğinde oluşan yüzdesel artış veya azalışlar Tablo 7.15'te verilmiştir.

Tablo 7.15. CL-R-0-015 ve CL-R-0-030 sekant rijitliği farklılıkları.

Ötelenme oranı (%)	CL-R-0-015 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	CL-R-0-030 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	Yüzdesel artış (%)
0.15	21.867	22.310	2.027
0.2	20.005	21.271	6.327
0.25	19.169	20.710	8.034
0.35	18.119	19.581	8.068
0.5	16.193	17.949	10.848
0.75	13.531	14.836	9.641
1	11.058	12.407	12.202
1.4	8.490	9.356	10.195
1.75	6.552	6.863	4.740
2.2	4.898	4.257	-13.095
2.75	3.456	2.595	-24.900
3.5	2.423	-	-
4	1.858	-	-

CL-R-0-015 ve CL-R-0-030 numunelerinin birinci sekant rijitlikleri %2.027 farklı olmuştur. CL-R-0-015 numunesinin eksenel yük düzeyinin artırılması sekant rijitliklerini %1.75 ötelenme oranına kadar %2.027 ile %12.202 arasında artırmış, sonraki ötelenme oranlarında %13.095 ile %24.900 arasında azaltmıştır.

Eksenel yük düzeyine göre birbirinden farklılaşan CL-CFRP-0-015 ve CL-CFRP-0-030 numunelerinin sekant rijitlikleri Şekil 7.41'de verilmiştir.



Şekil 7.41. CL-CFRP-0-015 ve CL-CFRP-0-030 sekant rijitliği karşılaştırması.

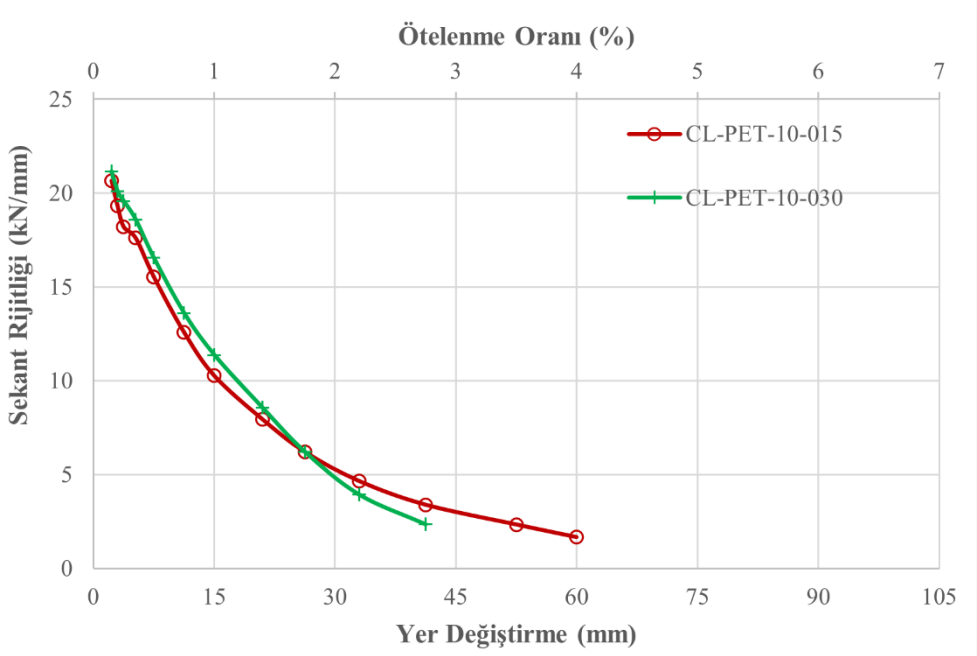
Sekant rijitliğinde oluşan yüzdesel artış veya azalışlar Tablo 7.16'da verilmiştir.

Tablo 7.16. CL-CFRP-0-015 ve CL-CFRP-0-030 sekant rijitliği farklılıkları.

Ötelenme oranı (%)	CL-CFRP-0-015 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	CL-CFRP-0-030 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	Yüzdesel artış (%)
0.15	21.919	22.845	4.226
0.2	20.088	21.815	8.595
0.25	19.287	21.285	10.360
0.35	18.269	20.386	11.586
0.5	16.609	18.490	11.327
0.75	13.895	15.305	10.153
1	11.367	12.815	12.741
1.4	8.736	9.674	10.740
1.75	7.320	7.983	9.060
2.2	5.735	6.212	8.309
2.75	4.547	4.696	3.285
3.5	3.394	3.418	0.678
4	2.819	2.713	-3.766
4.5	2.428	2.238	-7.799
5	2.142	1.850	-13.607
5.5	1.899	1.568	-17.463
6	1.683	-	-
6.5	1.484	-	-

CL-CFRP-0-015 ve CL-CFRP-0-030 numunelerinin birinci sekant rijitlikleri %4.226 farklı olmuştur. CL-CFRP-0-015 numunesinin eksenel yük düzeyinin artırılması sekant rijitliklerini %3.5 ötelenme oranına kadar %0.678 ile %12.741 arasında artırmış, sonrasında %3.766 ile %17.463 arasında azaltmıştır.

Eksenel yük düzeyine göre birbirinden farklılaşan CL-PET-10-015 ve CL-PET-10-030 numunelerinin sekant rijitlikleri Şekil 7.42'de verilmiştir.



Şekil 7.42. CL-PET-10-015 ve CL-PET-10-030 sekant rijitliği karşılaştırması.

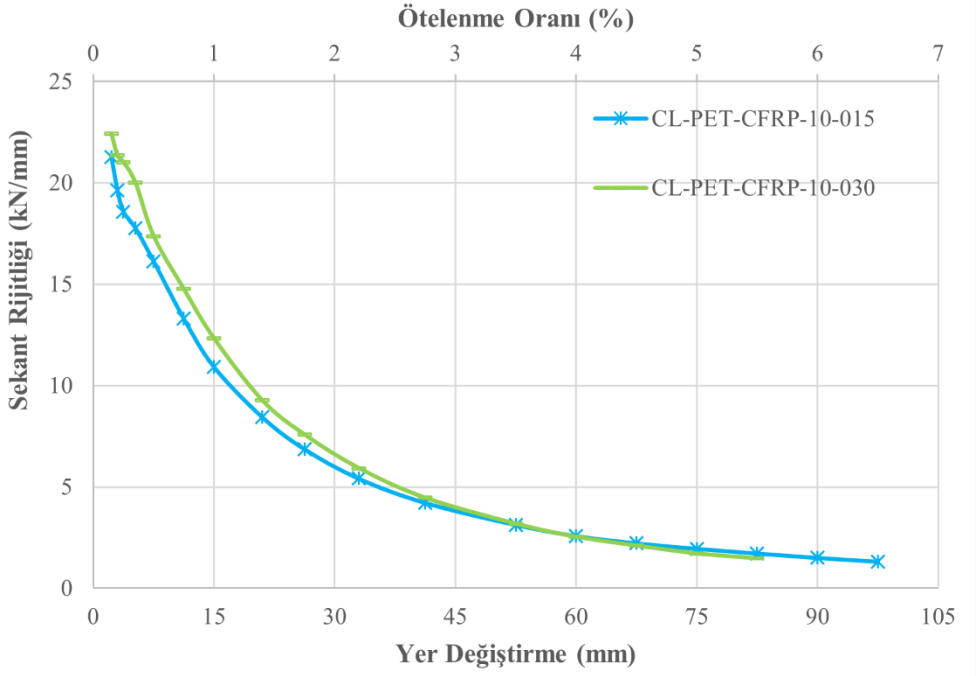
Sekant rijitliğinde oluşan yüzdesel artış veya azalışlar Tablo 7.17'de verilmiştir.

Tablo 7.17. CL-PET-10-015 ve CL-PET-10-030 sekant rijitliği farklılıkları.

Ötelenme oranı (%)	CL-PET-10-015 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	CL-PET-10-030 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	Yüzdesel artış (%)
0.15	20.659	21.145	2.355
0.2	19.310	20.090	4.037
0.25	18.202	19.584	7.594
0.35	17.605	18.587	5.576
0.5	15.533	16.556	6.581
0.75	12.584	13.615	8.195
1	10.268	11.382	10.853
1.4	7.940	8.561	7.827
1.75	6.208	6.215	0.106
2.2	4.653	3.929	-15.558
2.75	3.392	2.348	-30.769
3.5	2.338	-	-
4	1.663	-	-

CL-PET-10-015 ve CL-PET-10-030 numunelerinin birinci sekant rijitlikleri %2.355 farklı olmuştur. CL-PET-10-015 numunesinin eksenel yük düzeyinin artırılması sekant rijitliklerini %1.75 ötelenme oranına kadar %0.106 ile %10.853 arasında artırmış, sonrasında %15.558 ile %30.769 arasında azaltmıştır.

Eksenel yük düzeyine göre birbirinden farklılaşan CL-PET-CFRP-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-030 numunelerinin sekant rijitlikleri Şekil 7.43'te verilmiştir.



Şekil 7.43. CL-PET-CFRP-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-030 sekant rijitliği karşılaştırması.

Sekant rijitliğinde oluşan yüzdesel artış veya azalışlar Tablo 7.18'de verilmiştir.

Tablo 7.18. CL-PET-CFRP-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-030 sekant rijitliği farklılıkları.

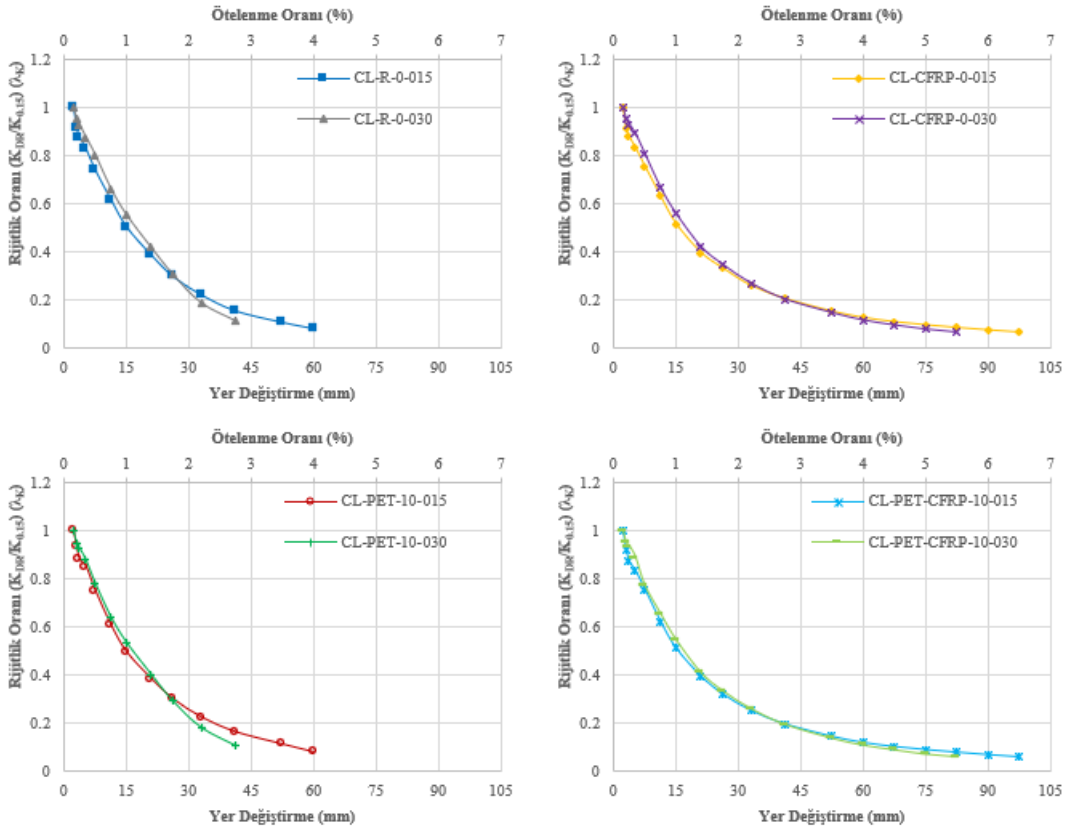
Ötelenme oranı (%)	CL-PET-CFRP-10-015 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	CL-PET-CFRP-10-030 sekant rijitlikleri (K_{DR}) (kN/mm)	Yüzdesel artış (%)
0.15	21.266	22.414	5.399
0.2	19.622	21.344	8.776
0.25	18.572	21.017	13.169
0.35	17.747	19.988	12.626
0.5	16.119	17.363	7.719
0.75	13.288	14.759	11.071
1	10.911	12.322	12.931
1.4	8.433	9.267	9.886
1.75	6.859	7.579	10.503
2.2	5.405	5.920	9.533
2.75	4.212	4.459	5.849
3.5	3.125	3.182	1.830
4	2.578	2.535	-1.670
4.5	2.219	2.101	-5.349
5	1.949	1.711	-12.240
5.5	1.719	1.469	-14.548
6	1.502	-	-
6.5	1.317	-	-

CL-PET-CFRP-10-015 numunesinin eksenel yük düzeyinin artırılması birinci sekant rijitliğini %5.399 artmıştır. Sekant rijitliklerini %3.5 ötelenme oranına kadar %1.830 ile %13.169 arasında artırmış, sonrasında %1.670 ile %14.548 arasında azaltmıştır.

Kolon numunelerinin sonuçlarına bakıldığında eksenel yük düzeyi artırılan ve karbon lifli polimer kullanılmayan numunelerin %1.75 ötelenme oranına kadar sekant rijitliklerinin yükseldiği, sonrasında azaldığı görülmüştür. Karbon lifli polimer kullanılan numunelerde benzeri davranış %3.5 ötelenme oranında gerçekleşmiştir.

Betonarme kolon numunelerin her ötelenme oranındaki rijitlik azalmasını temsil eden sekant rijitlik oranları (λ_K) hesaplanmış ve Bölüm 6 içerisinde her kolon için ayrı ayrı verilmiştir.

Kolonların eksenel yük düzeyinin artırılması durumunda numunenin sekant rijitlik oranlarındaki değişimin grafikleri Şekil 7.44'te verilmiştir.

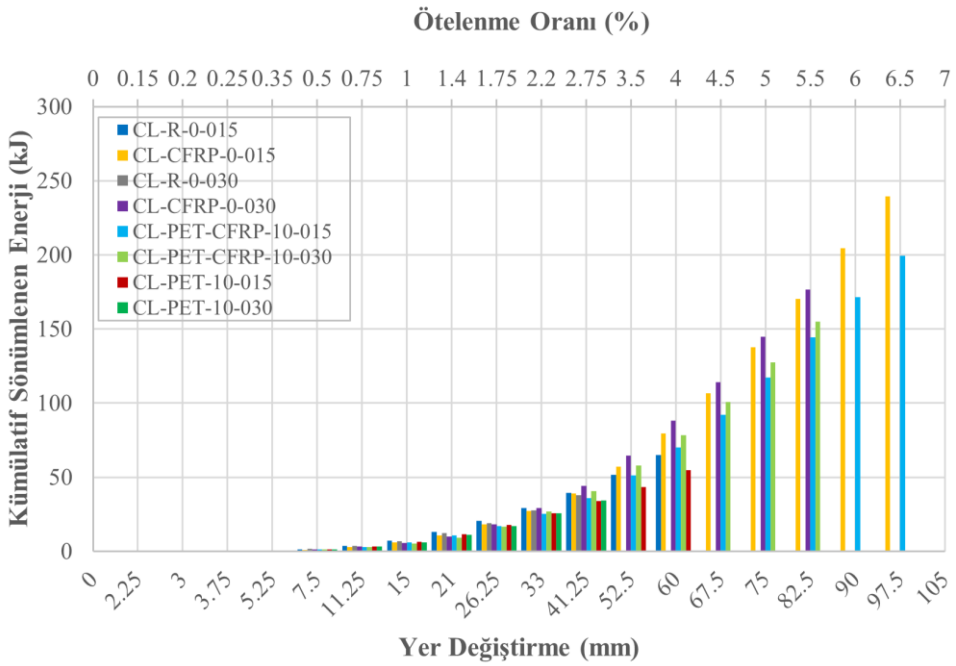


Şekil 7.44. Sekant rijitlik oranına eksenel yük düzeyinin etkisi.

Sekant rijitlik oranlarının eksenel yük düzeyine göre karşılaştırılması, sekant rijitlik değerlerinin verildiği karşılaştırma grafikleri ile benzerlik göstermektedir. Numunelerin sekant rijitlik oranı değerlerinin %0.5 ötelenme oranına kadar yavaş, %0.5 ile %2.75 arasında hızlı ve %2.75 ötelenme oranından sonra çok yavaş bir şekilde azaldığı görülmüştür. Eksenel yük düzeyi artırılan ve karbon lifli polimer kullanılmayan numunelerin %1.4 ve %1.75 ötelenme oranına kadar rijitlik oranlarındaki azalmaların daha yavaş azaldığı, sonrasında daha hızlı azaldığı görülmüştür. Eksenel yük düzeyi artırılan ve karbon lifli polimer kullanılan numunelerde ise benzeri davranış %2.2 ve %2.75 ötelenme oranları için görülmüştür.

7.3. Enerji Sönümleme Kapasitelerinin Karşılaştırılması

Birbirlerinden PET ikamesinin varlığına, karbon lifli polimer sargının kullanımına ve eksenel yük değerine göre farklılaşan numunelerin sönümledikleri kümülatif enerji değerleri Şekil 7.45'te verilmiştir. Daha detaylı karşılaştırmalar bölümün ilerleyen kısımlarında yapılmıştır.



Şekil 7.45. Tüm kolon numunelerinin sönümledikleri kümülatif enerji değerleri.

7.3.1. PET ikamesinin varlığına göre enerji sönümleme kapasiteleri

Betonarme kolonların betonunda PET ikamesinin yapılması durumunda numunelerin her ötelenme oranında sönümlenen enerji değerlerindeki artışlar veya azalışlar yüzdesel olarak hesaplanmıştır. Tablo 7.19'da son ötelenme oranı için kümülatif sönümlenen enerji değerlerindeki artışlar veya azalışlar toplu şekilde verilmiştir.

Tablo 7.19. Kümülatif enerji değerine PET ikamesinin etkisi.

Numune İsmi	Son ötelenme oranı kümülatif sönümlenen enerji (kNmm) (J)	Yüzdesel artış (%)
CL-R-0-015	65113.697	
CL-PET-10-015	54941.799	-15.622
CL-R-0-030	37741.823	
CL-PET-10-030	34343.937	-9.003
CL-CFRP-0-015	239683.432	
CL-PET-CFRP-10-015	199417.434	-16.800
CL-CFRP-0-030	176763.616	
CL-PET-CFRP-10-030	154847.392	-12.399

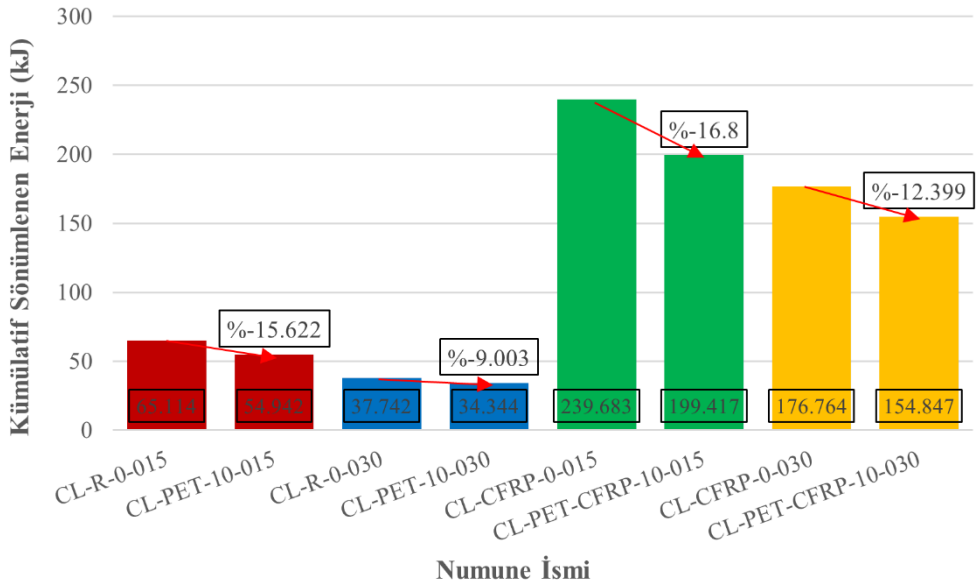
CL-R-0-015 numunesinin betonunda PET ikamesinin yapılması son ötelenme oranı için kümülatif sönümlenen enerji değerini %15.622 oranında düşürmüştür.

CL-R-0-030 numunesinin betonunda PET ikamesinin yapılması son ötelenme oranı için kümülatif sönümlenen enerji değerini %9.003 oranında düşürmüştür.

CL-CFRP-0-015 numunesinin betonunda PET ikamesinin yapılması son ötelenme oranı için kümülatif sönümlenen enerji değerini %16.800 oranında düşürmüştür.

CL-CFRP-0-030 numunesinin betonunda PET ikamesinin yapılması son ötelenme oranı için kümülatif sönümlenen enerji değerini %12.399 oranında düşürmüştür.

PET ikamesinin varlığına göre birbirinden farklılaşan numunelerin kümülatif enerji değerlerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Şekil 7.46'da verilmiştir.



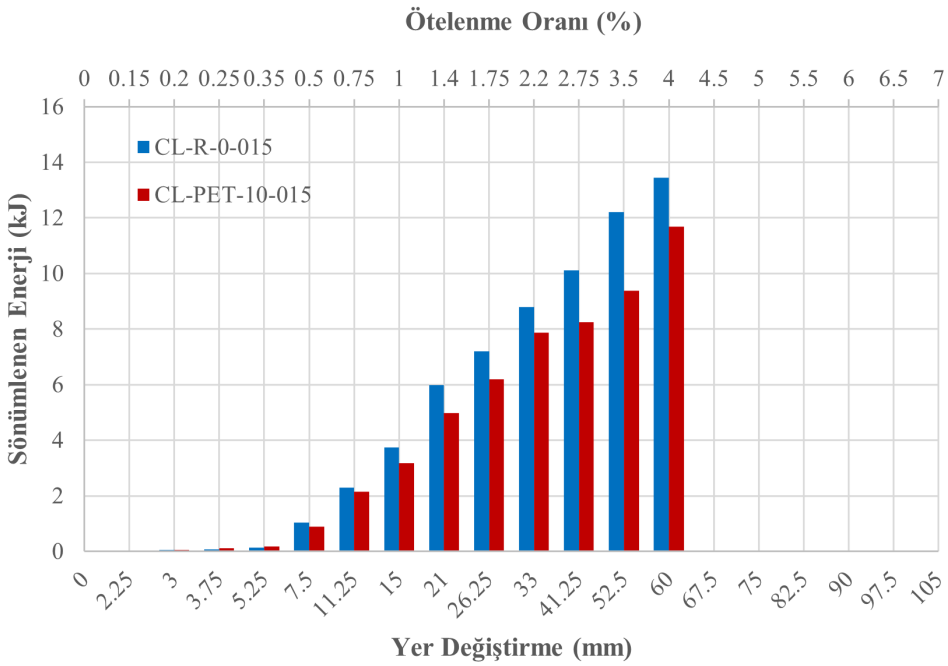
Şekil 7.46. Kümülatif enerji değerlerine PET ikamesinin etkisi.

CL-R-0-015 numunesine PET ikamesinin yapılması sonucunda her ötelenme oranındaki sönümlenen enerji değeri ve kümülatif sönümlenen enerji değerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Tablo 7.20'de verilmiştir.

Tablo 7.20. CL-R-0-015 ve CL-PET-10-015 enerji değerleri.

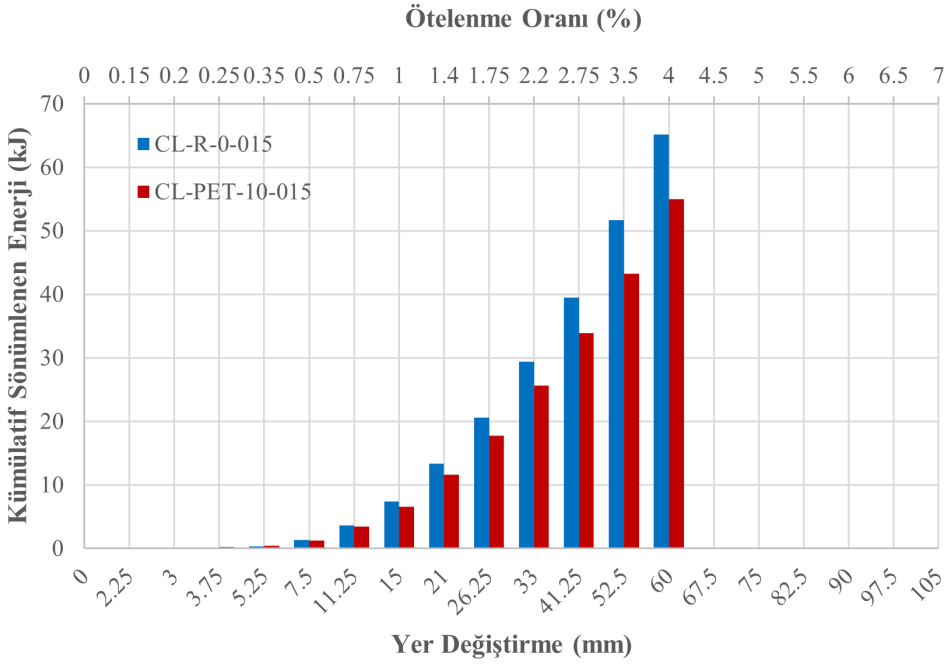
Ötelenme oranı (%)	CL-R-0-015 (E_{DR}) (J)	CL-PET-10-015 (E_{DR}) (J)	Yüzdesel artış (%)	CL-R-0-015 (E_{cum}) (J)	CL-PET-10-015 (E_{cum}) (J)	Yüzdesel artış (%)
0.15	15.602	14.287	-8.424	15.602	14.287	-8.424
0.2	48.030	52.324	8.940	63.631	66.611	4.683
0.25	77.008	122.949	59.658	140.639	189.561	34.785
0.35	144.508	180.334	24.792	285.147	369.895	29.721
0.5	1046.522	900.133	-13.988	1331.669	1270.028	-4.629
0.75	2285.594	2157.815	-5.591	3617.263	3427.843	-5.237
1	3746.099	3169.865	-15.382	7363.362	6597.708	-10.398
1.4	5978.395	4978.257	-16.729	13341.757	11575.965	-13.235
1.75	7198.896	6195.727	-13.935	20540.653	17771.692	-13.480
2.2	8801.718	7867.018	-10.620	29342.371	25638.711	-12.622
2.75	10114.912	8254.139	-18.396	39457.283	33892.849	-14.102
3.5	12207.707	9373.177	-23.219	51664.990	43266.026	-16.257
4	13448.707	11675.773	-13.183	65113.697	54941.799	-15.622

PET ikamesinin varlığına göre birbirinden farklılaşan CL-R-0-015 ve CL-PET-10-015 numunelerinin sönümlenen enerjileri Şekil 7.47'de verilmiştir.



Şekil 7.47. CL-R-0-015 ve CL-PET-10-015 sönümlenen enerji karşılaştırması.

CL-R-0-015 ve CL-PET-10-015 numunelerinin kümülatif sönümlenen enerjileri Şekil 7.48'de verilmiştir.



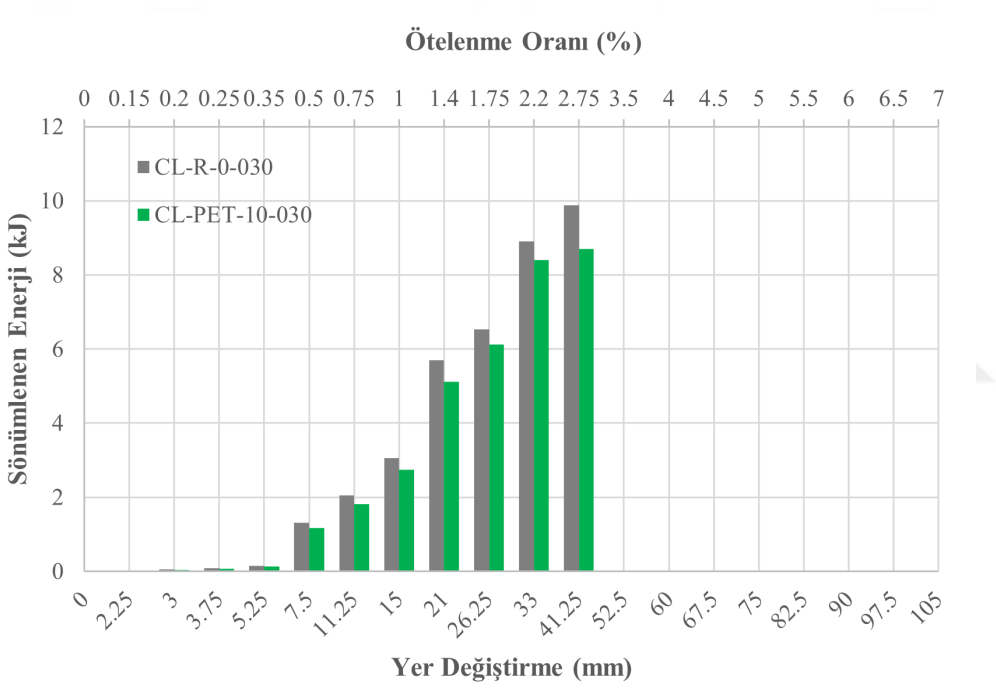
Şekil 7.48. CL-R-0-015 ve CL-PET-10-015 kümülatif enerji karşılaştırması.

CL-R-0-030 numunesine PET ikamesinin yapılması sonucunda her ötelenme oranındaki sönümlenen enerji değeri ve kümülatif sönümlenen enerji değerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Tablo 7.21'de verilmiştir.

Tablo 7.21. CL-R-0-030 ve CL-PET-10-030 enerji değerleri.

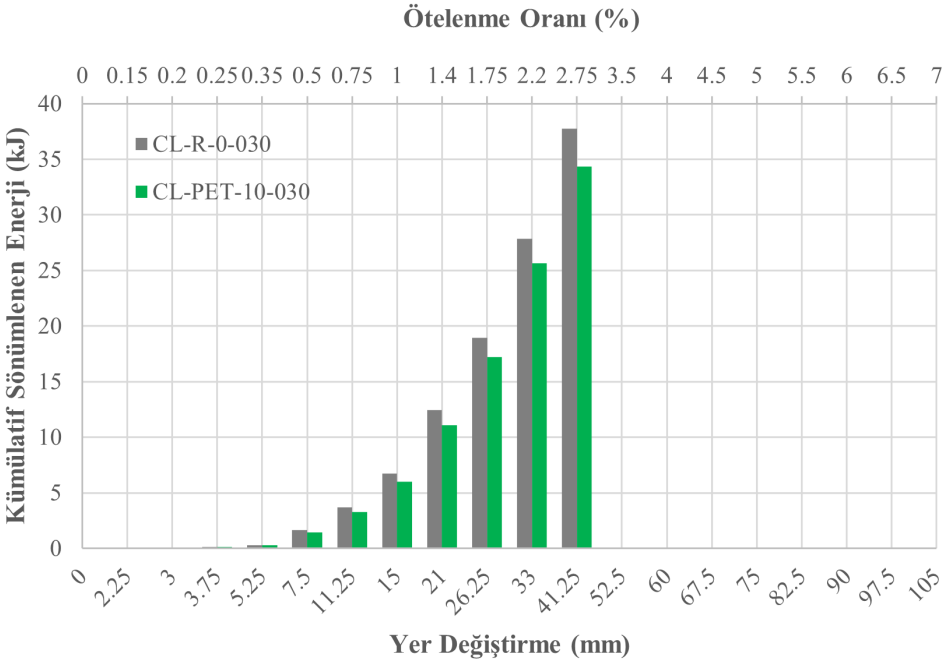
Ötelenme oranı (%)	CL-R-0-030 (E_{DR}) (J)	CL-PET-10-030 (E_{DR}) (J)	Yüzdesel artış (%)	CL-R-0-030 (E_{cum}) (J)	CL-PET-10-030 (E_{cum}) (J)	Yüzdesel artış (%)
0.15	16.160	12.625	-21.871	16.160	12.625	-21.871
0.2	50.908	44.253	-13.073	67.067	56.878	-15.193
0.25	83.772	74.335	-11.265	150.839	131.212	-13.011
0.35	156.578	139.170	-11.118	307.417	270.382	-12.047
0.5	1317.695	1163.468	-11.704	1625.112	1433.850	-11.769
0.75	2050.376	1814.474	-11.505	3675.488	3248.324	-11.622
1	3058.717	2740.567	-10.401	6734.205	5988.891	-11.068
1.4	5695.447	5111.401	-10.255	12429.652	11100.292	-10.695
1.75	6531.581	6129.657	-6.154	18961.233	17229.949	-9.131
2.2	8896.764	8408.826	-5.484	27857.996	25638.775	-7.966
2.75	9883.827	8705.162	-11.925	37741.823	34343.937	-9.003

PET ikamesinin varlığına göre birbirinden farklılaşan CL-R-0-030 ve CL-PET-10-030 numunelerinin sönümlenen enerjileri Şekil 7.49'da verilmiştir.



Şekil 7.49. CL-R-0-030 ve CL-PET-10-030 sönümlenen enerji karşılaştırması.

CL-R-0-030 ve CL-PET-10-030 numunelerinin kümülatif sönümlenen enerjileri Şekil 7.50'de verilmiştir.



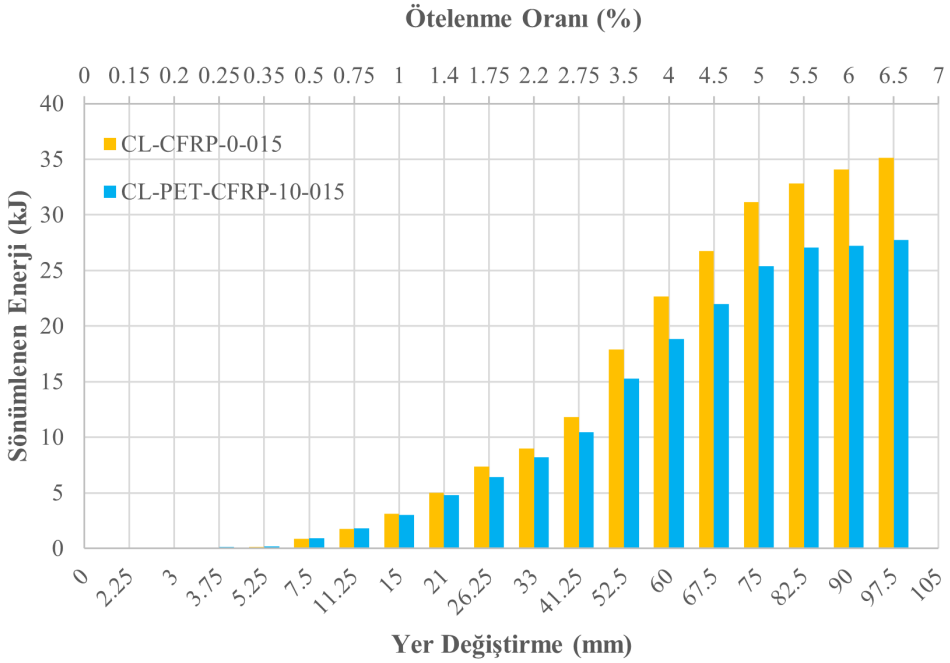
Şekil 7.50. CL-R-0-030 ve CL-PET-10-030 kümülatif enerji karşılaştırması.

CL-CFRP-0-015 numunesine PET ikamesinin yapılması sonucunda her ötelenme oranındaki sönümlenen enerji değeri ve kümülatif sönümlenen enerji değerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Tablo 7.22'de verilmiştir.

Tablo 7.22. CL-CFRP-0-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 enerji değerleri.

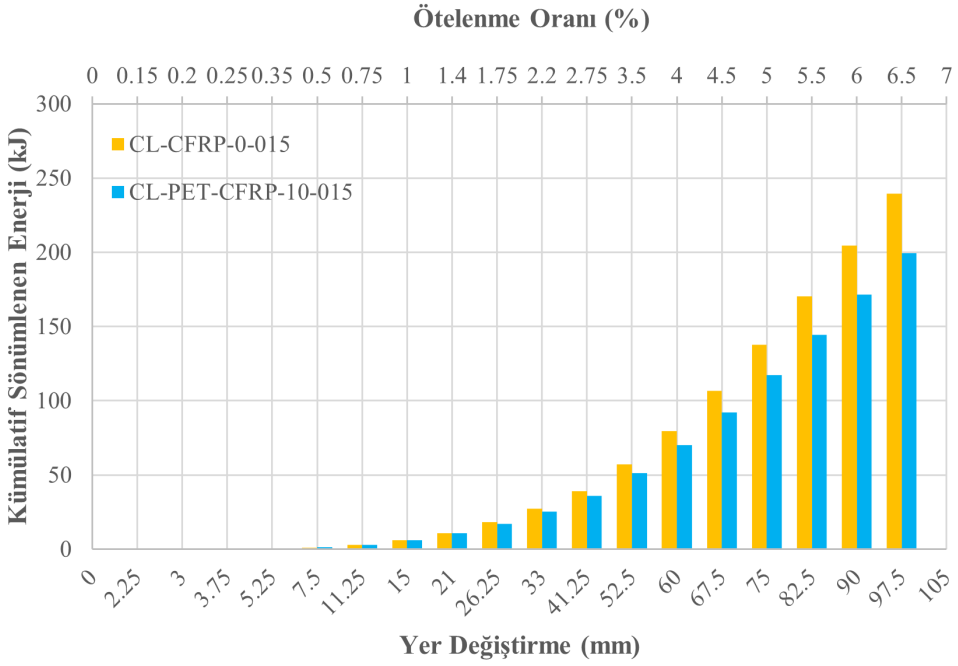
Ötelenme oranı (%)	CL-CFRP-0-015 (E_{DR}) (J)	CL-PET-CFRP-10-015 (E_{DR}) (J)	Yüzdesel artış (%)	CL-CFRP-0-015 (E_{cum}) (J)	CL-PET-CFRP-10-015 (E_{cum}) (J)	Yüzdesel artış (%)
0.15	16.038	15.666	-2.321	16.038	15.666	-2.321
0.2	48.341	50.988	5.476	64.379	66.654	3.533
0.25	78.267	104.513	33.533	142.647	171.167	19.994
0.35	146.346	166.428	13.722	288.992	337.595	16.818
0.5	857.170	917.989	7.095	1146.162	1255.583	9.547
0.75	1759.746	1830.807	4.038	2905.908	3086.391	6.211
1	3101.616	2994.134	-3.465	6007.524	6080.525	1.215
1.4	4976.895	4780.864	-3.939	10984.419	10861.389	-1.120
1.75	7367.921	6398.771	-13.154	18352.340	17260.160	-5.951
2.2	8977.130	8189.458	-8.774	27329.470	25449.619	-6.878
2.75	11821.607	10429.683	-11.774	39151.077	35879.302	-8.357
3.5	17898.207	15277.056	-14.645	57049.285	51156.358	-10.330
4	22672.639	18860.484	-16.814	79721.923	70016.842	-12.174
4.5	26760.767	21991.602	-17.821	106482.691	92008.444	-13.593
5	31165.365	25395.110	-18.515	137648.055	117403.555	-14.707
5.5	32834.116	27051.678	-17.611	170482.171	144455.232	-15.267
6	34095.588	27199.067	-20.227	204577.759	171654.300	-16.093
6.5	35105.672	27763.134	-20.916	239683.432	199417.434	-16.800

PET ikamesinin varlığına göre birbirinden farklılaşan CL-CFRP-0-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 numunelerinin sönümlenen enerjileri Şekil 7.51'de verilmiştir.



Şekil 7.51. CL-CFRP-0-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 sönümlenen enerji karşılaştırması.

CL-CFRP-0-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 numunelerinin kümülatif sönümlenen enerjileri Şekil 7.52'de verilmiştir.



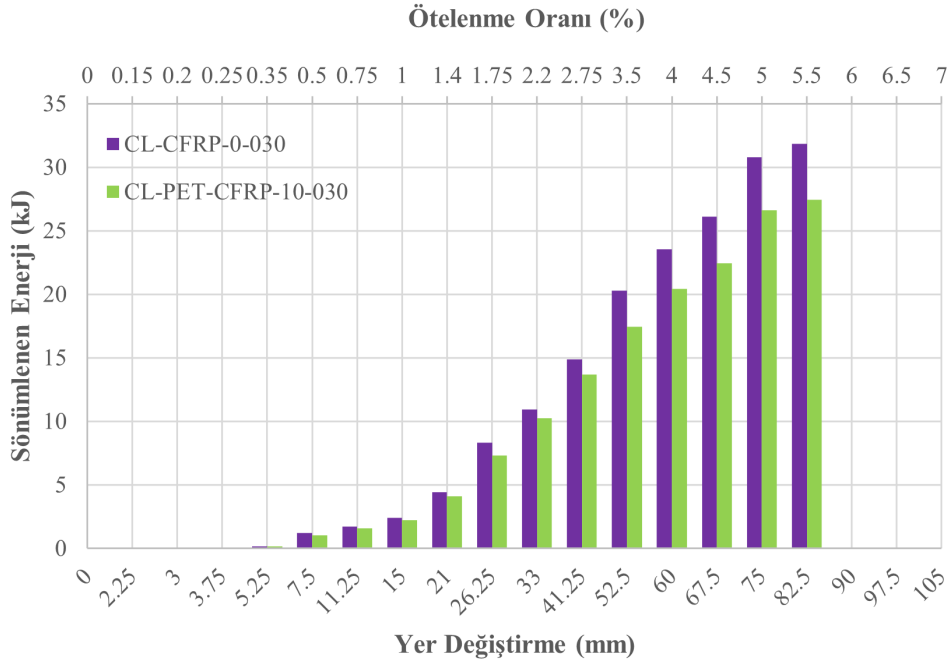
Şekil 7.52. CL-CFRP-0-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 kümülatif enerji karşılaştırması.

CL-CFRP-0-030 numunesine PET ikamesinin yapılması sonucunda her ötelenme oranındaki sönümlenen enerji değeri ve kümülatif sönümlenen enerji değerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Tablo 7.23'te verilmiştir.

Tablo 7.23. CL-CFRP-0-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 enerji değerleri.

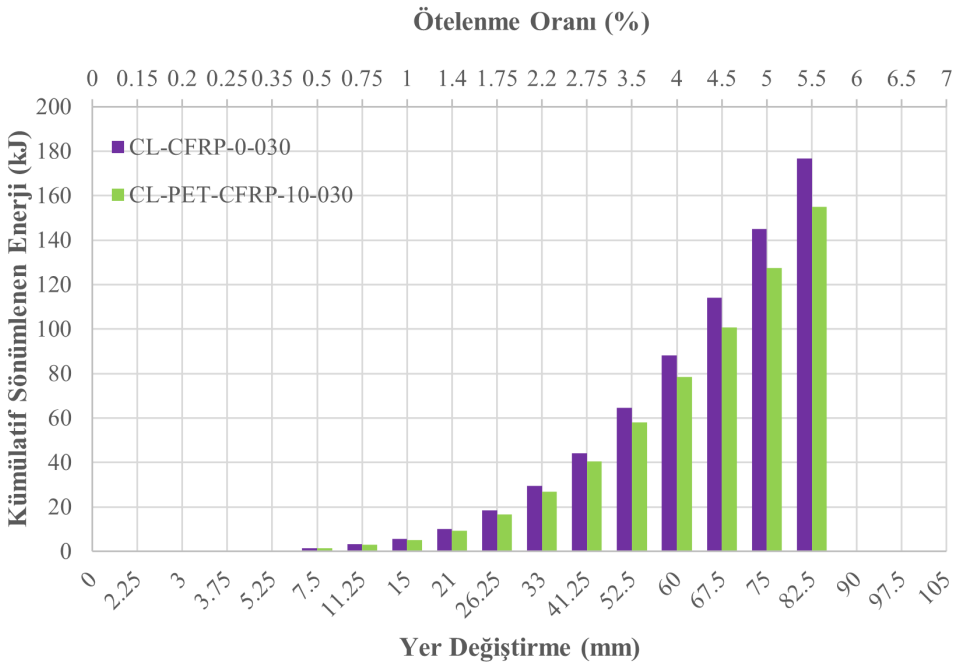
Ötelenme oranı (%)	CL-CFRP-0-030 (E_{DR}) (J)	CL-PET-CFRP-10-030 (E_{DR}) (J)	Yüzdesel artış (%)	CL-CFRP-0-030 (E_{cum}) (J)	CL-PET-CFRP-10-030 (E_{cum}) (J)	Yüzdesel artış (%)
0.15	15.896	15.376	-3.275	15.896	15.376	-3.275
0.2	51.060	49.243	-3.559	66.957	64.619	-3.492
0.25	85.263	83.068	-2.574	152.219	147.687	-2.978
0.35	165.462	160.188	-3.188	317.682	307.874	-3.087
0.5	1216.359	1033.334	-15.047	1534.041	1341.208	-12.570
0.75	1718.223	1583.985	-7.813	3252.264	2925.193	-10.057
1	2407.727	2200.022	-8.627	5659.991	5125.216	-9.448
1.4	4426.885	4097.909	-7.431	10086.876	9223.125	-8.563
1.75	8315.586	7333.654	-11.808	18402.463	16556.779	-10.030
2.2	10946.979	10251.874	-6.350	29349.442	26808.653	-8.657
2.75	14898.132	13671.635	-8.233	44247.573	40480.289	-8.514
3.5	20295.944	17458.147	-13.982	64543.517	57938.436	-10.234
4	23520.650	20419.895	-13.183	88064.166	78358.331	-11.021
4.5	26085.953	22450.515	-13.936	114150.119	100808.846	-11.687
5	30778.465	26615.089	-13.527	144928.584	127423.935	-12.078
5.5	31835.032	27423.457	-13.858	176763.616	154847.392	-12.399

PET ikamesinin varlığına göre birbirinden farklılaşan CL-CFRP-0-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 numunelerinin sönümlenen enerjileri Şekil 7.53'te verilmiştir.



Şekil 7.53. CL-CFRP-0-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 sönümlenen enerji karşılaştırması.

CL-CFRP-0-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 numunelerinin kümülatif sönümlenen enerjileri Şekil 7.54'te verilmiştir.



Şekil 7.54. CL-CFRP-0-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 kümülatif enerji karşılaştırması.

7.3.2. Karbon lifli polimer sargı kullanımına göre enerji sönümleme kapasiteleri

Betonarme kolonların etrafında karbon lifli polimer sargı kullanılması durumunda numunelerin her ötelenme oranında sönümlenen enerji değerlerindeki artışlar veya azalışlar yüzdesel olarak hesaplanmıştır. Tablo 7.24'te son ötelenme oranı için kümülatif sönümlenen enerji değerlerindeki artışlar veya azalışlar toplu şekilde verilmiştir.

Tablo 7.24. Kümülatif enerji değerine karbon lifli polimer sargı kullanımının etkisi.

Numune İsmi	Son ötelenme oranı kümülatif sönümlenen enerji (kNmm) (J)	Yüzdesel artış (%)
CL-R-0-015	65113.697	
CL-CFRP-0-015	239683.432	268.100
CL-R-0-030	37741.823	
CL-CFRP-0-030	176763.616	368.349
CL-PET-10-015	54941.799	
CL-PET-CFRP-10-015	199417.434	262.961
CL-PET-10-030	34343.937	
CL-PET-CFRP-10-030	154847.392	350.873

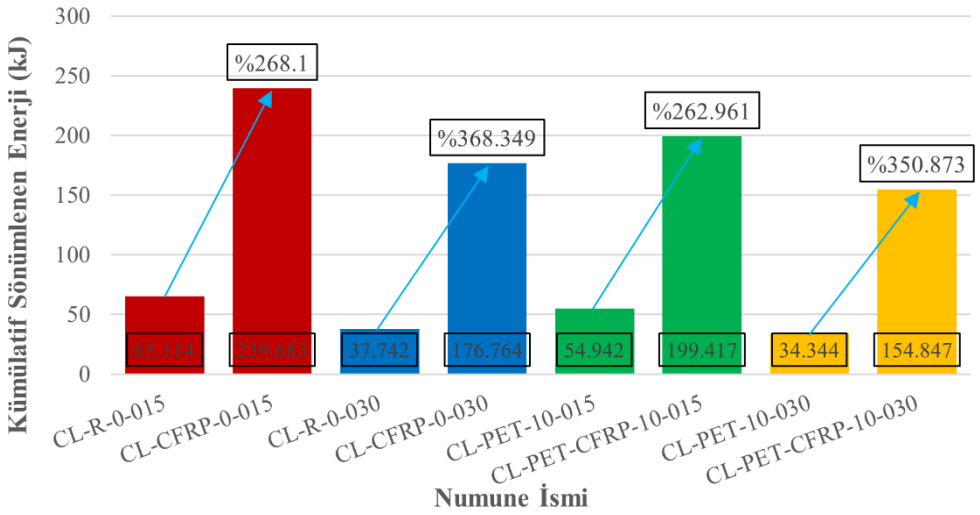
CL-R-0-015 numunesinde karbon lifli polimer sargı kullanılması son ötelenme oranı için kümülatif sönümlenen enerji değerini %268.100 oranında artırmıştır.

CL-R-0-030 numunesinde karbon lifli polimer sargı kullanılması son ötelenme oranı için kümülatif sönümlenen enerji değerini %368.349 oranında artırmıştır.

CL-PET-10-015 numunesinde karbon lifli polimer sargı kullanılması son ötelenme oranı için kümülatif sönümlenen enerji değerini %262.961 oranında artırmıştır.

CL-PET-10-030 numunesinde karbon lifli polimer sargı kullanılması son ötelenme oranı için kümülatif sönümlenen enerji değerini %350.873 oranında artırmıştır.

Karbon lifli polimer sargı kullanımına göre farklılaşan numunelerin kümülatif enerji değerlerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Şekil 7.55'te verilmiştir.



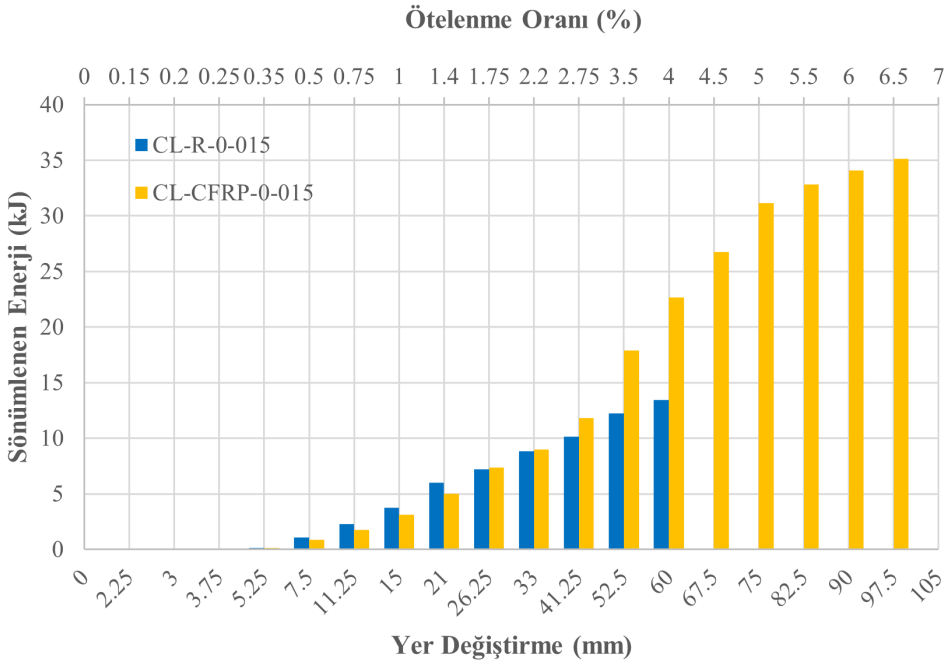
Şekil 7.55. Kümülatif enerji değerlerine karbon lifli polimer sargının etkisi.

CL-R-0-015 numunesinde karbon lifli polimer sargı kullanılması sonucunda her ötelenme oranındaki sönümlenen enerji değeri ve kümülatif sönümlenen enerji değerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Tablo 7.25'te verilmiştir.

Tablo 7.25. CL-R-0-015 ve CL-CFRP-0-015 enerji değerleri.

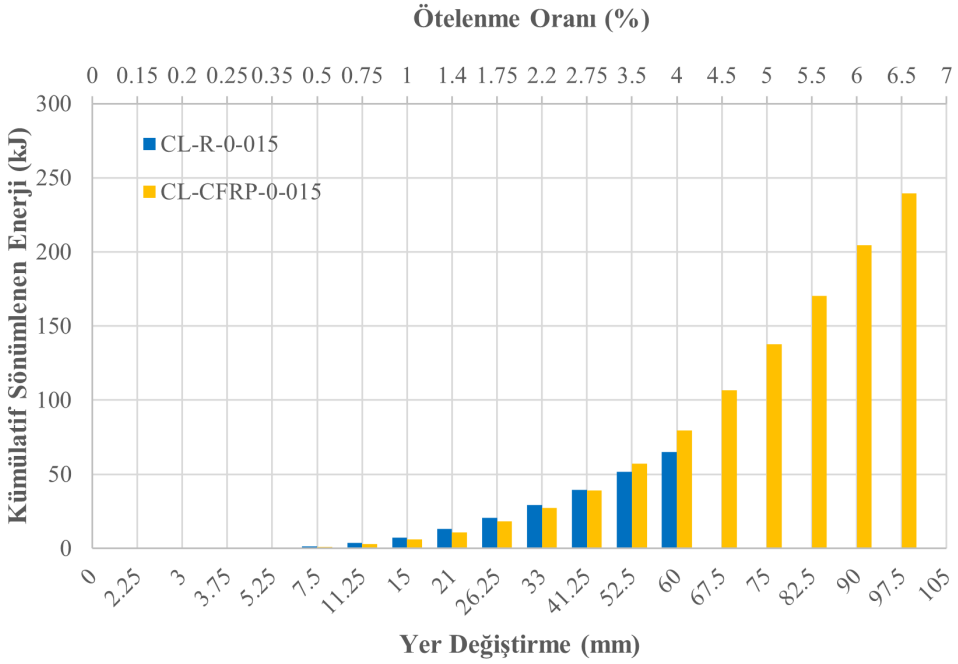
Ötelenme oranı (%)	CL-R-0-015 (E_{DR}) (J)	CL-CFRP-0-015 (E_{DR}) (J)	Yüzdesel artış (%)	CL-R-0-015 (E_{cum}) (J)	CL-CFRP-0-015 (E_{cum}) (J)	Yüzdesel artış (%)
0.15	15.602	16.038	2.800	15.602	16.038	2.800
0.2	48.030	48.341	0.647	63.631	64.379	1.175
0.25	77.008	78.267	1.635	140.639	142.647	1.427
0.35	144.508	146.346	1.272	285.147	288.992	1.348
0.5	1046.522	857.170	-18.093	1331.669	1146.162	-13.930
0.75	2285.594	1759.746	-23.007	3617.263	2905.908	-19.666
1	3746.099	3101.616	-17.204	7363.362	6007.524	-18.413
1.4	5978.395	4976.895	-16.752	13341.757	10984.419	-17.669
1.75	7198.896	7367.921	2.348	20540.653	18352.340	-10.654
2.2	8801.718	8977.130	1.993	29342.371	27329.470	-6.860
2.75	10114.912	11821.607	16.873	39457.283	39151.077	-0.776
3.5	12207.707	17898.207	46.614	51664.990	57049.285	10.422
4	13448.707	22672.639	68.586	65113.697	79721.923	22.435
4.5	-	26760.767	-	-	106482.691	63.533
5	-	31165.365	-	-	137648.055	111.396
5.5	-	32834.116	-	-	170482.171	161.822
6	-	34095.588	-	-	204577.759	214.185
6.5	-	35105.672	-	-	239683.432	268.100

Karbon lifli polimer sargı kullanımına göre farklılaşan CL-R-0-015 ve CL-CFRP-0-015 numunelerinin sönümlenen enerjileri Şekil 7.56'da verilmiştir.



Şekil 7.56. CL-R-0-015 ve CL-CFRP-0-015 sönümlenen enerji karşılaştırması.

CL-R-0-015 ve CL-CFRP-0-015 numunelerinin kümülatif sönümlenen enerjileri Şekil 7.57'de verilmiştir.



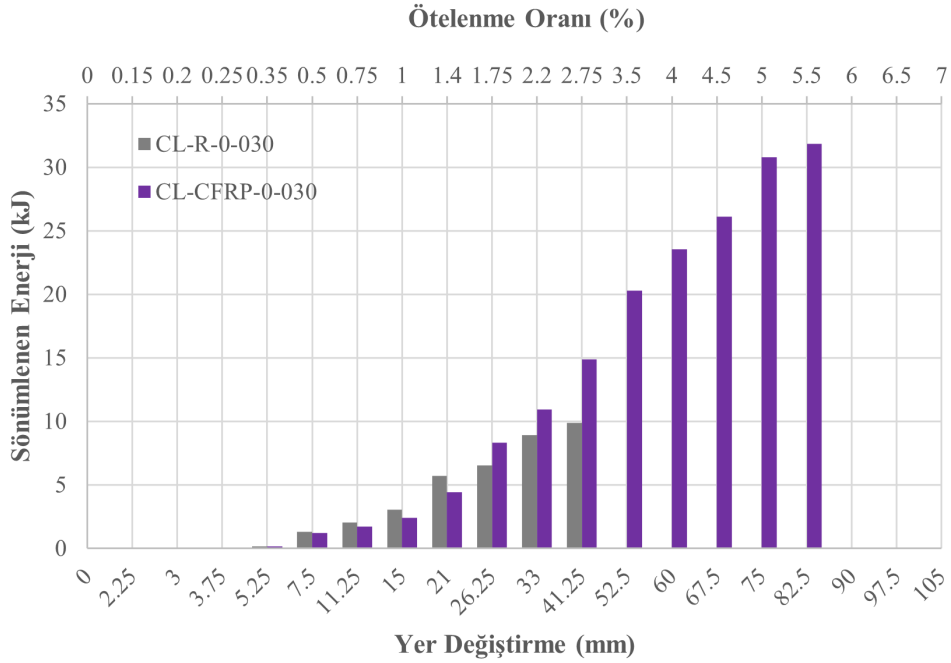
Şekil 7.57. CL-R-0-015 ve CL-CFRP-0-015 kümülatif enerji karşılaştırması.

CL-R-0-030 numunesinde karbon lifli polimer sargı kullanılması sonucunda her ötelenme oranındaki sönümlenen enerji değeri ve kümülatif sönümlenen enerji değerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Tablo 7.26'da verilmiştir.

Tablo 7.26. CL-R-0-030 ve CL-CFRP-0-030 enerji değerleri.

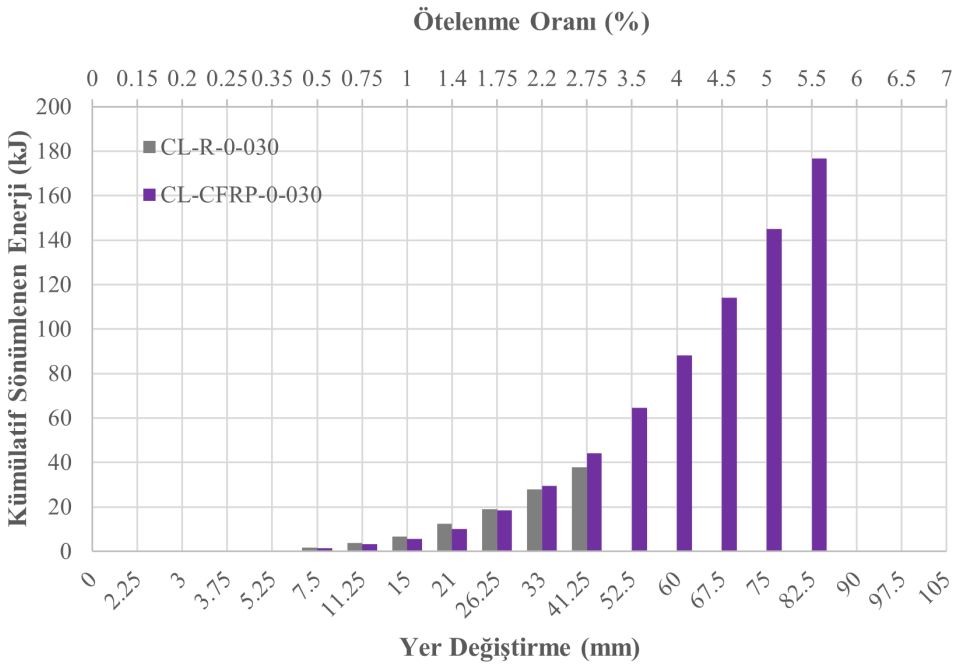
Ötelenme oranı (%)	CL-R-0-030 (E_{DR}) (J)	CL-CFRP-0-030 (E_{DR}) (J)	Yüzdesel artış (%)	CL-R-0-030 (E_{cum}) (J)	CL-CFRP-0-030 (E_{cum}) (J)	Yüzdesel artış (%)
0.15	16.160	15.896	-1.629	16.160	15.896	-1.629
0.2	50.908	51.060	0.300	67.067	66.957	-0.165
0.25	83.772	85.263	1.780	150.839	152.219	0.915
0.35	156.578	165.462	5.674	307.417	317.682	3.339
0.5	1317.695	1216.359	-7.690	1625.112	1534.041	-5.604
0.75	2050.376	1718.223	-16.200	3675.488	3252.264	-11.515
1	3058.717	2407.727	-21.283	6734.205	5659.991	-15.952
1.4	5695.447	4426.885	-22.273	12429.652	10086.876	-18.848
1.75	6531.581	8315.586	27.314	18961.233	18402.463	-2.947
2.2	8896.764	10946.979	23.045	27857.996	29349.442	5.354
2.75	9883.827	14898.132	50.732	37741.823	44247.573	17.238
3.5	-	20295.944	-	-	64543.517	71.013
4	-	23520.650	-	-	88064.166	133.333
4.5	-	26085.953	-	-	114150.119	202.450
5	-	30778.465	-	-	144928.584	284.000
5.5	-	31835.032	-	-	176763.616	368.349

Karbon lifli polimer sargı kullanımına göre farklılaşan CL-R-0-030 ve CL-CFRP-0-030 numunelerinin sönümlenen enerjileri Şekil 7.58'te verilmiştir.



Şekil 7.58. CL-R-0-030 ve CL-CFRP-0-030 sönümlenen enerji karşılaştırması.

CL-R-0-030 ve CL-CFRP-0-030 numunelerinin kümülatif sönümlenen enerjileri Şekil 7.59'da verilmiştir.



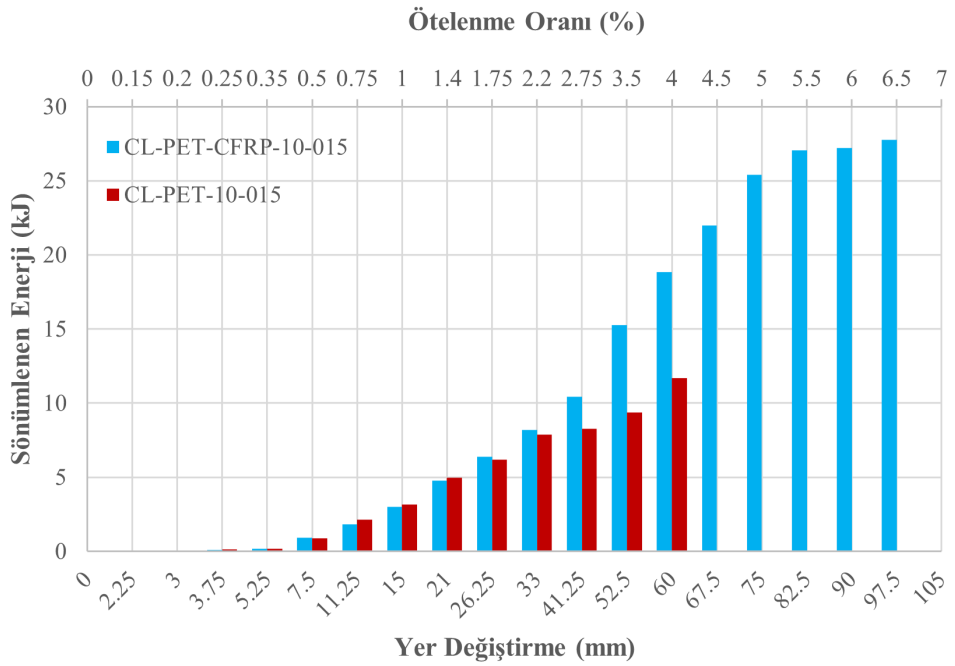
Şekil 7.59. CL-R-0-030 ve CL-CFRP-0-030 kümülatif enerji karşılaştırması.

CL-PET-10-015 numunesinde karbon lifli polimer sargı kullanılması sonucunda her ötelenme oranındaki sönümlenen enerji değeri ve kümülatif sönümlenen enerji değerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Tablo 7.27'de verilmiştir.

Tablo 7.27. CL-PET-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 enerji değerleri.

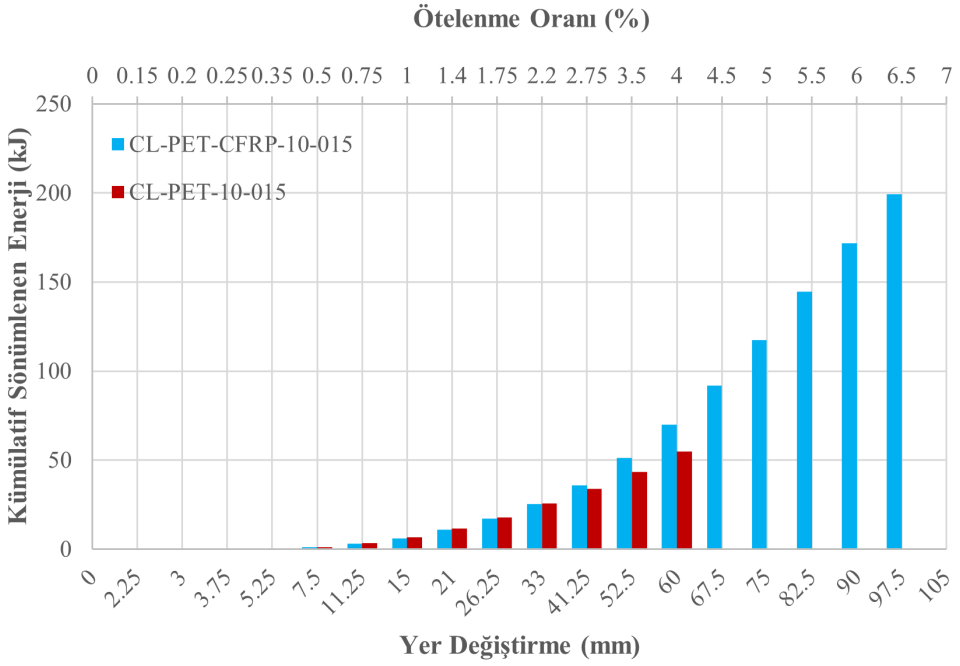
Ötelenme oranı (%)	CL-PET-10-015 (E_{DR}) (J)	CL-PET-CFRP-10-015 (E_{DR}) (J)	Yüzdesel artış (%)	CL-PET-10-015 (E_{cum}) (J)	CL-PET-CFRP-10-015 (E_{cum}) (J)	Yüzdesel artış (%)
0.15	14.287	15.666	9.651	14.287	15.666	9.651
0.2	52.324	50.988	-2.554	66.611	66.654	0.064
0.25	122.949	104.513	-14.995	189.561	171.167	-9.703
0.35	180.334	166.428	-7.712	369.895	337.595	-8.732
0.5	900.133	917.989	1.984	1270.028	1255.583	-1.137
0.75	2157.815	1830.807	-15.155	3427.843	3086.391	-9.961
1	3169.865	2994.134	-5.544	6597.708	6080.525	-7.839
1.4	4978.257	4780.864	-3.965	11575.965	10861.389	-6.173
1.75	6195.727	6398.771	3.277	17771.692	17260.160	-2.878
2.2	7867.018	8189.458	4.099	25638.711	25449.619	-0.738
2.75	8254.139	10429.683	26.357	33892.849	35879.302	5.861
3.5	9373.177	15277.056	62.987	43266.026	51156.358	18.237
4	11675.773	18860.484	61.535	54941.799	70016.842	27.438
4.5	-	21991.602	-	-	92008.444	67.465
5	-	25395.110	-	-	117403.555	113.687
5.5	-	27051.678	-	-	144455.232	162.924
6	-	27199.067	-	-	171654.300	212.429
6.5	-	27763.134	-	-	199417.434	262.961

Karbon lifli polimer sargı kullanımına göre farklılaşan CL-PET-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 numunelerinin sönümlenen enerjileri Şekil 7.60'ta verilmiştir.



Şekil 7.60. CL-PET-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 sönümlenen enerji karşılaştırması.

CL-PET-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 numunelerinin kümülatif sönümlenen enerjileri Şekil 7.61'de verilmiştir.



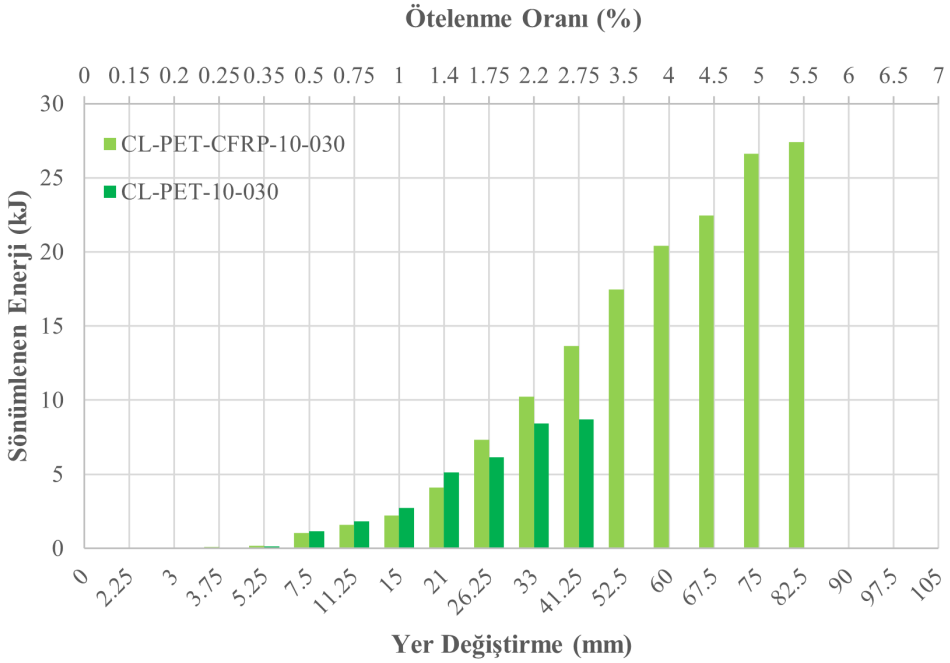
Şekil 7.61. CL-PET-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-015 kümülatif enerji karşılaştırması.

CL-PET-10-030 numunesinde karbon lifli polimer sargı kullanılması sonucunda her ötelenme oranındaki sönümlenen enerji değeri ve kümülatif sönümlenen enerji değerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Tablo 7.28'de verilmiştir.

Tablo 7.28. CL-PET-10-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 enerji değerleri.

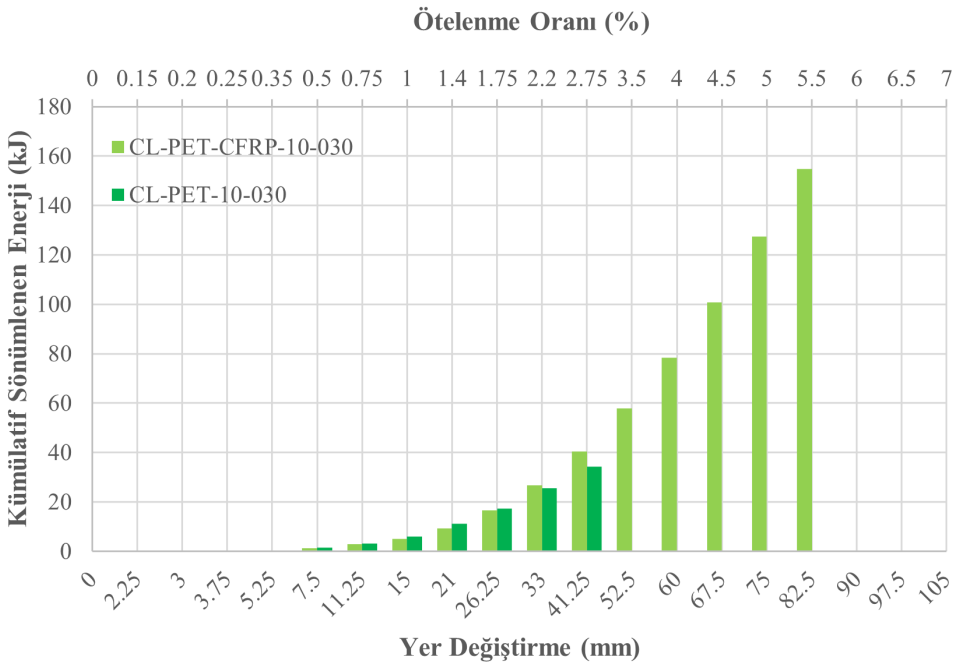
Ötelenme oranı (%)	CL-PET-10-030 (E_{DR}) (J)	CL-PET-CFRP-10-030 (E_{DR}) (J)	Yüzdesel artış (%)	CL-PET-10-030 (E_{cum}) (J)	CL-PET-CFRP-10-030 (E_{cum}) (J)	Yüzdesel artış (%)
0.15	12.625	15.376	21.786	12.625	15.376	21.786
0.2	44.253	49.243	11.277	56.878	64.619	13.609
0.25	74.335	83.068	11.749	131.212	147.687	12.555
0.35	139.170	160.188	15.102	270.382	307.874	13.866
0.5	1163.468	1033.334	-11.185	1433.850	1341.208	-6.461
0.75	1814.474	1583.985	-12.703	3248.324	2925.193	-9.948
1	2740.567	2200.022	-19.724	5988.891	5125.216	-14.421
1.4	5111.401	4097.909	-19.828	11100.292	9223.125	-16.911
1.75	6129.657	7333.654	19.642	17229.949	16556.779	-3.907
2.2	8408.826	10251.874	21.918	25638.775	26808.653	4.563
2.75	8705.162	13671.635	57.052	34343.937	40480.289	17.867
3.5	-	17458.147	-	-	57938.436	68.701
4	-	20419.895	-	-	78358.331	128.158
4.5	-	22450.515	-	-	100808.846	193.527
5	-	26615.089	-	-	127423.935	271.023
5.5	-	27423.457	-	-	154847.392	350.873

Karbon lifli polimer sargı kullanımına göre farklılaşan CL-PET-10-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 numunelerinin sönümlenen enerjileri Şekil 7.62'de verilmiştir.



Şekil 7.62. CL-PET-10-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 sönümlenen enerji karşılaştırması.

CL-PET-10-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 numunelerinin kümülatif sönümlenen enerjileri Şekil 7.63'te verilmiştir.



Şekil 7.63. CL-PET-10-030 ve CL-PET-CFRP-10-030 kümülatif enerji karşılaştırması.

7.3.3. Eksenel yük düzeyine göre enerji sönümleme kapasiteleri

Betonarme kolonların eksenel yük düzeyinin artırılması durumunda numunelerin her ötelenme oranında sönümlenen enerji değerlerindeki artışlar veya azalışlar yüzdesel olarak hesaplanmıştır. Tablo 7.29'da son ötelenme oranı için kümülatif sönümlenen enerji değerlerindeki artışlar veya azalışlar toplu şekilde verilmiştir.

Tablo 7.29. Kümülatif enerji değerine eksenel yük düzeyinin etkisi.

Numune İsmi	Son ötelenme oranı kümülatif sönümlenen enerji (kNmm) (J)	Yüzdesel artış (%)
CL-R-0-015	65113.697	
CL-R-0-030	37741.823	-42.037
CL-CFRP-0-015	239683.432	
CL-CFRP-0-030	176763.616	-26.251
CL-PET-10-015	54941.799	
CL-PET-10-030	34343.937	-37.490
CL-PET-CFRP-10-015	199417.434	
CL-PET-CFRP-10-030	154847.392	-22.350

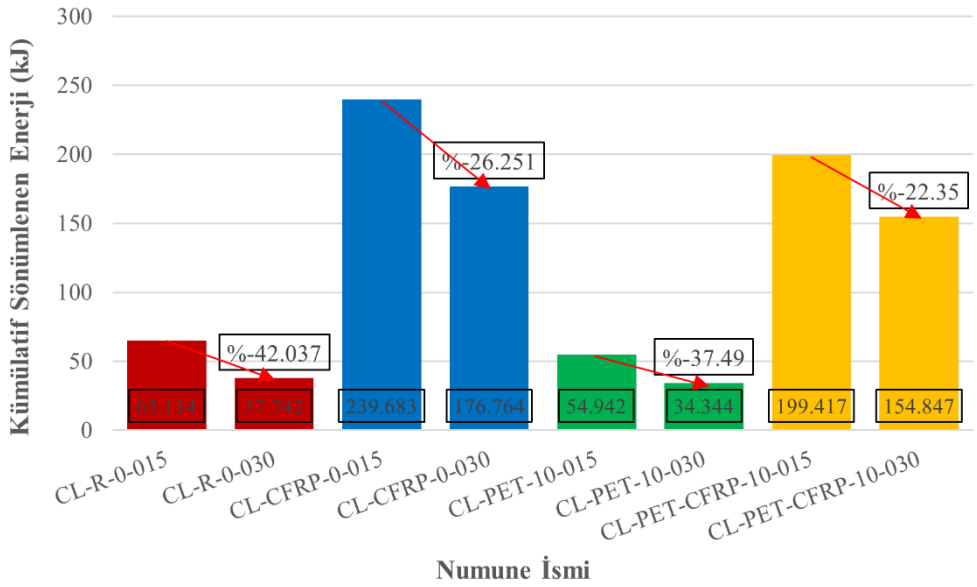
CL-R-0-015 numunesinin eksenel yük düzeyinin artırılması son ötelenme oranı için kümülatif sönümlenen enerji değerini %42.037 oranında düşürmüştür.

CL-CFRP-0-015 numunesinin eksenel yük düzeyinin artırılması son ötelenme oranı için kümülatif sönümlenen enerji değerini %26.251 oranında düşürmüştür.

CL-PET-10-015 numunesinin eksenel yük düzeyinin artırılması son ötelenme oranı için kümülatif sönümlenen enerji değerini %37.490 oranında düşürmüştür.

CL-PET-CFRP-10-015 numunesinin eksenel yük düzeyinin artırılması son ötelenme oranı için kümülatif sönümlenen enerji değerini %22.350 oranında düşürmüştür.

Eksenel yük düzeyine göre birbirinden farklılaşan numunelerin kümülatif enerji değerlerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Şekil 7.64'te verilmiştir.



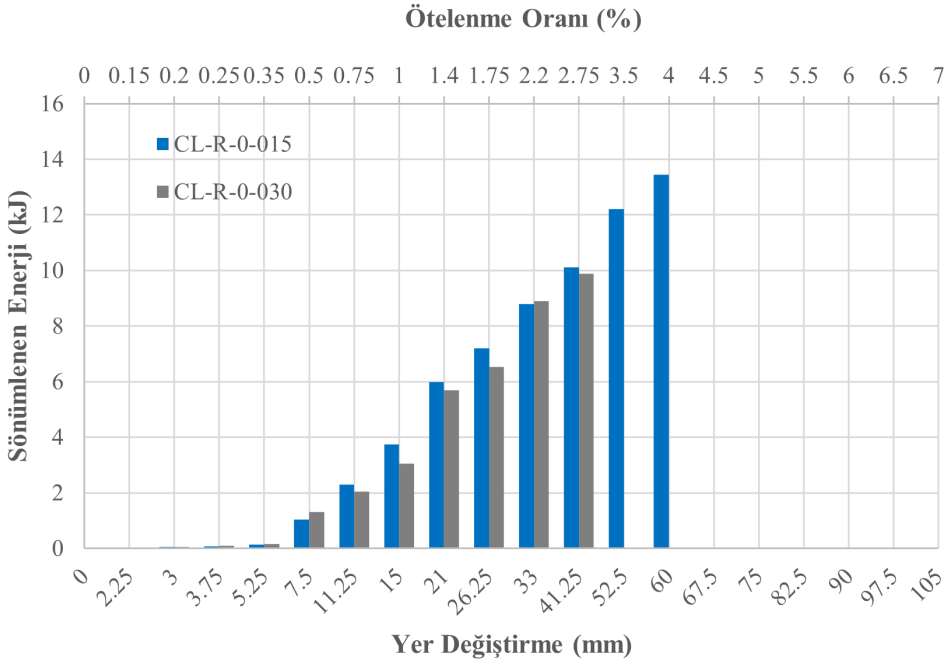
Şekil 7.64. Kümülatif enerji değerlerine eksenel yük düzeyinin etkisi.

CL-R-0-015 numunesinin eksenel yük düzeyinin artırılması sonucunda her ötelenme oranındaki sönümlenen enerji değeri ve kümülatif sönümlenen enerji değerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Tablo 7.30'da verilmiştir.

Tablo 7.30. CL-R-0-015 ve CL-R-0-030 enerji değerleri.

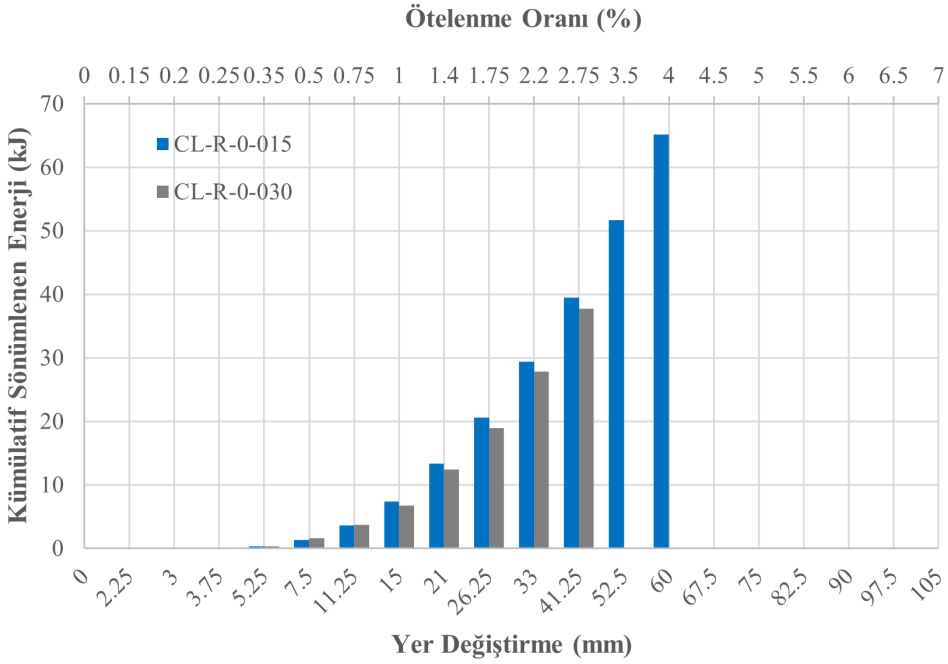
Ötelenme oranı (%)	CL-R-0-015 (E_{DR}) (J)	CL-R-0-030 (E_{DR}) (J)	Yüzdesel artış (%)	CL-R-0-015 (E_{cum}) (J)	CL-R-0-030 (E_{cum}) (J)	Yüzdesel artış (%)
0.15	15.602	16.160	3.576	15.602	16.160	3.576
0.2	48.030	50.908	5.992	63.631	67.067	5.400
0.25	77.008	83.772	8.783	140.639	150.839	7.252
0.35	144.508	156.578	8.353	285.147	307.417	7.810
0.5	1046.522	1317.695	25.912	1331.669	1625.112	22.036
0.75	2285.594	2050.376	-10.291	3617.263	3675.488	1.610
1	3746.099	3058.717	-18.349	7363.362	6734.205	-8.544
1.4	5978.395	5695.447	-4.733	13341.757	12429.652	-6.836
1.75	7198.896	6531.581	-9.270	20540.653	18961.233	-7.689
2.2	8801.718	8896.764	1.080	29342.371	27857.996	-5.059
2.75	10114.912	9883.827	-2.285	39457.283	37741.823	-4.348
3.5	12207.707	-	-	51664.990	-	-26.949
4	13448.707	-	-	65113.697	-	-42.037

Eksenel yük düzeyine göre farklılaşan CL-R-0-015 ve CL-R-0-030 numunelerinin sönümlenen enerjileri Şekil 7.65'te verilmiştir.



Şekil 7.65. CL-R-0-015 ve CL-R-0-030 sönümlenen enerji karşılaştırması.

CL-R-0-015 ve CL-R-0-030 numunelerinin kümülatif sönümlenen enerjileri Şekil 7.66'da verilmiştir.



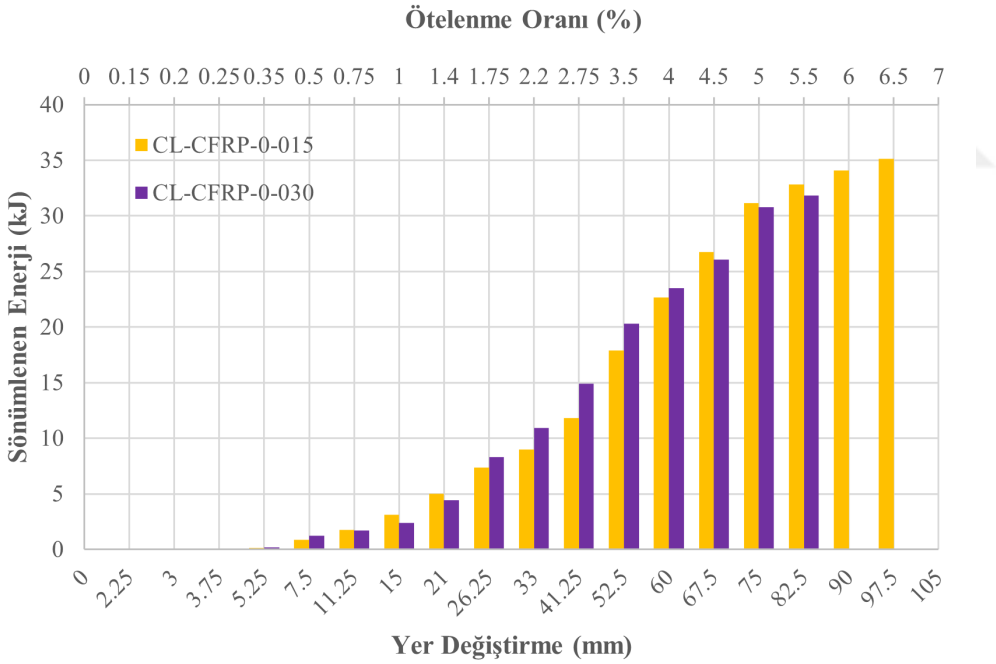
Şekil 7.66. CL-R-0-015 ve CL-R-0-030 kümülatif enerji karşılaştırması.

CL-CFRP-0-015 numunesinin eksenel yük düzeyinin artırılması sonucunda her ötelenme oranındaki sönümlenen enerji değeri ve kümülatif sönümlenen enerji değerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Tablo 7.31'de verilmiştir.

Tablo 7.31. CL-CFRP-0-015 ve CL-CFRP-0-030 enerji değerleri.

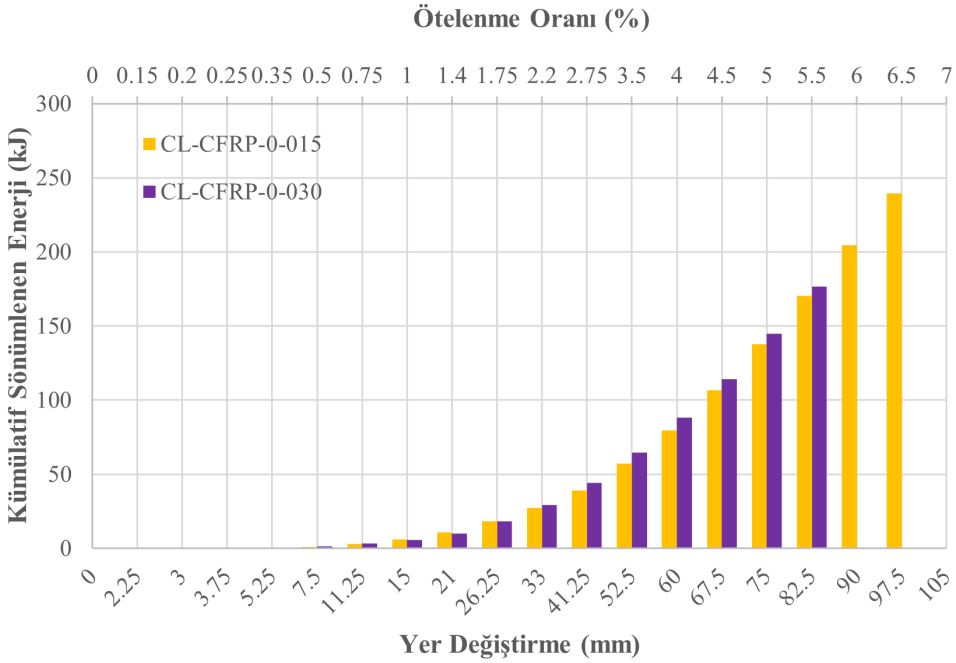
Ötelenme oranı (%)	CL-CFRP-0-015 (E_{DR}) (J)	CL-CFRP-0-030 (E_{DR}) (J)	Yüzdesel artış (%)	CL-CFRP-0-015 (E_{cum}) (J)	CL-CFRP-0-030 (E_{cum}) (J)	Yüzdesel artış (%)
0.15	16.038	15.896	-0.886	16.038	15.896	-0.886
0.2	48.341	51.060	5.626	64.379	66.957	4.004
0.25	78.267	85.263	8.938	142.647	152.219	6.711
0.35	146.346	165.462	13.063	288.992	317.682	9.927
0.5	857.170	1216.359	41.904	1146.162	1534.041	33.842
0.75	1759.746	1718.223	-2.360	2905.908	3252.264	11.919
1	3101.616	2407.727	-22.372	6007.524	5659.991	-5.785
1.4	4976.895	4426.885	-11.051	10984.419	10086.876	-8.171
1.75	7367.921	8315.586	12.862	18352.340	18402.463	0.273
2.2	8977.130	10946.979	21.943	27329.470	29349.442	7.391
2.75	11821.607	14898.132	26.025	39151.077	44247.573	13.018
3.5	17898.207	20295.944	13.397	57049.285	64543.517	13.136
4	22672.639	23520.650	3.740	79721.923	88064.166	10.464
4.5	26760.767	26085.953	-2.522	106482.691	114150.119	7.201
5	31165.365	30778.465	-1.241	137648.055	144928.584	5.289
5.5	32834.116	31835.032	-3.043	170482.171	176763.616	3.685
6	34095.588	-	-	204577.759	-	-13.596
6.5	35105.672	-	-	239683.432	-	-26.251

Eksenel yük düzeyine göre farklılaşan CL-CFRP-0-015 ve CL-CFRP-0-030 numunelerinin sönümlenen enerjileri Şekil 7.67'de verilmiştir.



Şekil 7.67. CL-CFRP-0-015 ve CL-CFRP-0-030 sönümlenen enerji karşılaştırması.

CL-CFRP-0-015 ve CL-CFRP-0-030 numunelerinin kümülatif sönümlenen enerjileri Şekil 7.68'de verilmiştir.



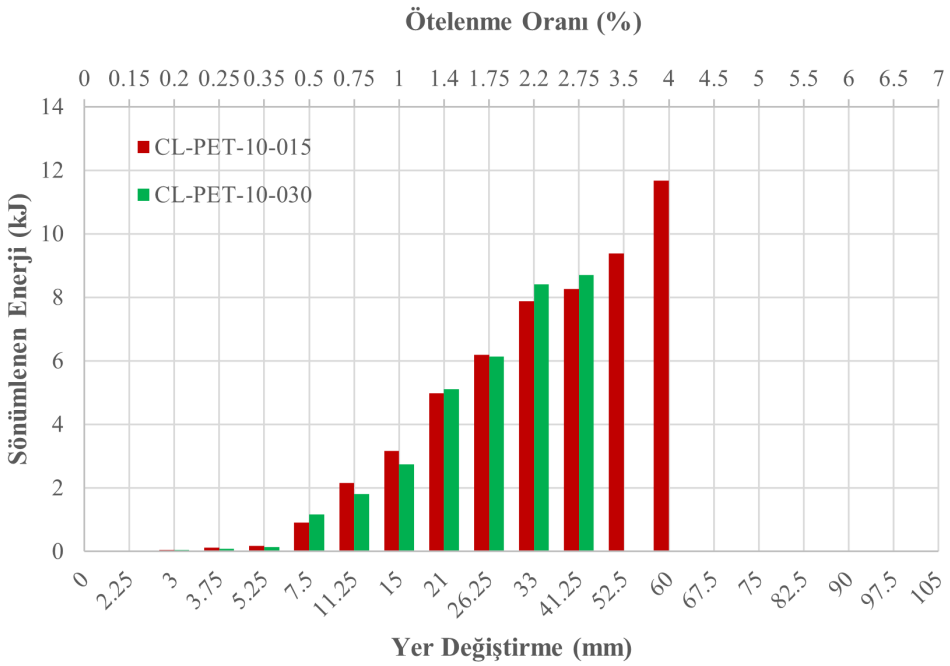
Şekil 7.68. CL-CFRP-0-015 ve CL-CFRP-0-030 kümülatif enerji karşılaştırması.

CL-PET-10-015 numunesinin eksenel yük düzeyinin artırılması sonucunda her ötelenme oranındaki sönümlenen enerji değeri ve kümülatif sönümlenen enerji değerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Tablo 7.32'de verilmiştir.

Tablo 7.32. CL-PET-10-015 ve CL-PET-10-030 enerji değerleri.

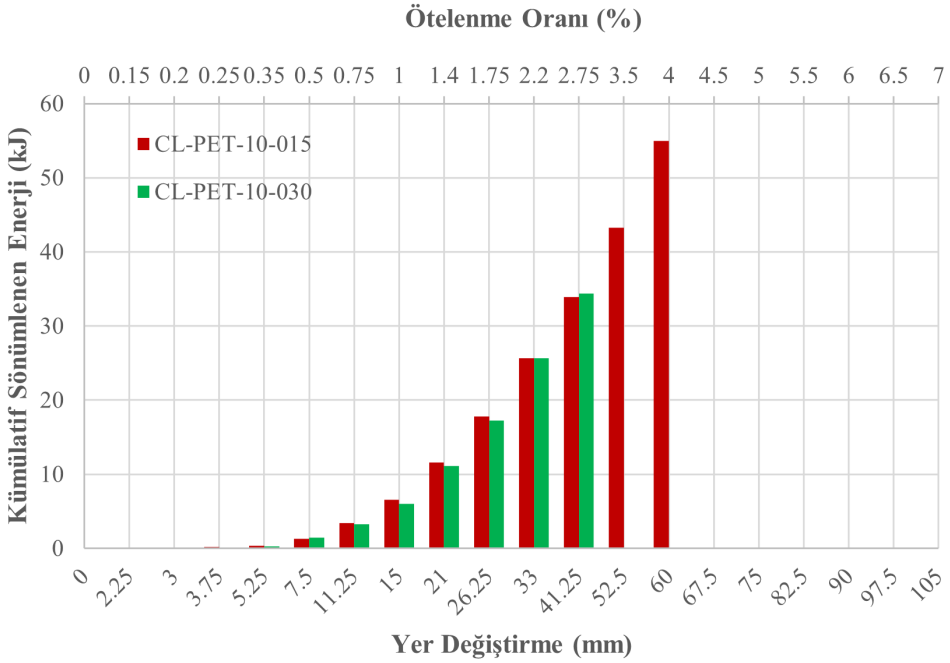
Ötelenme oranı (%)	CL-PET-10-015 (E_{DR}) (J)	CL-PET-10-030 (E_{DR}) (J)	Yüzdesel artış (%)	CL-PET-10-015 (E_{cum}) (J)	CL-PET-10-030 (E_{cum}) (J)	Yüzdesel artış (%)
0.15	14.287	12.625	-11.633	14.287	12.625	-11.633
0.2	52.324	44.253	-15.425	66.611	56.878	-14.612
0.25	122.949	74.335	-39.541	189.561	131.212	-30.781
0.35	180.334	139.170	-22.827	369.895	270.382	-26.903
0.5	900.133	1163.468	29.255	1270.028	1433.850	12.899
0.75	2157.815	1814.474	-15.911	3427.843	3248.324	-5.237
1	3169.865	2740.567	-13.543	6597.708	5988.891	-9.228
1.4	4978.257	5111.401	2.674	11575.965	11100.292	-4.109
1.75	6195.727	6129.657	-1.066	17771.692	17229.949	-3.048
2.2	7867.018	8408.826	6.887	25638.711	25638.775	0.000
2.75	8254.139	8705.162	5.464	33892.849	34343.937	1.331
3.5	9373.177	-	-	43266.026	-	-20.621
4	11675.773	-	-	54941.799	-	-37.490

Eksenel yük düzeyine göre farklılaşan CL-PET-10-015 ve CL-PET-10-030 numunelerinin sönümlenen enerjileri Şekil 7.69'da verilmiştir.



Şekil 7.69. CL-PET-10-015 ve CL-PET-10-030 sönümlenen enerji karşılaştırması.

CL-PET-10-015 ve CL-PET-10-030 numunelerinin kümülatif sönümlenen enerjileri Şekil 7.70'te verilmiştir.



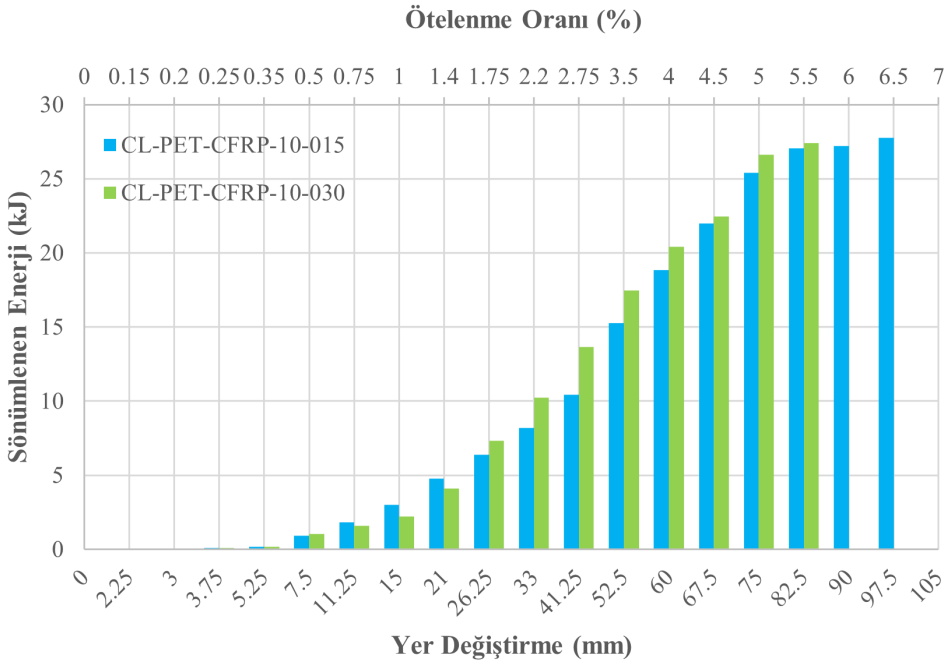
Şekil 7.70. CL-PET-10-015 ve CL-PET-10-030 kümülatif enerji karşılaştırması.

CL-PET-CFRP-10-015 numunesinin eksenel yük düzeyinin artırılması sonucunda her ötelenme oranındaki sönümlenen enerji değeri ve kümülatif sönümlenen enerji değerinin yüzdesel olarak artış veya azalışları Tablo 7.33'te verilmiştir.

Tablo 7.33. CL-PET-CFRP-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-030 enerji değerleri.

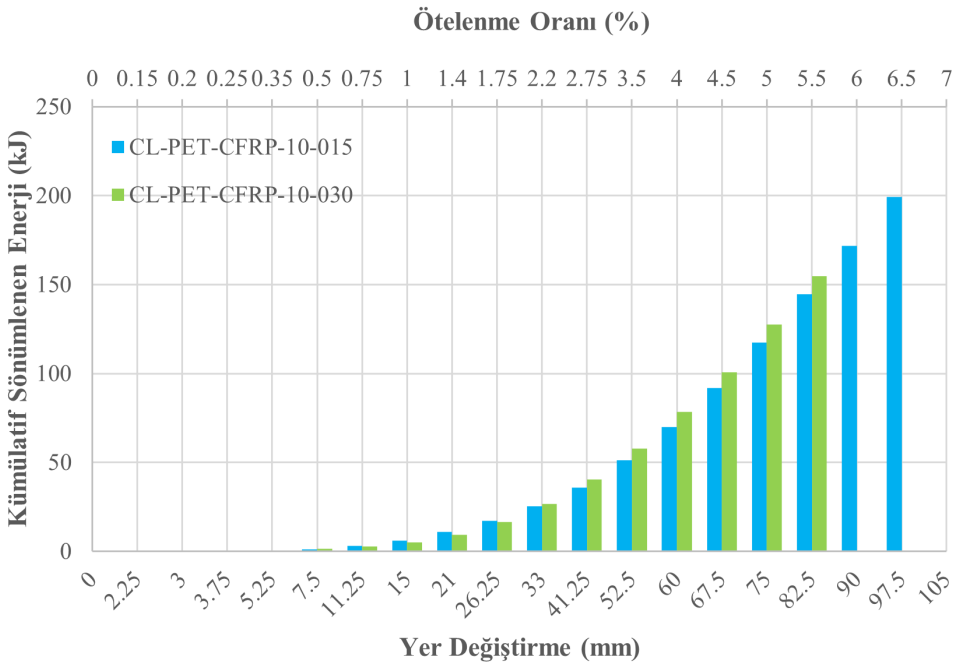
Ötelenme oranı (%)	CL-PET-CFRP-10-015 (E_{DR}) (J)	CL-PET-CFRP-10-030 (E_{DR}) (J)	Yüzdesel artış (%)	CL-PET-CFRP-10-015 (E_{cum}) (J)	CL-PET-CFRP-10-030 (E_{cum}) (J)	Yüzdesel artış (%)
0.15	15.666	15.376	-1.854	15.666	15.376	-1.854
0.2	50.988	49.243	-3.422	66.654	64.619	-3.054
0.25	104.513	83.068	-20.519	171.167	147.687	-13.718
0.35	166.428	160.188	-3.749	337.595	307.874	-8.804
0.5	917.989	1033.334	12.565	1255.583	1341.208	6.820
0.75	1830.807	1583.985	-13.482	3086.391	2925.193	-5.223
1	2994.134	2200.022	-26.522	6080.525	5125.216	-15.711
1.4	4780.864	4097.909	-14.285	10861.389	9223.125	-15.083
1.75	6398.771	7333.654	14.610	17260.160	16556.779	-4.075
2.2	8189.458	10251.874	25.184	25449.619	26808.653	5.340
2.75	10429.683	13671.635	31.084	35879.302	40480.289	12.824
3.5	15277.056	17458.147	14.277	51156.358	57938.436	13.258
4	18860.484	20419.895	8.268	70016.842	78358.331	11.914
4.5	21991.602	22450.515	2.087	92008.444	100808.846	9.565
5	25395.110	26615.089	4.804	117403.555	127423.935	8.535
5.5	27051.678	27423.457	1.374	144455.232	154847.392	7.194
6	27199.067	-	-	171654.300	-	-9.791
6.5	27763.134	-	-	199417.434	-	-22.350

Eksenel yük düzeyine göre farklılaşan CL-PET-CFRP-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-030 numunelerinin sönümlenen enerjileri Şekil 7.71'de verilmiştir.



Şekil 7.71. CL-PET-CFRP-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-030 sönümlenen enerji karşılaştırması.

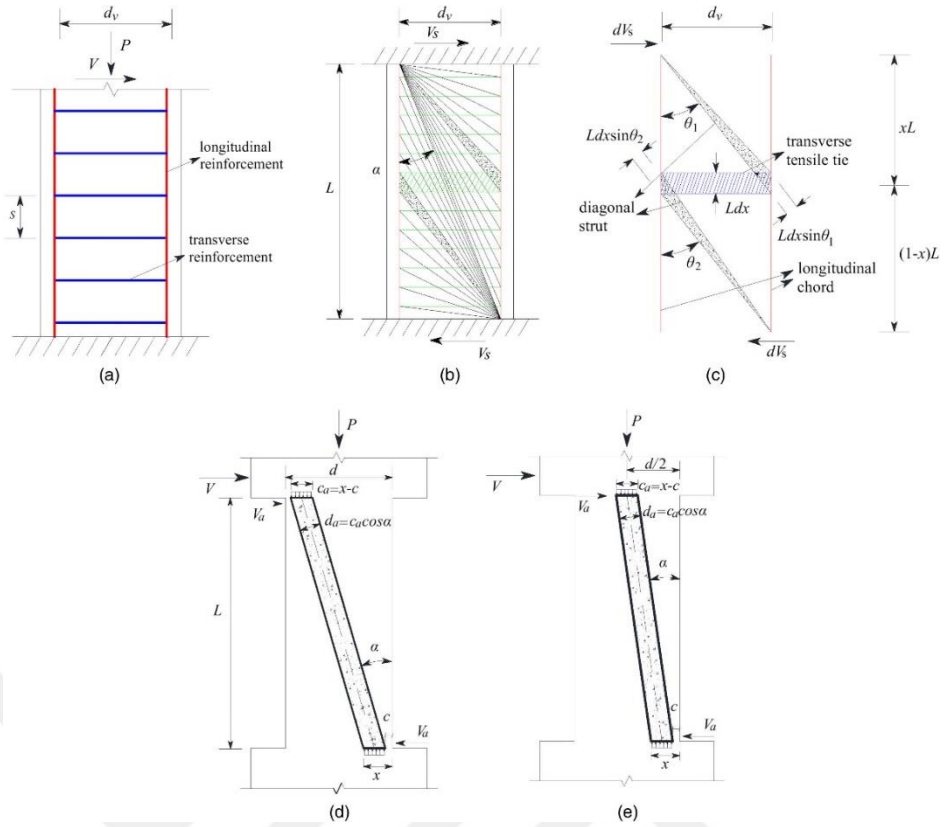
CL-PET-CFRP-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-030 numunelerinin kümülatif sönümlenen enerjileri Şekil 7.72'de verilmiştir.



Şekil 7.72. CL-PET-CFRP-10-015 ve CL-PET-CFRP-10-030 kümülatif enerji karşılaştırması.

7.4. Maksimum Kesme Kuvvetinin Önerilen Modeller ile Uyumu

Betonarme elemanların kesme dayanımı çok sayıda faktörden etkilenebilir. Kesme mekanizmaları, malzeme özellikleri, geometrik boyutlar ve dış yükler bunlardan bazılarıdır. Bu faktörlerin arasından kesme mekanizmaları, kesme dayanımı modeli geliştirmek için önemlidir. Eksenel basınç kuvveti ve yatay kesme kuvvetinin birleşik etkilerine maruz kalan betonarme kolonun kesme mekanizmaları, Şekil 7.73'te gösterildiği gibi değişken eğimli kafes-kemer modeli (Pan ve Li, 2013) kullanılarak tanımlanabilir (Yu ve ark, 2019). Şekil 7.73 içerisinde b ve c kısımlarında gösterildiği gibi, değişken açılı kafes modeli, çatlaklar arasında betondan oluşan diyagonal etkiler, boyuna donatılarla oluşturulan boyuna etkiler ve enine donatılarla oluşturulan enine etkilerden oluşur. Bununla birlikte betonarme kolonun kemer modeli, Şekil 7.73 içerisinde d ve e kısımlarında gösterildiği gibi, üstteki basınç bölgesinden alttaki bölgeye doğru yönlendirilmiş tek bir basınç hattı etkisi olarak tanımlanabilir.



Şekil 7.73. Değişken açılı kafes-kemer modeli: (a) betonarme kolonun konfigürasyonu, (b) değişken açılı çatlak deseni, (c) değişken açılı kafesin diferansiyel elemanı, (d) ankastre-ankastre uçlu kolonlar için kemer modeli, (e) ankastre-sabit uçlu kolonlar için kemer modeli (Yu ve ark, 2019).

Değişken açılı kafes-kemer modeline göre, betonarme kolonun kesme dayanımı Denklem 7.1'de verilen üç kuvvet tarafından sağlanır.

$$V_n = V_c + V_s + V_a \tag{7.1}$$

Denklem 7.1'de V_c ve V_s kafes modeli temsil etmekte olup, V_c kesme dayanımına betonun etkisini, V_s kesme dayanımına enine donatının etkisini ifade eder. Kemer modeli temsil etmekte olan V_a ise kemer hareketinin kesme dayanımına etkisini ifade eder. Değişken açılı kafes-kemer modeline göre, betonun diyagonal çatlak arayüzü boyunca sağladığı kesme dayanımı katkısı Denklem 7.2'de olduğu gibi ifade edilebilir (Bentz ve ark, 2006; Pan ve Li, 2013).

$$V_c = \beta b d_v \sqrt{f_c'} \tag{7.2}$$

Denklem 7.2'de β kafes modelinde kesme dayanımına beton katkısını ifade eden katsayıyı, b kolon kesitinin genişliğini, d_v kolonun etkin kesme derinliğini, f_c' betonun basınç dayanımını temsil etmektedir. Kolonun etkin kesme derinliği d_v kolon kesitinin etkin derinliği olan d değerinin 0.9 katından düşük bir değer olmalıdır ($d_v \leq 0.9d$).

Kafes modelinde kesme dayanımına beton katkısını ifade eden katsayı olan β Denklem 7.3'te verildiği gibi hesaplanmaktadır (Bentz ve ark, 2006; Pan ve Li, 2013).

$$\beta = \frac{0.40}{1 + 1500\varepsilon_x} \times \frac{1300}{1000 + s_{ze}} \tag{7.3}$$

Denklem 7.3'te ε_x kolon kesitinin orta derinliğindeki boyuna gerinimi, s_{ze} kolonun etkin çatlak aralığını temsil etmekte olup s_{ze} 300 mm olarak kabul edilebilir (CSA, 2004).

Kolon kesitinin orta derinliğindeki boyuna gerinimi ifade eden ε_x Denklem 7.4'te verildiği gibi hesaplanabilir (Pan ve Li, 2013).

$$\varepsilon_x = \frac{\frac{(V_c + V_s)L}{\zeta_1 d_v} - 0.5P + 0.5(V_c + V_s)\cot\theta}{2E_s A_s} \tag{7.4}$$

Denklem 7.4'te ε_x hesaplanırken ζ_1 sınır koşuluna bağlı bir katsayıdır. Ankastre-ankastre sınır koşulu için ζ_1 2 değerini alır. Ankastre-sabit sınır koşulu için ζ_1 1 değerini alır. Denklem 7.4'te E_s çelik donatının elastisite modülünü, A_s çekme donatısı alanını, P kolona uygulanan eksenel kuvveti, θ kolonun boyuna eksenine göre çatlamış betonun açısını temsil etmektedir.

Kolonun boyuna eksenine göre çatlamış betonun açısı θ Denklem 7.5'te verildiği gibi hesaplanabilir (Kim ve Mander, 2007).

$$\theta = tan^{-1}\left(\frac{0.6\rho_h\gamma_E + \zeta_2\frac{\rho_h b d_v}{\rho_{sl}A_g}}{1 + 4\rho_h\gamma_E}\right)^{1/4} \tag{7.5}$$

Denklem 7.5'te θ hesaplanırken ζ_2 sınır koşuluna bağlı bir katsayıdır. Ankastre-ankastre sınır koşulu için ζ_2 0.57 değerini alır. Ankastre-sabit sınır koşulu için ζ_2 1.57 değerini alır. Denklem 7.5'te ρ_h enine donatının hacimsel oranını, γ_E çelik donatının

elastisite modülünün betonun elastisite modülüne oranını ($\gamma_E = E_s/E_c$), ρ_{sl} boyuna donatının hacimsel oranını, A_g kolon kesitinin brüt alanını temsil etmektedir.

Değişken açılı kafes-kemer modeline göre, donatının sağladığı kesme dayanımı katkısı Denklem 7.6'da olduğu gibi ifade edilebilir (Pan ve Li, 2013; Yu ve ark, 2019).

$$V_s = \frac{A_{sh} f_{yh} d_v}{s} \cot\theta \tag{7.6}$$

Denklem 7.6'da s enine donatı aralığını, A_{sh} s aralığında enine donatı kesit alanını, f_{yh} enine donatının akma dayanımını temsil etmektedir.

Değişken açılı kafes-kemer modeline göre, kemer hareketinin sağladığı kesme dayanımı katkısı Denklem 7.7'de olduğu gibi ifade edilebilir (Pan ve Li, 2013; Yu ve ark, 2019).

$$V_a = \frac{K_a}{K_t}(V_c + V_s) \tag{7.7}$$

Denklem 7.7'de K_a kemer modelin kesme rijitliğini, K_t kafes modelin kesme rijitliğini temsil etmektedir.

Kafes modelin kesme rijitliği K_t Denklem 7.8'de verildiği gibi hesaplanabilir (Kim ve Mander, 1999; Pan ve Li, 2013; Yu ve ark, 2019).

$$K_t = \frac{\rho_h \gamma_E \cot^2\theta}{1 + 4\rho_h \gamma_E (1 + 0.39\cot^2\theta)^2} E_c b d_v \tag{7.8}$$

Kemer modelin kesme rijitliği K_a kemer modelinin deformasyon uyumluluğu koşuluna dayanarak Denklem 7.9'da verildiği gibi hesaplanabilir (Pan ve Li, 2013; Yu ve ark, 2019).

$$K_a = E_c b c_a \sin^2\alpha \cos^2\alpha \tag{7.9}$$

Denklem 7.9'da α kemer eğimini ifade etmektedir. Ankastre-ankastre sınır koşulu ve çift eğilme için $\alpha = (h - x)/L$ değerini alır. Ankastre-sabit sınır koşulu ve tek eğilme için $\alpha = (h - x)/2L$ değerini alır. Burada h betonarme kolunun kesit yüksekliğini, x tarafsız eksen derinliğini, L betonarme kolonun yüksekliğini temsil etmektedir. Denklem 7.9'da yer alan c_a kemer modelinde etkin destek derinliğini temsil etmekte

olup $c_a = x - c$ şeklinde hesaplanabilir. Burada c beton örtü kalınlığını temsil etmektedir.

Tarafsız eksen derinliği x Denklem 7.10'da verildiği gibi hesap edilebilir (Pan ve Li, 2013; Paulay ve Priestley, 1992; Yu ve ark, 2019).

$$x = \left(0.25 + 0.85\frac{P}{f_c' A_g}\right)h \tag{7.10}$$

Geçmişten günümüze kadar betonarme elemanların yukarıda bahsedilen kesme mekanizmalarına dayanan çok sayıda kesme dayanımı modeli dünya çapındaki kodlarda ve literatürde bulunmaktadır. Bunlar arasından betonarme kolonlar için önerilmiş birkaç tipik kesme dayanımı modelinden aşağıda bahsedilmiş ve Tablo 7.34'te toplu şekilde verilmiştir.

Priestley ve ark. (1994) modeli, eksenel yük katkısını göz önünde bulundurarak sabit eğimli kafes modeline benzer şekilde önerilmiştir. Kolon eksenel kuvvetinin eğimli bir hat oluşturarak kemer hareketi ile kesme dayanımını arttırdığı düşünülmüştür. Bu model, kesme dayanımının beton, enine donatı ve kemer mekanizması katkılarından oluştuğunu varsaymakta ancak kafes-kemer modelinin deformasyon uyumunu göz ardı etmekte ve yer değiştirme süneklik katsayısının ampirik bir düzeltme katsayısı ile tanıtılmasını gerektirmektedir. Bununla birlikte model betonarme kolunun kritik çatlak açısının 30° olduğunu varsaymıştır, bu da genellikle kritik çatlak açısının hafife alındığını göstermiştir (Yu ve ark, 2019). Denklem 7.11'de Priestley ve ark. (1994) modeli verilmiştir. Priestley ve ark. (1994) modelinde sünekliğe bağlı etki ile ilgili denklemler Denklem 7.12, Denklem 7.13 ve Denklem 7.14'te verilmiştir.

$$V_n = V_c + V_s + V_p = k\left(0.8A_g\right)\sqrt{f_c'} + \frac{A_{sh} f_{yh} D'}{s} cot30° + \frac{h - x}{2a} P \tag{7.11}$$

$$k = 0.29, (\mu \leq 2) \tag{7.12}$$

$$k = 0.29 - \left(\left(\frac{\mu - 2}{2}\right) * 0.19\right), (2 < \mu < 4) \tag{7.13}$$

$$k = 0.1, (\mu \geq 4) \tag{7.14}$$

Denklem 7.11'de V_p kesme dayanımına eksenel yük tarafından sağlanan katkıyı, k yer değiştirme sünekliği faktörünü, D' kolon kesitindeki en dış enine donatıların merkezleri arasındaki mesafeyi, a kesme açıklığını temsil etmektedir. Kesme açıklığı olan a ankastre-ankastre sınır koşulu ve çift eğilme için $\alpha = L/2$ değerini alırken ankastre-sabit sınır koşulu ve tek eğilme için $\alpha = L$ değerini alır.

FEMA 273 modeli (FEMA, 1997), kesme dayanımının betonun ve enine donatıların katkısından oluştuğunu varsayan kafes modeline dayanarak geliştirilmiştir. Ancak bu model betonarme kolonların en-boy oranının, kritik çatlak açısının ve kemer mekanizmasının kesme dayanımı üzerindeki etkilerini göz ardı etmiştir (Yu ve ark, 2019). Denklem 7.15'te FEMA 273 modeli verilmiştir. FEMA 273 modeli içerisinde sünekliğe bağlı etki ile ilgili denklemler Denklem 7.16 ve Denklem 7.17'de verilmiştir.

$$V_n = V_c + V_s = 0.29\left(k + \frac{P}{13.8A_g}\right)bd\sqrt{f_c'} + \frac{A_{sh}f_{yh}d}{s} \tag{7.15}$$

$$k = 1, (\mu < 2) \tag{7.16}$$

$$k = 0, (\mu \geq 2) \tag{7.17}$$

CSA modeli (CSA, 2004), kesme dayanımının betonun ve enine donatıların katkısından oluştuğunu varsayan değiştirilmiş basınç alanı teorisine göre geliştirilmiştir. Ancak, bu model eksenel yük oranı, en-boy oranı ve yer değiştirme sünekliğinin etkisini göz ardı etmiştir (Yu ve ark, 2019). Denklem 7.18'de CSA modeli (CSA, 2004) verilmiştir.

$$V_n = min\left(\beta\sqrt{f_c'}bd_v + \frac{A_{sh}f_{yh}d}{s}cot\theta; 0.25f_c'bd\right) \tag{7.18}$$

Sezen ve Moehle (2004) modeli, en-boy oranı ve yer değiştirme sünekliğinin etkilerini göz önünde bulundurarak sabit eğimli kafes benzeri model teorisine ve Mohr dairesi yaklaşımına göre önerilmiştir. Ancak model kritik çatlak açısının 45° olduğunu varsayarak, boyuna donatı oranı, enine donatı oranı ve eksenel yük oranı gibi çeşitli önemli faktörlerin kritik çatlak açısı üzerindeki etkilerini göz ardı etmiştir (Yu ve ark, 2019). Denklem 7.19'da Sezen ve Moehle (2004) modeli verilmiştir. Sezen ve Moehle

(2004) modelinde sünekliğe bağlı etki ile ilgili denklemler Denklem 7.20, Denklem 7.21 ve Denklem 7.22'de verilmiştir.

$$V_n = V_c + V_s = k\left(\frac{0.5\sqrt{f_c'}}{a/d}\sqrt{1+\frac{P}{0.5\sqrt{f_c'}A_g}}0.8A_g\right) + k\left(\frac{A_{sh}f_{yh}d}{s}\right) \quad (7.19)$$

$$k = 1, (\mu \leq 2) \quad (7.20)$$

$$k = 1.15 - 0.075\mu, (2 < \mu < 6) \quad (7.21)$$

$$k = 0.7, (\mu \geq 6) \quad (7.22)$$

ACI 318 modeli (ACI, 2011), FEMA 273 modelinde olduğu gibi kesme dayanımının betonun ve enine donatıların katkısından oluştuğunu varsayan kafes modeline dayanarak geliştirilmiştir. Ancak bu model betonarme kolonların en-boy oranının, kritik çatlak açısının ve kemer mekanizmasının kesme dayanımı üzerindeki etkilerini göz ardı etmiştir (Yu ve ark, 2019). Denklem 7.23'te ACI 318 (ACI 2011) modeli verilmiştir.

$$V_n = V_c + V_s = 0.166\left(1+\frac{P}{13.8A_g}\right)bd\sqrt{f_c'} + \frac{A_{sh}f_{yh}d}{s} \quad (7.23)$$

Pan ve Li (2013) modeli, kafes-kemer modelinin deformasyon uyumluluğu koşulunu hesaba katarak sabit eğimli kafes-kemer modeli kullanılarak önerilmiştir. Ancak Pan ve Li (2013) modelinde, eksenel yük oranının betonarme kolonun kritik çatlak açısı üzerindeki etkisi göz ardı edilmiş ve yer değiştirme sünekliği için deneysel bir düzeltme katsayısının tanıtılması gerekmiştir (Yu ve ark, 2019). Denklem 7.24'te Pan ve Li (2013) modeli verilmiştir. Pan ve Li (2013) modelinde sünekliğe bağlı etki ile ilgili denklemler Denklem 7.25, Denklem 7.26 ve Denklem 7.27'de verilmiştir.

$$V_n = V_c + V_s + V_a = k\left(1+\frac{K_a}{K_t}\right)\beta\sqrt{f_c'}bd_v + \left(1+\frac{kK_a}{K_t}\right)\left(\frac{A_{sh}f_{yh}d_v}{s}cot\theta\right) \quad (7.24)$$

$$k = 1, (\mu < 3) \quad (7.25)$$

$$k = 1.225 - 0.075\mu, (3 \leq \mu \leq 7) \tag{7.26}$$

$$k = 0.7, (\mu > 7) \tag{7.27}$$

Betonarme kolonların tekrarlı yükler altında taşıyabilecekleri maksimum yüklere dair literatürde ve çeşitli ülkelerin yönetmeliklerinde yer alan daha önce önerilmiş olan birkaç tipik model yukarıda artılarıyla ve eksileriyle tanıtılmıştır.

Betonarme kolonlar için önerilmiş birkaç tipik kesme dayanımı modeli Tablo 7.34'te toplu şekilde verilmiştir.

Tablo 7.34. Kesme dayanımı modelleri.

Yıl	Referans	Model
1994	Priestley ve ark.	$V_n = V_c + V_s + V_p = k(0.8A_g)\sqrt{f_c'} + \frac{A_{sh}f_{yh}D'}{s}cot30° + \frac{h-c}{2a}P$ $k = 0.29, (\mu \leq 2)$ $k = 0.29 - \left(\left(\frac{\mu-2}{2}\right) * 0.19\right), (2 < \mu < 4)$ $k = 0.1, (\mu \geq 4)$
1997	FEMA 273	$V_n = V_c + V_s = 0.29\left(k + \frac{P}{13.8A_g}\right)bd\sqrt{f_c'} + \frac{A_{sh}f_{yh}d}{s}$ $k = 1, (\mu < 2)$ $k = 0, (\mu \geq 2)$
2004	CSA	$V_n = min\left(\beta\sqrt{f_c'}bd_v + \frac{A_{sh}f_{yh}d}{s}cot\theta; 0.25f_c'bd\right)$
2004	Sezen ve Moehle	$V_n = V_c + V_s = k\left(\frac{0.5\sqrt{f_c'}}{a/d}\sqrt{1 + \frac{P}{0.5\sqrt{f_c'}A_g}}0.8A_g\right) + k\left(\frac{A_{sh}f_{yh}d}{s}\right)$ $k = 1, (\mu \leq 2)$ $k = 1.15 - 0.075\mu, (2 < \mu < 6)$ $k = 0.7, (\mu \geq 6)$
2011	ACI 318	$V_n = V_c + V_s = 0.166\left(1 + \frac{P}{13.8A_g}\right)bd\sqrt{f_c'} + \frac{A_{sh}f_{yh}d}{s}$
2013	Pan ve Li	$V_n = V_c + V_s + V_a = k\left(1 + \frac{K_a}{K_t}\right)\beta\sqrt{f_c'}bd_v + \left(1 + \frac{kK_a}{K_t}\right)\left(\frac{A_{sh}f_{yh}d_v}{s}cot\theta\right)$ $k = 1, (\mu < 3)$ $k = 1.225 - 0.075\mu, (3 \leq \mu \leq 7)$ $k = 0.7, (\mu > 7)$

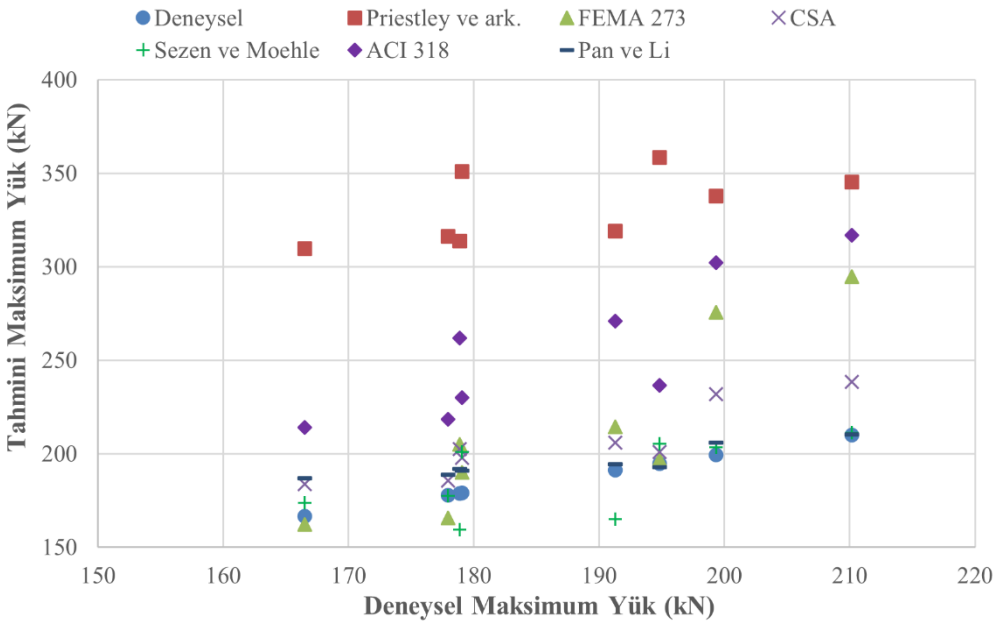
Tablo 7.34'te verilen modellere gerekli parametreler yazılarak öne sürmüş oldukları tahmini maksimum kesme kuvveti değerleri bulunmuştur. Yapılan hesaplamalar sonucunda, her bir modelin kesme kuvveti kapasitesine ilişkin tahminleri elde edilmiştir.

Tablo 7.35'te deneyi tamamlanan betonarme kolon numunelerinin deneysel olarak taşıyabildikleri maksimum yük değerleri ile birlikte daha önce önerilmiş olan modellerin deneyi yapılan betonarme kolonların taşıyabilecekleri maksimum yatay yükleri hakkındaki yaptıkları tahmin sonuçları verilmiştir.

Tablo 7.35. Tüm kolon numunelerin kesme dayanımları ve modellerin tahminleri.

Numune İsmi	Deneysel sonuç	Priestley ve ark.	FEMA 273	CSA	Sezen ve Moehle	ACI 318	Pan ve Li
CL-R-0-015	177.943	316.133	165.709	185.631	177.600	218.552	188.699
CL-R-0-030	194.833	358.428	196.947	200.818	205.273	236.433	192.981
CL-CFRP-0-015	191.287	319.203	214.535	205.823	165.027	270.897	194.472
CL-CFRP-0-030	210.148	345.392	294.599	238.311	211.246	316.727	210.303
CL-PET-10-015	166.510	309.558	162.232	183.889	173.898	214.008	186.938
CL-PET-10-030	179.061	350.881	189.993	197.765	200.908	229.899	190.926
CL-PET-CFRP-10-015	178.863	313.694	205.105	202.521	159.370	261.793	191.912
CL-PET-CFRP-10-030	199.321	337.784	275.740	231.770	203.511	302.225	206.078

Şekil 7.74'te tüm kolon numunelerin maksimum kesme kuvvetleri ve modellerin tahminleri verilmiştir.



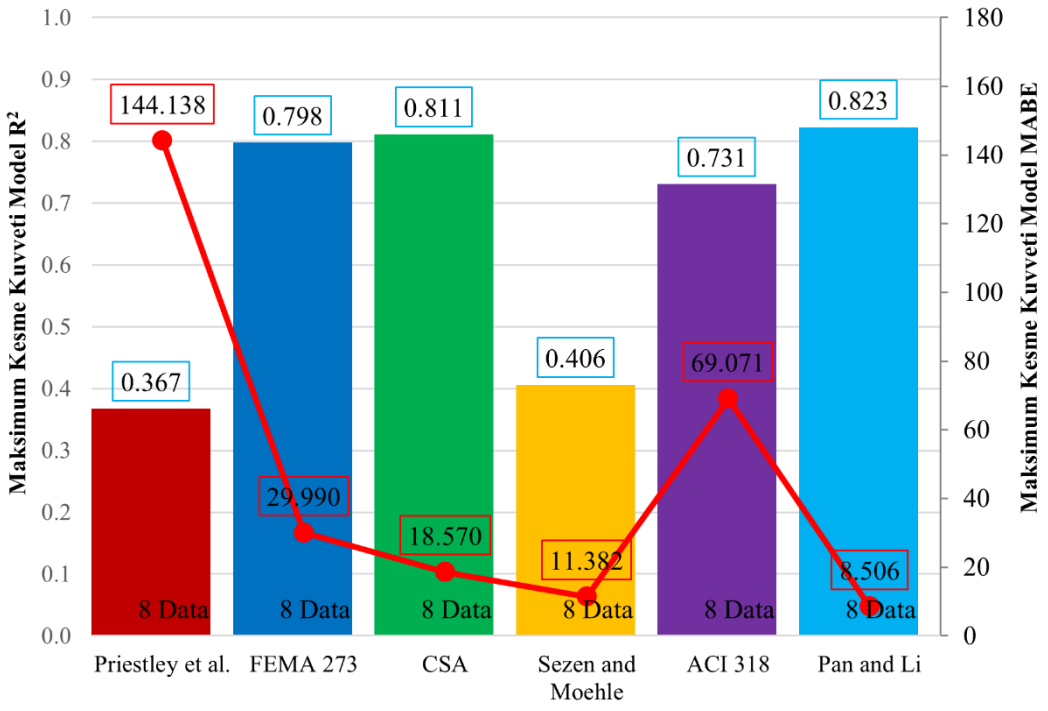
Şekil 7.74. Tüm kolon numunelerin maksimum kesme kuvvetleri ve modellerin tahminleri.

Modellerin tahminleri istatiksel metrikler aracılığıyla analiz edilmiş ve tüm betonarme kolonların deneysel verileri ile uyumu irdelenmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 7.36'da verilmiştir.

Tablo 7.36. Tüm kolon numunelerin kesme dayanımları için modellerin performansı.

Yıl	Referans	Veri sayısı	R^2	MABE	MAPE
1994	Priestley ve ark.	8	0.367	144.138	77.446
1997	FEMA 273	8	0.798	29.990	15.248
2004	CSA	8	0.811	18.570	9.848
2004	Sezen ve Moehle	8	0.406	11.382	6.180
2011	ACI 318	8	0.731	69.071	36.427
2013	Pan ve Li	8	0.823	8.506	4.789

Tüm numunelerin deney sonuçları dikkate alındığında yapılan metrik analizler sonucunda R^2 değerlerindeki karşılaştırmalarda Pan ve Li (2013) modeli 0.823 R^2 değerleri ile daha başarılı bir performans sergilerken, Priestley ve ark. (1994) modeli 0.367 R^2 değeri ile daha başarısız bir performans sergilemiştir. Bununla birlikte Pan ve Li (2013) modeli 8.506 MABE ve 4.789 MAPE değerleri ile daha yakın tahminler verirken, Priestley ve ark. (1994) modeli 144.138 MABE ve 77.446 MAPE değerleri ile doğruluğu düşük sonuçlar vermiştir. Şekil 7.75'te önerilen modellerin R^2 ve MABE değerlerinden oluşan grafik verilmiştir.



Şekil 7.75. Tüm kolon numuneleri için kesme dayanımı modellerinin performansı.

Önerilmiş modellerin performansları kolon numunelerde PET ikamesinin varlığı, karbon lifli polimer sargının kullanımı ve eksenel yük değeri gibi farklılar için ayrı ayrı olarak değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

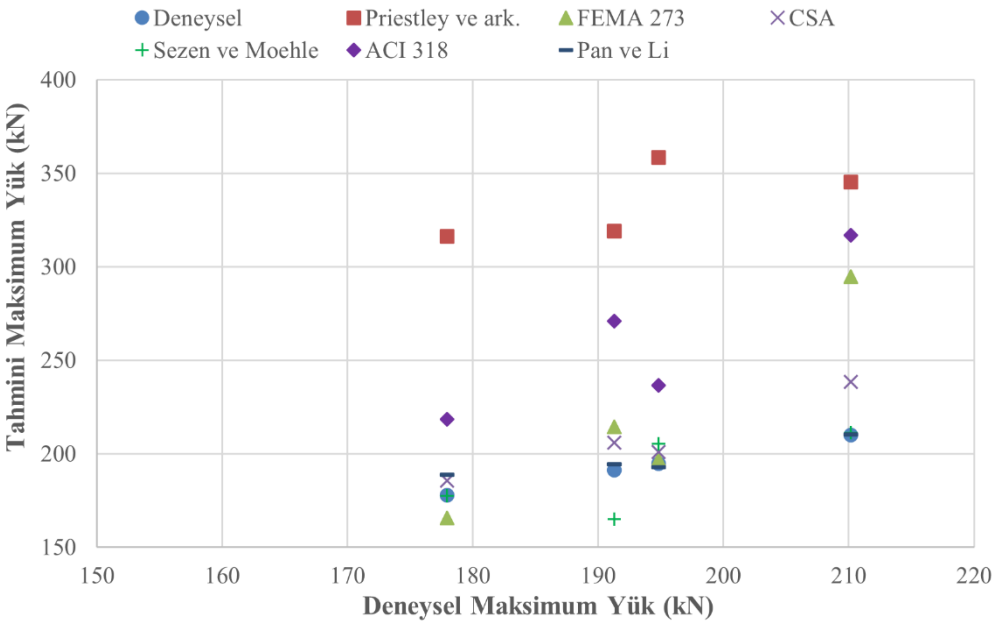
7.4.1. PET ikamesinin varlığına göre modellerin uyumu

Betonarme kolonların betonunda PET ikamesi yapılmayan numuneler için modellerin tahmini maksimum kesme kuvveti değerleri bulunmuştur. Tablo 7.37'de PET ikamesi yapılmayan betonarme kolonların taşıdıkları maksimum yükler ve önerilen modellerin tahminleri verilmiştir.

Tablo 7.37. PET ikamesi yapılmayan kolon numunelerin kesme dayanımları ve modellerin tahminleri.

Numune İsmi	Deneysel sonuç	Priestley ve ark.	FEMA 273	CSA	Sezen ve Moehle	ACI 318	Pan ve Li
CL-R-0-015	177.943	316.133	165.709	185.631	177.600	218.552	188.699
CL-R-0-030	194.833	358.428	196.947	200.818	205.273	236.433	192.981
CL-CFRP-0-015	191.287	319.203	214.535	205.823	165.027	270.897	194.472
CL-CFRP-0-030	210.148	345.392	294.599	238.311	211.246	316.727	210.303

Şekil 7.76'da PET ikamesi yapılmayan kolon numunelerin maksimum kesme kuvvetleri ve modellerin tahminleri verilmiştir.



Şekil 7.76. PET ikamesi yapılmayan kolon numunelerin maksimum kesme kuvvetleri ve modellerin tahminleri.

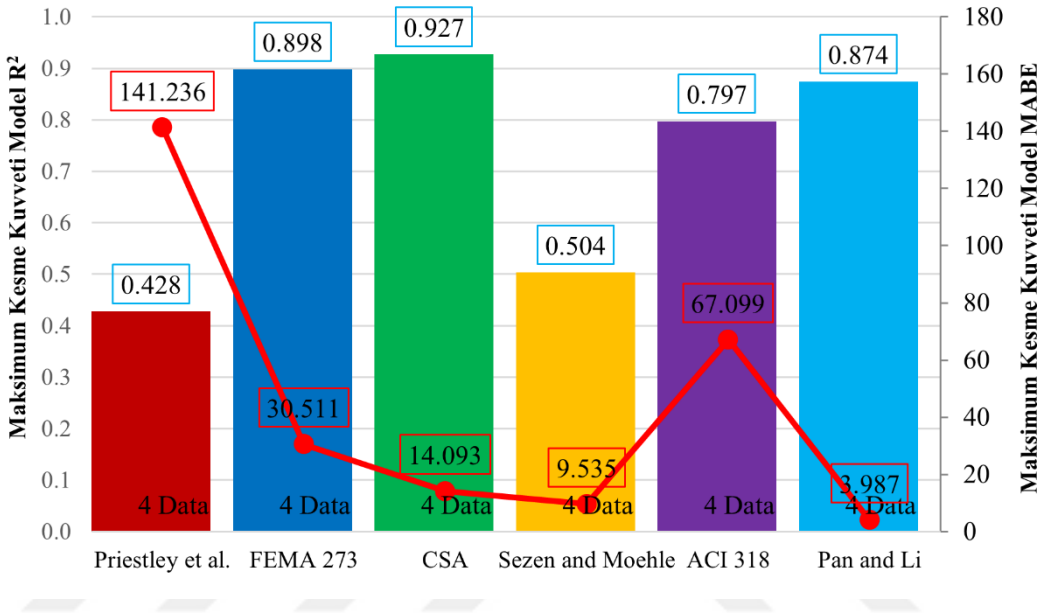
Modellerin tahminleri istatiksel metrikler aracılığıyla analiz edilmiş ve PET ikamesi yapılmayan betonarme kolonların deneysel verileri ile uyumu irdelenmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 7.38'de verilmiştir.

Tablo 7.38. PET ikamesi yapılmayan kolon numunelerin kesme dayanımları için modellerin performansı.

Yıl	Referans	Veri sayısı	R^2	MABE	MAPE
1994	Priestley ve ark.	4	0.428	141.236	73.213
1997	FEMA 273	4	0.898	30.511	15.075
2004	CSA	4	0.927	14.093	7.098
2004	Sezen ve Moehle	4	0.504	9.535	4.950
2011	ACI 318	4	0.797	67.099	34.127
2013	Pan ve Li	4	0.874	3.987	2.183

PET ikamesi yapılmayan numunelerin deney sonuçları dikkate alındığında yapılan metrik analizler sonucunda R^2 değerlerindeki karşılaştırmalarda CSA (2004) modeli

0.927 R^2 değerleri ile daha başarılı bir performans sergilerken, Priestley ve ark. (1994) modeli 0.428 R^2 değeri ile daha başarısız bir performans sergilemiştir. Bununla birlikte Pan ve Li (2013) modeli 3.987 MABE ve 2.183 MAPE değerleri ile daha yakın tahminler verirken, Priestley ve ark. (1994) modeli 141.236 MABE ve 73.213 MAPE değerleri ile doğruluğu düşük sonuçlar vermiştir. Şekil 7.77'de önerilen modellerin R^2 ve MABE değerlerinden oluşan grafik verilmiştir.



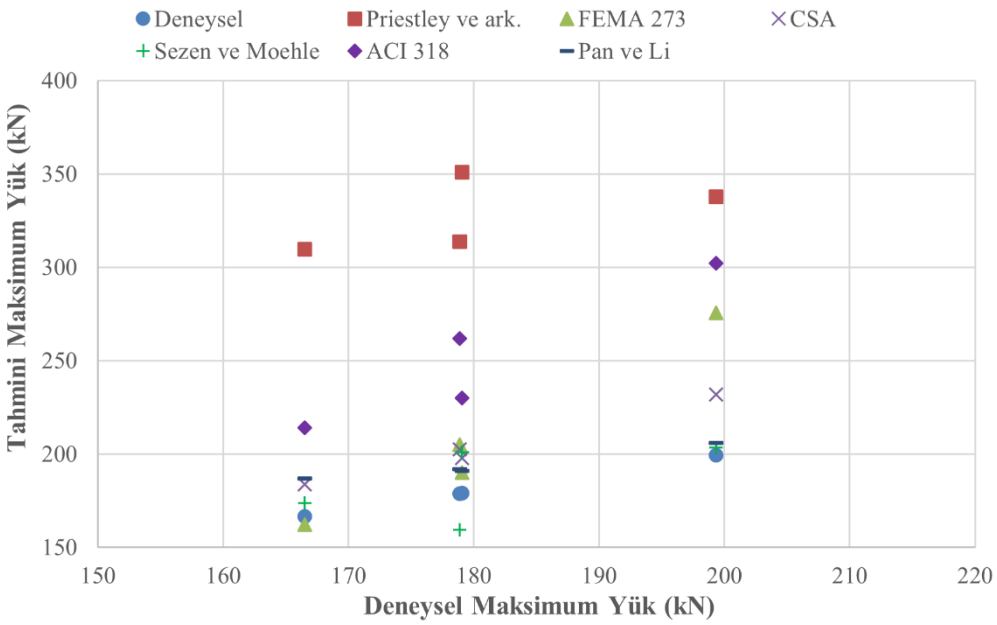
Şekil 7.77. PET ikamesi yapılmayan kolon numuneleri için kesme dayanımı modellerinin performansı.

Betonarme kolonların betonunda PET ikamesi yapılan numuneler için modellerin tahmini maksimum kesme kuvveti değerleri bulunmuştur. Tablo 7.39'da PET ikamesi yapılan betonarme kolonların taşıdıkları maksimum yükler ve önerilen modellerin tahminleri verilmiştir.

Tablo 7.39. PET ikamesi yapılan kolon numunelerin kesme dayanımları ve modellerin tahminleri.

Numune İsmi	Deneysel sonuç	Priestley ve ark.	FEMA 273	CSA	Sezen ve Moehle	ACI 318	Pan ve Li
CL-PET-10-015	166.510	309.558	162.232	183.889	173.898	214.008	186.938
CL-PET-10-030	179.061	350.881	189.993	197.765	200.908	229.899	190.926
CL-PET-CFRP-10-015	178.863	313.694	205.105	202.521	159.370	261.793	191.912
CL-PET-CFRP-10-030	199.321	337.784	275.740	231.770	203.511	302.225	206.078

Şekil 7.78'de PET ikamesi yapılan kolon numunelerin maksimum kesme kuvvetleri ve modellerin tahminleri verilmiştir.



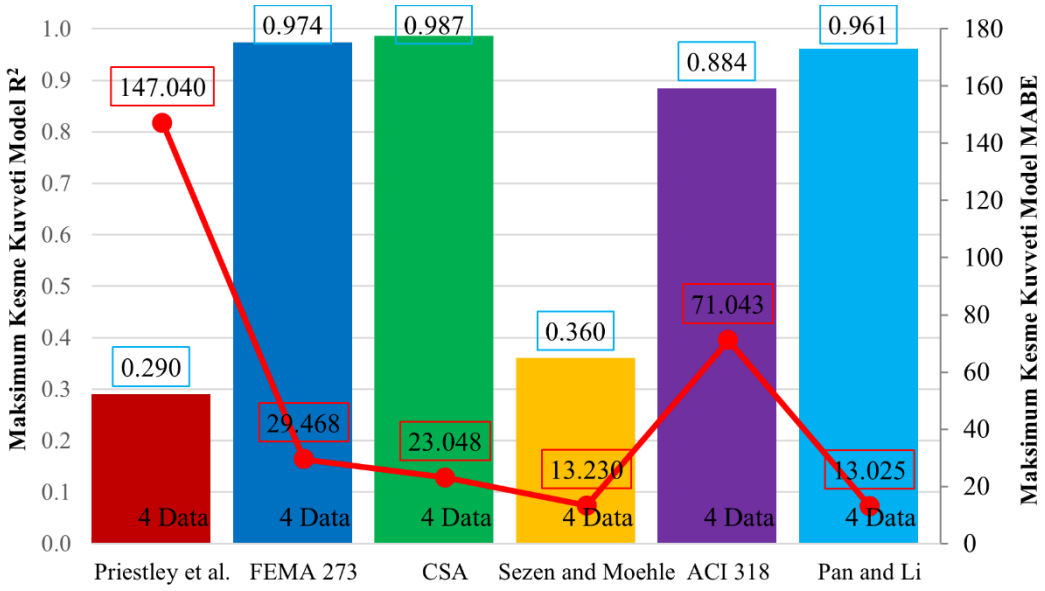
Şekil 7.78. PET ikamesi yapılan kolon numunelerin maksimum kesme kuvvetleri ve modellerin tahminleri.

Modellerin tahminleri istatiksel metrikler aracılığıyla analiz edilmiş ve PET ikamesi yapılan betonarme kolonların deneysel verileri ile uyumu irdelenmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 7.40'ta verilmiştir.

Tablo 7.40. PET ikamesi yapılan kolon numunelerin kesme dayanımları için modellerin performansı.

Yıl	Referans	Veri sayısı	R^2	MABE	MAPE
1994	Priestley ve ark.	4	0.290	147.040	81.679
1997	FEMA 273	4	0.974	29.468	15.421
2004	CSA	4	0.987	23.048	12.597
2004	Sezen ve Moehle	4	0.360	13.230	7.410
2011	ACI 318	4	0.884	71.043	38.727
2013	Pan ve Li	4	0.961	13.025	7.395

PET ikamesi yapılan numunelerin deney sonuçları dikkate alındığında yapılan metrik analizler sonucunda R^2 değerlerindeki karşılaştırmalarda CSA (2004) modeli 0.987 R^2 değerleri ile daha başarılı bir performans sergilerken, Priestley ve ark. (1994) modeli 0.290 R^2 değeri ile daha başarısız bir performans sergilemiştir. Bununla birlikte Pan ve Li (2013) modeli 13.025 MABE ve 7.395 MAPE değerleri ile daha yakın tahminler verirken, Priestley ve ark. (1994) modeli 147.040 MABE ve 81.679 MAPE değerleri ile doğruluğu düşük sonuçlar vermiştir. Şekil 7.79'da önerilen modellerin R^2 ve MABE değerlerinden oluşan grafik verilmiştir.



Şekil 7.79. PET ikamesi yapılan kolon numuneleri için kesme dayanımı modellerinin performansı.

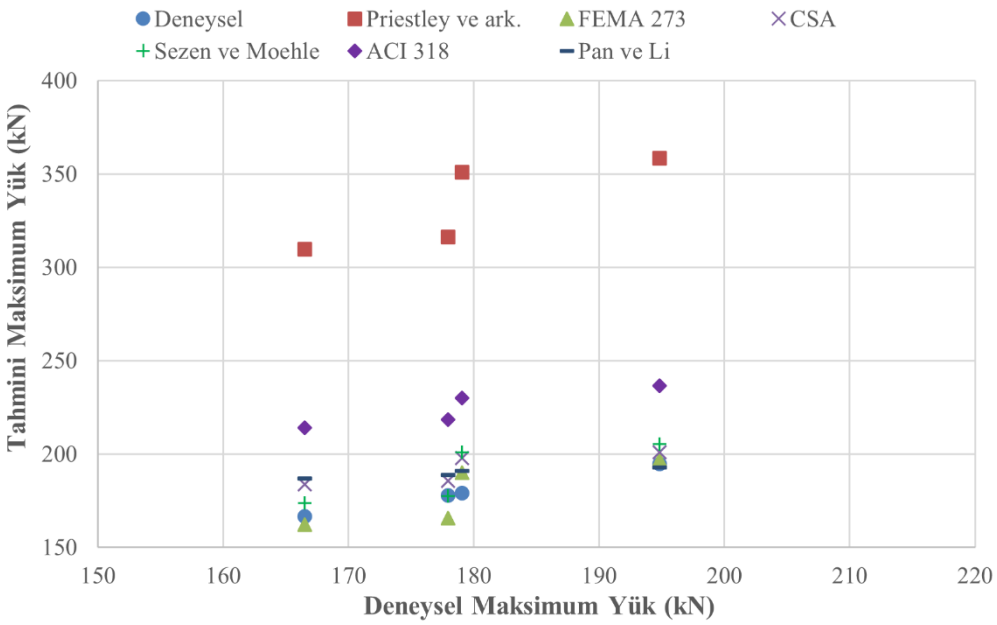
7.4.2. Karbon lifli polimer sargı kullanımına göre modellerin uyumu

Betonarme kolonların etrafında karbon lifli polimer sargı kullanılmayan numuneler için modellerin tahmini maksimum kesme kuvveti değerleri bulunmuştur. Tablo 7.41'de karbon lifli polimer sargı kullanılmayan betonarme kolonların taşıdıkları maksimum yükler ve önerilen modellerin tahminleri verilmiştir.

Tablo 7.41. Karbon lifli polimer sargı kullanılmayan kolon numunelerin kesme dayanımları ve modellerin tahminleri.

Numune İsmi	Deneysel sonuç	Priestley ve ark.	FEMA 273	CSA	Sezen ve Moehle	ACI 318	Pan ve Li
CL-R-0-015	177.943	316.133	165.709	185.631	177.600	218.552	188.699
CL-R-0-030	194.833	358.428	196.947	200.818	205.273	236.433	192.981
CL-PET-10-015	166.510	309.558	162.232	183.889	173.898	214.008	186.938
CL-PET-10-030	179.061	350.881	189.993	197.765	200.908	229.899	190.926

Şekil 7.80'de karbon lifli polimer sargı kullanılmayan kolon numunelerin maksimum kesme kuvvetleri ve modellerin tahminleri verilmiştir.



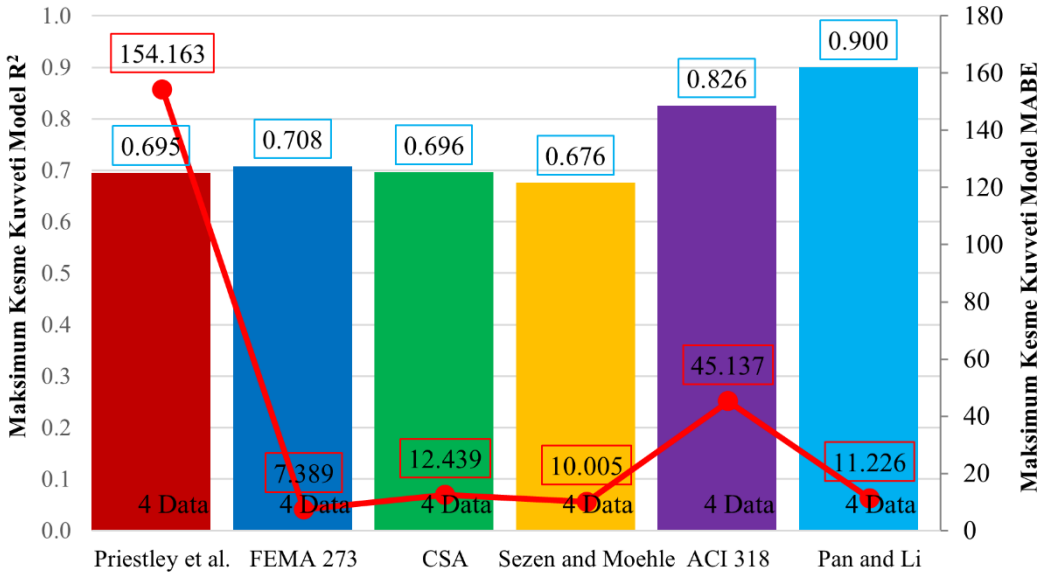
Şekil 7.80. Karbon lifli polimer sargı kullanılmayan kolon numunelerin maksimum kesme kuvvetleri ve modellerin tahminleri.

Modellerin tahminleri istatiksel metrikler aracılığıyla analiz edilmiş ve karbon lifli polimer sargı kullanılmayan betonarme kolonların deneysel verileri ile uyumu irdelenmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 7.42'de verilmiştir.

Tablo 7.42. Karbon lifli polimer sargı kullanılmayan kolon numunelerin kesme dayanımları için modellerin performansı.

Yıl	Referans	Veri sayısı	R^2	MABE	MAPE
1994	Priestley ve ark.	4	0.695	154.163	85.873
1997	FEMA 273	4	0.708	7.389	4.159
2004	CSA	4	0.696	12.439	7.069
2004	Sezen ve Moehle	4	0.676	10.005	5.547
2011	ACI 318	4	0.826	45.137	25.273
2013	Pan ve Li	4	0.900	11.226	6.473

Karbon lifli polimer sargı kullanılmayan numunelerin deney sonuçları dikkate alındığında yapılan metrik analizler sonucunda R^2 değerlerindeki karşılaştırmalarda Pan ve Li (2013) modeli 0.900 R^2 değerleri ile daha başarılı bir performans sergilerken, Sezen ve Moehle (2004) modeli 0.676 R^2 değeri ile daha başarısız bir performans sergilemiştir. Bununla birlikte FEMA 273 (1997) modeli 7.389 MABE ve 4.159 MAPE değerleri ile daha yakın tahminler verirken, Priestley ve ark. (1994) modeli 154.163 MABE ve 85.873 MAPE değerleri ile doğruluğu düşük sonuçlar vermiştir. Şekil 7.81'de önerilen modellerin R^2 ve MABE değerlerinden oluşan grafik verilmiştir.



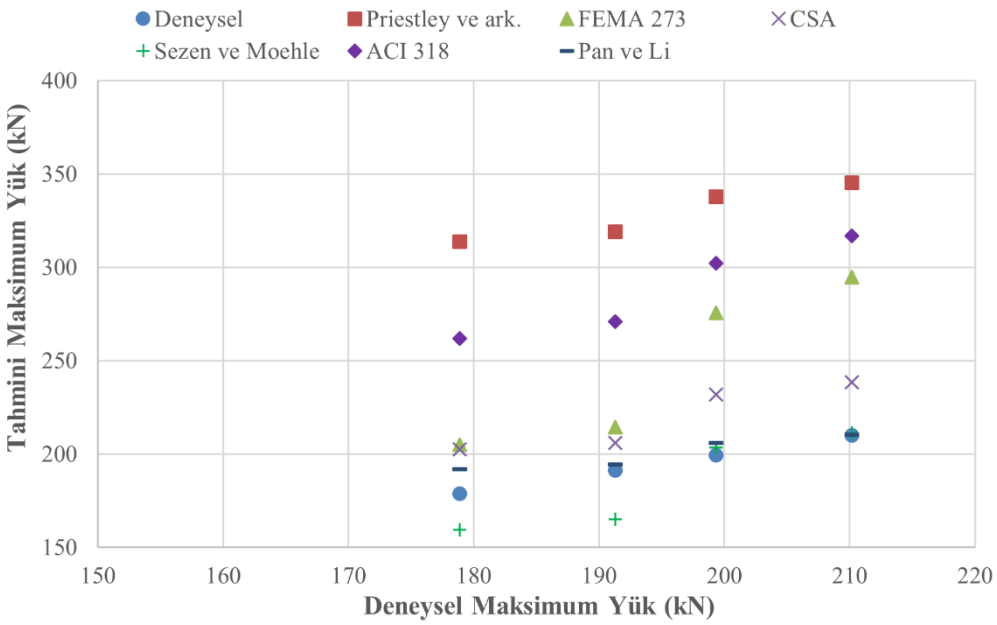
Şekil 7.81. Karbon lifli polimer sargı kullanılmayan kolon numuneleri için kesme dayanımı modellerinin performansı.

Betonarme kolonların etrafında karbon lifli polimer sargı kullanılan numuneler için modellerin tahmini maksimum kesme kuvveti değerleri bulunmuştur. Tablo 7.43'te karbon lifli polimer sargı kullanılan betonarme kolonların taşıdıkları maksimum yükler ve önerilen modellerin tahminleri verilmiştir.

Tablo 7.43. Karbon lifli polimer sargı kullanılan kolon numunelerin kesme dayanımları ve modellerin tahminleri.

Numune İsmi	Deneysel sonuç	Priestley ve ark.	FEMA 273	CSA	Sezen ve Moehle	ACI 318	Pan ve Li
CL-CFRP-0-015	191.287	319.203	214.535	205.823	165.027	270.897	194.472
CL-CFRP-0-030	210.148	345.392	294.599	238.311	211.246	316.727	210.303
CL-PET-CFRP-10-015	178.863	313.694	205.105	202.521	159.370	261.793	191.912
CL-PET-CFRP-10-030	199.321	337.784	275.740	231.770	203.511	302.225	206.078

Şekil 7.82'de karbon lifli polimer sargı kullanılan kolon numunelerin maksimum kesme kuvvetleri ve modellerin tahminleri verilmiştir.



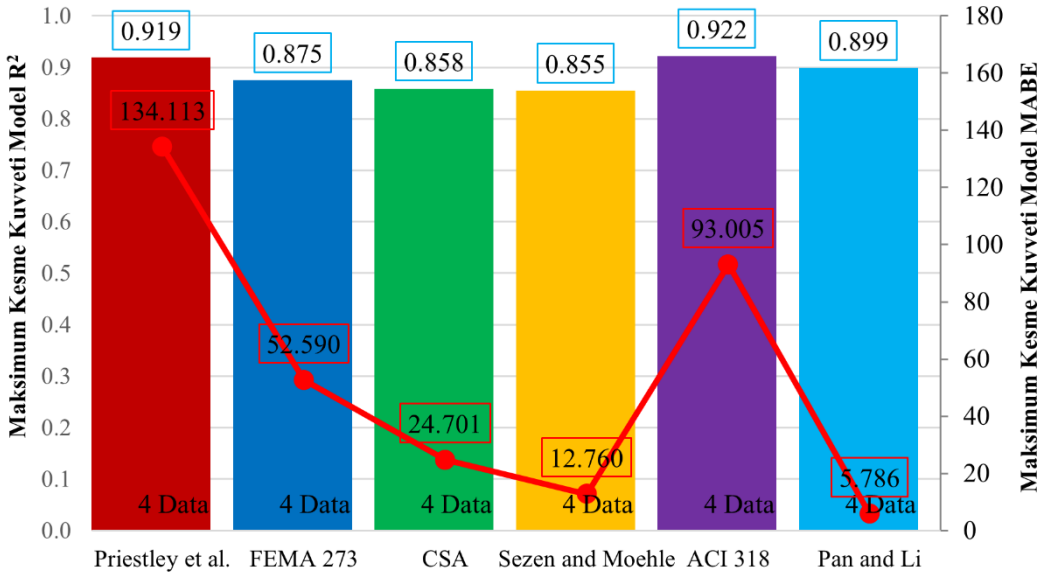
Şekil 7.82. Karbon lifli polimer sargı kullanılan kolon numunelerin maksimum kesme kuvvetleri ve modellerin tahminleri.

Modellerin tahminleri istatiksel metrikler aracılığıyla analiz edilmiş ve karbon lifli polimer sargı kullanılan betonarme kolonların deneysel verileri ile uyumu irdelenmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 7.44'te verilmiştir.

Tablo 7.44. Karbon lifli polimer sargı kullanılan kolon numunelerin kesme dayanımları için modellerin performansı.

Yıl	Referans	Veri sayısı	R^2	MABE	MAPE
1994	Priestley ve ark.	4	0.919	134.113	69.019
1997	FEMA 273	4	0.875	52.590	26.338
2004	CSA	4	0.858	24.701	12.627
2004	Sezen ve Moehle	4	0.855	12.760	6.813
2011	ACI 318	4	0.922	93.005	47.581
2013	Pan ve Li	4	0.899	5.786	3.106

Karbon lifli polimer sargı kullanılan numunelerin deney sonuçları dikkate alındığında yapılan metrik analizler sonucunda R^2 değerlerindeki karşılaştırmalarda ACI 318 (2011) modeli 0.922 R^2 değerleri ile daha başarılı bir performans sergilerken, Sezen ve Moehle (2004) modeli 0.855 R^2 değeri ile daha başarısız bir performans sergilemiştir. Bununla birlikte Pan ve Li (2013) modeli 5.786 MABE ve 3.106 MAPE değerleri ile daha yakın tahminler verirken, Priestley ve ark. (1994) modeli 134.113 MABE ve 69.019 MAPE değerleri ile doğruluğu düşük sonuçlar vermiştir. Şekil 7.83'te önerilen modellerin R^2 ve MABE değerlerinden oluşan grafik verilmiştir.



Şekil 7.83. Karbon lifli polimer sargı kullanılan kolon numuneleri için kesme dayanımı modellerinin performansı.

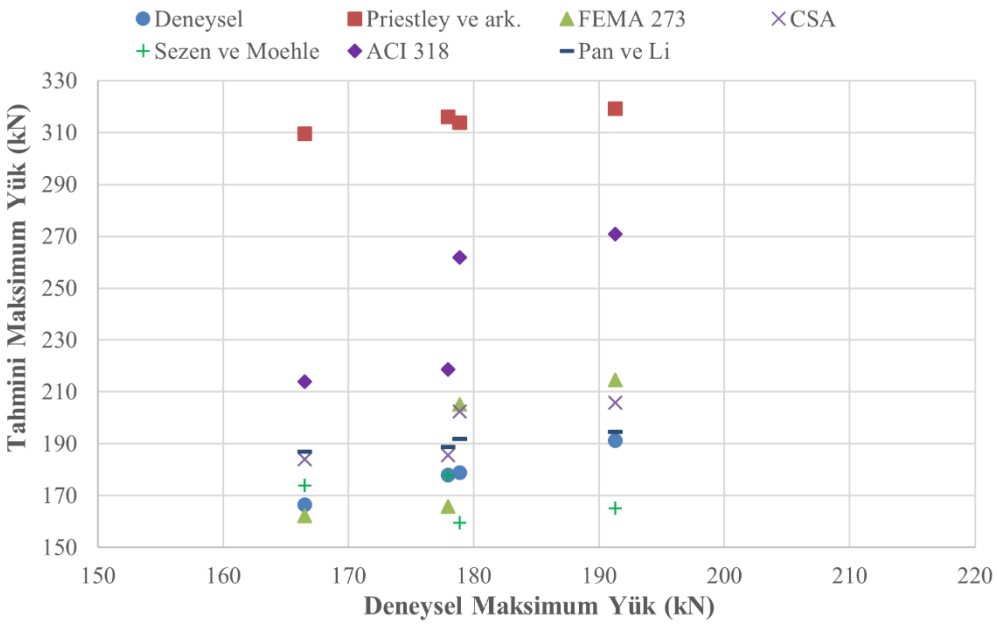
7.4.3. Eksenel yük düzeyine göre modellerin uyumu

Betonarme kolonlara uygulanan eksenel kuvvet oranı 0.15 olan numuneler için modellerin tahmini maksimum kesme kuvveti değerleri bulunmuştur. Tablo 7.45'te eksenel kuvvet oranı 0.15 olan betonarme kolonların taşıdıkları maksimum yükler ve önerilen modellerin tahminleri verilmiştir.

Tablo 7.45. Eksenel kuvvet oranı 0.15 olan kolon numunelerin kesme dayanımları ve modellerin tahminleri.

Numune İsmi	Deneysel sonuç	Priestley ve ark.	FEMA 273	CSA	Sezen ve Moehle	ACI 318	Pan ve Li
CL-R-0-015	177.943	316.133	165.709	185.631	177.600	218.552	188.699
CL-CFRP-0-015	191.287	319.203	214.535	205.823	165.027	270.897	194.472
CL-PET-10-015	166.510	309.558	162.232	183.889	173.898	214.008	186.938
CL-PET-CFRP-10-015	178.863	313.694	205.105	202.521	159.370	261.793	191.912

Şekil 7.84'te eksenel kuvvet oranı 0.15 olan kolon numunelerin maksimum kesme kuvvetleri ve modellerin tahminleri verilmiştir.



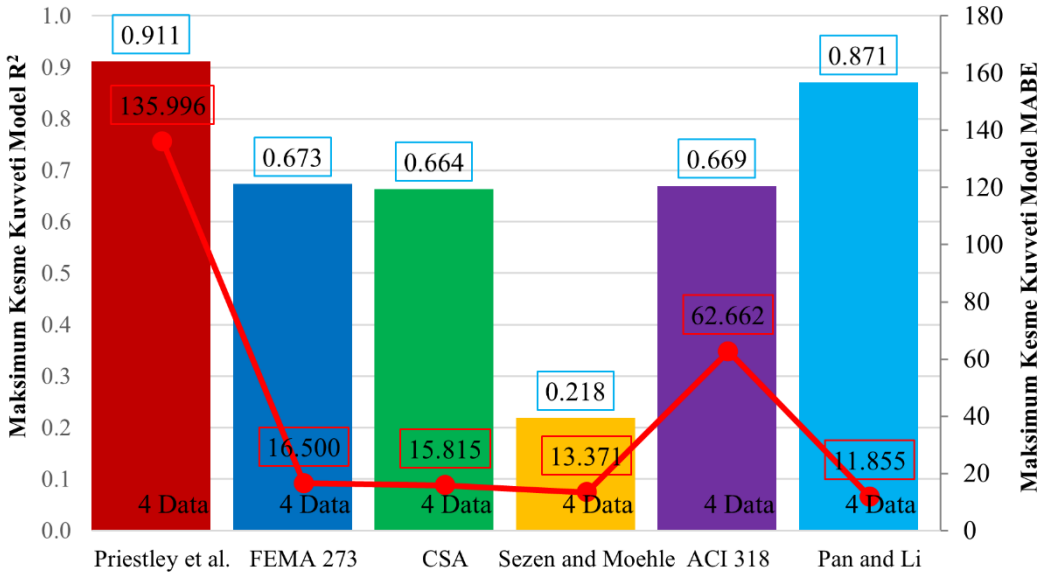
Şekil 7.84. Eksenel kuvvet oranı 0.15 olan kolon numunelerin maksimum kesme kuvvetleri ve modellerin tahminleri.

Modellerin tahminleri istatiksel metrikler aracılığıyla analiz edilmiş ve eksenel kuvvet oranı 0.15 olan betonarme kolonların deneysel verileri ile uyumu irdelenmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 7.46'da verilmiştir.

Tablo 7.46. Eksenel kuvvet oranı 0.15 olan kolon numunelerin kesme dayanımları için modellerin performansı.

Yıl	Referans	Veri sayısı	R^2	MABE	MAPE
1994	Priestley ve ark.	4	0.911	135.996	76.456
1997	FEMA 273	4	0.673	16.500	9.067
2004	CSA	4	0.664	15.815	8.896
2004	Sezen ve Moehle	4	0.218	13.371	7.314
2011	ACI 318	4	0.669	62.662	34.833
2013	Pan ve Li	4	0.871	11.855	6.818

Eksenel kuvvet oranı 0.15 olan numunelerin deney sonuçları dikkate alındığında yapılan metrik analizler sonucunda R^2 değerlerindeki karşılaştırmalarda Priestley ve ark. (1994) modeli 0.911 R^2 değerleri ile daha başarılı bir performans sergilerken, Sezen ve Moehle (2004) modeli 0.218 R^2 değeri ile daha başarısız bir performans sergilemiştir. Bununla birlikte Pan ve Li (2013) modeli 11.855 MABE ve 6.818 MAPE değerleri ile daha yakın tahminler verirken, Priestley ve ark. (1994) modeli 135.996 MABE ve 76.456 MAPE değerleri ile doğruluğu düşük sonuçlar vermiştir. Şekil 7.85'te önerilen modellerin R^2 ve MABE değerlerinden oluşan grafik verilmiştir.



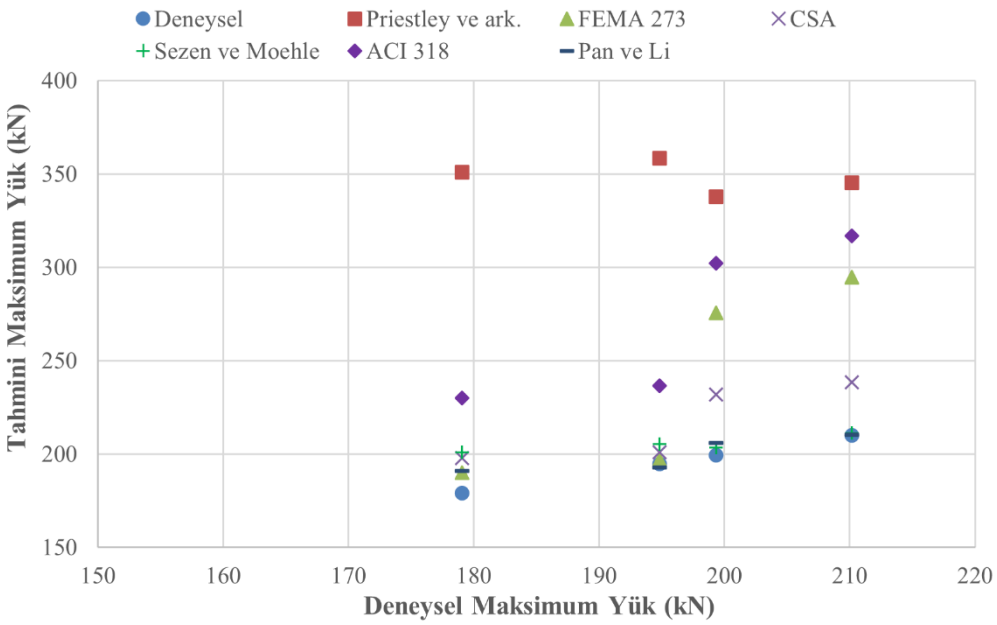
Şekil 7.85. Eksenel kuvvet oranı 0.15 olan kolon numuneleri için kesme dayanımı modellerinin performansı.

Betonarme kolonlara uygulanan eksenel kuvvet oranı 0.30 olan numuneler için modellerin tahmini maksimum kesme kuvveti değerleri bulunmuştur. Tablo 7.47'de eksenel kuvvet oranı 0.30 olan betonarme kolonların taşıdıkları maksimum yükler ve önerilen modellerin tahminleri verilmiştir.

Tablo 7.47. Eksenel kuvvet oranı 0.30 olan kolon numunelerin kesme dayanımları ve modellerin tahminleri.

Numune İsmi	Deneysel sonuç	Priestley ve ark.	FEMA 273	CSA	Sezen ve Moehle	ACI 318	Pan ve Li
CL-R-0-030	194.833	358.428	196.947	200.818	205.273	236.433	192.981
CL-CFRP-0-030	210.148	345.392	294.599	238.311	211.246	316.727	210.303
CL-PET-10-030	179.061	350.881	189.993	197.765	200.908	229.899	190.926
CL-PET-CFRP-10-030	199.321	337.784	275.740	231.770	203.511	302.225	206.078

Şekil 7.86'da eksenel kuvvet oranı 0.30 olan kolon numunelerin maksimum kesme kuvvetleri ve modellerin tahminleri verilmiştir.



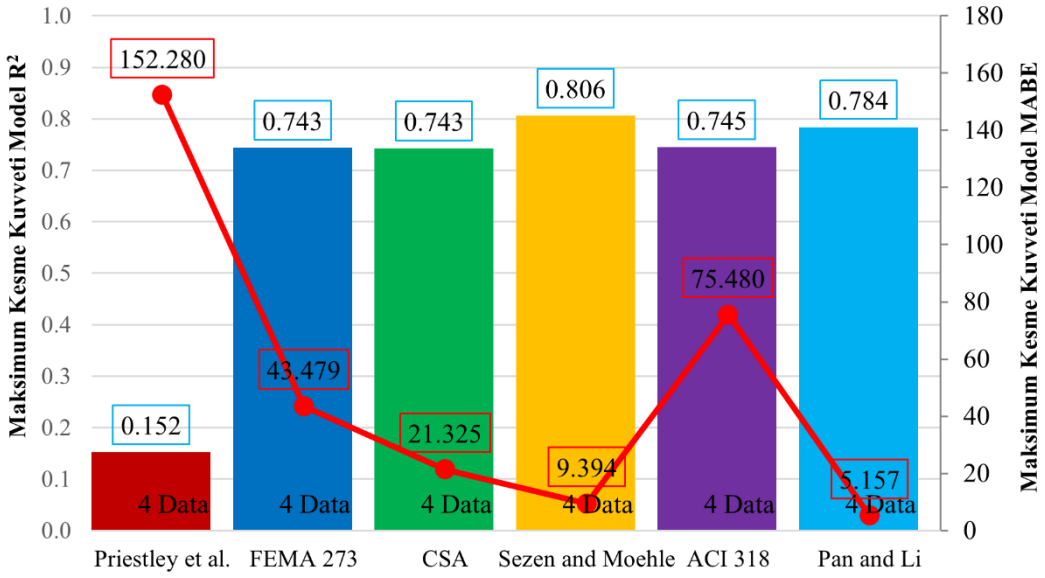
Şekil 7.86. Eksenel kuvvet oranı 0.30 olan kolon numunelerin maksimum kesme kuvvetleri ve modellerin tahminleri.

Modellerin tahminleri istatiksel metrikler aracılığıyla analiz edilmiş ve eksenel kuvvet oranı 0.30 olan betonarme kolonların deneysel verileri ile uyumu irdelenmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 7.48'de verilmiştir.

Tablo 7.48. Eksenel kuvvet oranı 0.30 olan kolon numunelerin kesme dayanımları için modellerin performansı.

Yıl	Referans	Veri sayısı	R^2	MABE	MAPE
1994	Priestley ve ark.	4	0.152	152.280	78.437
1997	FEMA 273	4	0.743	43.479	21.429
2004	CSA	4	0.743	21.325	10.800
2004	Sezen ve Moehle	4	0.806	9.394	5.046
2011	ACI 318	4	0.745	75.480	38.021
2013	Pan ve Li	4	0.784	5.157	2.760

Eksenel kuvvet oranı 0.30 olan numunelerin deney sonuçları dikkate alındığında yapılan metrik analizler sonucunda R^2 değerlerindeki karşılaştırmalarda Sezen ve Moehle (2004) modeli 0.806 R^2 değerleri ile daha başarılı bir performans sergilerken, Priestley ve ark. (1994) 0.152 R^2 değeri ile daha başarısız bir performans sergilemiştir. Bununla birlikte Pan ve Li (2013) modeli 5.157 MABE ve 2.760 MAPE değerleri ile daha yakın tahminler verirken, Priestley ve ark. (1994) modeli 152.280 MABE ve 78.437 MAPE değerleri ile doğruluğu düşük sonuçlar vermiştir. Şekil 7.87'de önerilen modellerin R^2 ve MABE değerlerinden oluşan grafik verilmiştir.



Şekil 7.87. Eksenel kuvvet oranı 0.30 olan kolon numuneleri için kesme dayanımı modellerinin performansı.

8. SONUÇ

Bu çalışmada betonarme kolonların betonunda ince agrega ikamesi olarak PET kullanılmıştır. Yapılan ikamenin hem betonun hem de kolonların çeşitli özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca PET ikameli betonun etrafında CFRP ve GFRP, PET ikameli betondan üretilmiş betonarme kolonların etrafında CFRP kullanılmasının yarattığı etkiler araştırılmıştır. Beton numuneler üzerinde basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı testleri yapılmıştır. Betonarme kolonlar deprem benzeri tekrarlı yatay yükler altında test edilmiştir. Konu ile ilgili kapsamlı bir deneysel veri tabanı oluşturulmuş ve bu veri tabanı kullanılarak hem model önerilerinde bulunulmuş hem de daha önce önerilmiş olan model önerilerinin tahmin performansları incelenmiştir. Yapılan deneyler ve analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Betonda PET ikame oranının artması çökme değerlerini düşürmüştür. %30 PET ikamesi halinde çökme değeri yaklaşık olarak %20 oranında azalma göstermiştir
- PET ikame oranın artması betonun yoğunluğunu azaltmıştır. %30 PET ikamesi halinde yoğunluk değeri yaklaşık olarak %6 oranında azalma göstermiştir
- Beton basınç dayanımı deneylerinde PET ikamesinin betonun basınç dayanımını düşürdüğü görülmüştür. Beton basınç dayanımı değerlerinde %10 PET ikamesi durumda yaklaşık %7, %20 PET ikamesi durumda yaklaşık %13 ve %30 PET ikamesi durumda yaklaşık %19 düşüş gerçekleşmiştir
- Beton basınç dayanımı deneylerinde PET ikamesi oranındaki artışın betonun eksenel ve yanal gerinim değerlerini artırdığı görülmüştür. %30 PET ikamesi durumda betonun eksenel gerinim değerlerinde yaklaşık %8, yanal gerinim değerlerinde yaklaşık %22 artış gerçekleşmiştir
- Beton basınç dayanımı deneylerinden elde edilen veriler ile PET ikamesinin betonun elastisite modülünü düşürdüğü görülmüştür. Beton elastisite modülü değerlerinde %10 PET ikamesi durumda yaklaşık %11,

%20 PET ikamesi durumda yaklaşık %18 ve %30 PET ikamesi durumda yaklaşık %30 düşüş gerçekleşmiştir

- Beton yarmada çekme dayanımı deneylerinde PET ikamesinin betonun yarmada çekme dayanımını düşürdüğü görülmüştür. Beton yarmada çekme dayanımı değerlerinde %10 PET ikamesi durumda yaklaşık %4, %20 PET ikamesi durumda yaklaşık %9 ve %30 PET ikamesi durumda yaklaşık %12 düşüş gerçekleşmiştir
- Beton eğilme dayanımı deneylerinde PET ikamesinin betonun eğilme dayanımını düşürdüğü görülmüştür. Beton eğilme dayanımı değerlerinde %10 PET ikamesi durumda yaklaşık %4, %20 PET ikamesi durumda yaklaşık %8 ve %30 PET ikamesi durumda yaklaşık %11 düşüş gerçekleşmiştir
- Basınç dayanımı deneyi sonucunda %10 PET ikamesi yapılmış betonun etrafına CFRP sarılması durumunda basınç dayanımı 1.91 katına, GFRP sarılması durumunda 1.54 katına çıkmıştır. Bununla birlikte CFRP sarılması durumunda eksenel gerinim değeri 6.83 katına, yanal gerinim değeri ise 11.10 katına çıkmıştır. Benzer şekilde GFRP sarılması durumunda eksenel gerinim değeri 7.15 katına, yanal gerinim değeri ise 13.04 katına çıkmıştır
- Yarmada çekme dayanımı deneyi sonucunda %10 PET ikamesi yapılmış betonun etrafına CFRP sarılması durumunda yarmada çekme dayanımı 1.47 katına, GFRP sarılması durumunda 1.29 katına çıkmıştır
- Eğilme dayanımı deneyi sonucunda %10 PET ikamesi yapılmış betonun etrafına CFRP sarılması durumunda eğilme dayanımı 1.42 katına, GFRP sarılması durumunda 1.27 katına çıkmıştır
- Beton malzeme deneyleri için bu çalışmanın öne sürmüş olduğu modellerin daha önceki modeller ve deneysel veriler ile uyumlu olduğu görülmüştür. Deneysel veri tabanına göre en doğru tahminlerde bulunduğu ve kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir
- Betonarme kolonlarda yapılan yatay tekrarlı yükleme deneylerinde kolonların betonunda PET ikamesinin yapılması kolonların taşıdıkları maksimum yatay yükleri %5 ile %9 arasında azaltmıştır. Bununla birlikte süneklik katsayılarını %1 ile %3 arasında artırmıştır

- Betonarme kolonların etrafında CFRP sargı kullanılması kolonların taşıdıkları maksimum yatay yükleri %7 ile %12 arasında artırmıştır. Bununla birlikte süneklik katsayılarını %77 ile %85 arasında artırmıştır
- Betonarme kolonlara yatay tekrarlı yükleme deneyleri esnasında uygulanan eksenel yük düzeyinin artırılması kolonların taşıdıkları maksimum yatay yükleri %7 ile %12 arasında artırmıştır. Bununla birlikte süneklik katsayılarını %25 ile %29 arasında düşürmüştür
- Kolonların betonunda PET ikamesinin yapılması kolonların akma rijitlik değerlerini %0.5 ile %9 arasında azaltmıştır. Bununla birlikte nihai rijitlik değerlerini %1 ile %12 arasında azaltmıştır
- Kolonların etrafında CFRP sargı kullanılması kolonların akma rijitlik değerlerini %1 ile %11 arasında artırmıştır. Bununla birlikte nihai rijitlik değerlerini %36 ile %44 arasında azaltmıştır
- Kolonlara uygulanan eksenel yük düzeyinin artırılması kolonların akma rijitlik değerlerini %6 ile %9 arasında artırmıştır. Bununla birlikte nihai rijitlik değerlerini %42 ile %49 arasında artırmıştır
- Yatay tekrarlı yükleme altındaki betonarme kolonların betonunda PET ikamesinin yapılması kolonların sönümledikleri kümülatif enerji değerlerini %9 ile %17 arasında azaltmıştır
- Yatay tekrarlı yükleme altındaki betonarme kolonların etrafında CFRP sargı kullanılması kolonların sönümledikleri kümülatif enerji değerlerini %262 ile %369 arasında artırmıştır
- Yatay tekrarlı yükleme altındaki betonarme kolonlara uygulanan eksenel yük düzeyinin artırılması kolonların sönümledikleri kümülatif enerji değerlerini %22 ile %43 arasında azaltmıştır
- Yatay tekrarlı yükler altındaki betonarme kolonların taşıdıkları maksimum kesme kuvvetlerinin tahmininde Pan ve Li (2013) modelinin diğer modellere göre daha iyi bir performans sergilediği görülmüştür. Priestley ve ark. (1994) modelinin genel olarak yaptıkları tahminlerin deneysel verilerin üzerinde olduğu ve hata oranının yüksek olduğu görülmüştür.

Betonda PET ikame oranının artması halinde çökme değerlerinde oluşan azalmadan dolayı bu durumun taze betonun işlenebilirliği için dezavantaj sağlayabileceği düşünülmüştür. Bununla birlikte yoğunlukta oluşan azalmalardan dolayı betonun

yapısal olarak kullanılması halinde yapı ağırlığının azaltılmasına veya hafif beton elde edilmesine katkı sağlayabileceği sonucuna varılmıştır.

Betonda PET ikamesi betonun elastisite modülünü, basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını ve eğilme dayanımını düşürmüş, nihai gerinim değerlerini arttırmıştır. Bu sebeple PET ikamesinin yer değiştirme talebinin bulunduğu durumlar için kullanılabilir olduğu fakat dayanım arttırmak amacıyla kullanılabilir olmadığı sonucuna varılmıştır.

Beton malzeme deneylerinde PET ikamesinden dolayı basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarında oluşan azalma FRP kullanılarak telafi edilmiş hatta referans dayanımın çok üzerine çıkmıştır. Bu nedenle betonun içerisinde ince agrega ikamesi olarak PET dışarısında ise sargı malzemesi olarak FRP kullanılmasının hem daha hafif hem de daha fazla dayanıma sahip beton elde etmek için tercih edilebilecek faydalı bir yöntem olduğu görülmüştür.

Beton malzeme ile ilgili bu çalışmada önerilen modeller hazırlanan veri tabanına göre en doğru sonuçları veren modeller olmuşlardır. Bununla birlikte modellerin güvenilirliği veri tabanındaki verilerin sayısı ve niteliği ile bağlantılıdır. Bu çalışmada şimdiye kadar konuyla ilgili yapılmış çalışmaların verileri toplanmaya çalışılmıştır. Birbirinden çok farklı sonuçlar veren çalışmaların varlığı veya çok az deneysel veri bulunması modellerin güvenilirliğini olumsuz etkileyebilmektedir. Veri tabanının içeriği değiştikçe ve veri sayısı arttıkça modellerin revizyona uğrayabileceği unutulmamalıdır.

Deprem benzeri yatay tekrarlı yükler altında test edilen betonarme kolonların betonunda %10 PET ikamesinin yapılması halinde kolonların taşıdıkları maksimum yatay yüklerde, rijitlik değerlerinde ve sönümledikleri enerjilerde hafif oranda bir olumsuz eğilim gözükse de genel olarak davranışlarının benzer olduğu görülmüştür.

Yatay tekrarlı yükler altında test edilen betonarme kolonların eksenel yük düzeyinin yükselmesi kolonların maksimum yatay yüklerinde ve rijitlik değerlerinde artışa sebep olsa da süneklik değerlerinde ve sönümlenen enerji değerlerinde ciddi azalmalara neden olmuştur. Bu durum betonarme kolonların yer değiştirme kapasitesini sınırlamış ve daha gevrek bir davranış sergilemesine yol açmıştır.

Betonarme kolonların etrafında karbon lifli polimer sargının kullanılması kolonların maksimum yatay yüklerde, süneklik katsayılarında, rijitlik değerlerinde ve

sönümledikleri enerjilerde artışlara sebep olmuş ve her anlamda olumlu sonuçlar vermiştir. Karbon lifli polimer sargı kullanımı maksimum yatay yüklerde ve rijitlik değerlerinde hafif artışlar sağlasa da süneklik değerlerinde ve sönümlenen enerji değerlerinde ciddi artışlar sağlayarak kolonların deprem benzeri tekrarlı yükler altındaki davranışını güçlendirmiştir.

Beton malzeme deneylerindekine benzer şekilde tekrarlı yatay yükler altında test edilen betonarme kolonların betonunda yapılan PET ikamesinden dolayı oluşan hafif düzeydeki olumsuz etkilerin CFRP kullanılarak telafi edildiği ve referans kolonların davranışından daha iyi bir davranışın elde edildiği tespit edilmiştir. Yapısal mühendislik uygulamalarında betonarme yapı elemanlarının betonunda ince agrega yerine %10 PET ikamesinin yapılmasının CFRP sargı kullanılarak yapılması halinde kullanılabilir bir yöntem olabileceği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

ACI (American Concrete Institute). 2011. *Building code requirements for structural concrete*. ACI Committee 318. Farmington Hills, MI: ACI.

Adela, Y., Berhanu, M., & Gobena, B. (2020). Plastic wastes as a raw material in the concrete mix: An alternative approach to manage plastic wastes in developing countries. *International Journal of Waste Resources*, *10*(382), 1-7.

Ağbulut, Ü., Gürel, A. E., & Biçen, Y. (2021). Prediction of daily global solar radiation using different machine learning algorithms: Evaluation and comparison. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *135*, 110114. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110114

Ahmad, F., Jamal, A., Mazher, K. M., Umer, W., & Iqbal, M. (2021). Performance evaluation of plastic concrete modified with e-waste plastic as a partial replacement of coarse aggregate. *Materials*, *15*(1), 175. https://doi.org/10.3390/ma15010175

Ahmad, J., Majdi, A., Babeker Elhag, A., Deifalla, A. F., Soomro, M., Isleem, H. F., & Qaidi, S. (2022). A step towards sustainable concrete with substitution of plastic waste in concrete: Overview on mechanical, durability and microstructure analysis. *Crystals*, *12*(7), 944. https://doi.org/10.3390/cryst12070944

Albano, C., Camacho, N., Hernández, M., Matheus, A., & Gutierrez, A. J. W. M. (2009). Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste management*, *29*(10), 2707-2716. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.007

Al-Hadithi, A. I., & Al-Ani, M. F. (2018, September). Effects of adding waste plastics on some properties of high performance concrete. In *2018 11th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)* (pp. 273-279). IEEE. https://doi.org/10.1109/DeSE.2018.00055

Almeshal, I., Tayeh, B. A., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., & Mohamed, A. M. (2020). Eco-friendly concrete containing recycled plastic as partial replacement for sand. *Journal of Materials Research and Technology*, *9*(3), 4631-4643. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.090

Almohana, A. I., Abdulwahid, M. Y., Galobardes, I., Mushtaq, J., & Almojil, S. F. (2022). Producing sustainable concrete with plastic waste: A review. *Environmental Challenges*, 100626. https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100626

Alqahtani, F. K. (2022). Development of composite PET plastic-based aggregate and its utilization in green lightweight concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *47*(10), 13397-13406. https://doi.org/10.1007/s13369-022-06852-z

Anggawidjaja, D., Ueda, T., Dai, J., & Nakai, H. (2006). Deformation capacity of RC piers wrapped by new fiber-reinforced polymer with large fracture strain. *Cement and Concrete Composites*, *28*(10), 914-927. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.07.011

Aocharoen, Y., & Chotickai, P. (2023). Compressive mechanical and durability properties of concrete with polyethylene terephthalate and high-density polyethylene aggregates. *Cleaner Engineering and Technology*, *12*, 100600. https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100600

Azhdarpour, A. M., Nikoudel, M. R., & Taheri, M. (2016). The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation. *Construction and Building Materials*, *109*, 55-62. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.056

Babafemi, A. J., Šavija, B., Paul, S. C., & Anggraini, V. (2018). Engineering properties of concrete with waste recycled plastic: A review. *Sustainability*, *10*(11), 3875. https://doi.org/10.3390/su10113875

Babafemi, A. J., Sirba, N., Paul, S. C., & Miah, M. J. (2022). Mechanical and durability assessment of recycled waste plastic (Resin8 & PET) eco-aggregate concrete. *Sustainability*, *14*(9), 5725. https://doi.org/10.3390/su14095725

Bahij, S., Omary, S., Feugeas, F., & Faqiri, A. (2020). Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste–A review. *Waste Management*, *113*, 157-175. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.048

Bakır, H., Ağbulut, Ü., Gürel, A. E., Yıldız, G., Güvenç, U., Soudagar, M. E. M., ... & Afzal, A. (2022). Forecasting of future greenhouse gas emission trajectory for India using energy and economic indexes with various metaheuristic algorithms. *Journal of Cleaner Production*, *360*, 131946. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131946

Bamigboye, G. O., Tarverdi, K., Umoren, A., Bassey, D. E., Okorie, U., & Adediran, J. (2021). Evaluation of eco-friendly concrete having waste PET as fine aggregates. *Cleaner Materials*, *2*, 100026. https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100026

Bamigboye, G., Tarverdi, K., Adigun, D., Daniel, B., Okorie, U., & Adediran, J. (2022). An appraisal of the mechanical, microstructural, and thermal characteristics of concrete containing waste PET as coarse aggregate. *Cleaner Waste Systems*, *1*, 100001. https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100001

Basha, S. I., Ali, M. R., Al-Dulaijan, S. U., & Maslehuddin, M. (2020). Mechanical and thermal properties of lightweight recycled plastic aggregate concrete. *Journal of Building Engineering*, *32*, 101710. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101710

Belmokaddem, M., Mahi, A., Senhadji, Y., & Pekmezci, B. Y. (2020). Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate. *Construction and Building Materials*, *257*, 119559. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119559

Bentz, E. C., Vecchio, F. J., & Collins, M. P. (2006). Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements. *ACI structural journal*, *103*(4), 614.

Benyathiar, P., Kumar, P., Carpenter, G., Brace, J., & Mishra, D. K. (2022). Polyethylene terephthalate (PET) bottle-to-bottle recycling for the beverage industry: A Review. *Polymers*, *14*(12), 2366. https://doi.org/10.3390/polym14122366

Benzaid, R., Mesbah, H., & Chikh, N. E. (2010). FRP-confined concrete cylinders: axial compression experiments and strength model. *Journal of Reinforced plastics and composites*, *29*(16), 2469-2488. https://doi.org/10.1177/0731684409355199

Burrows, S. D., Ribeiro, F., O'brien, S., Okoffo, E., Toapanta, T., Charlton, N., ... & Thomas, K. V. (2022). The message on the bottle: Rethinking plastic labelling to better encourage sustainable use. *Environmental Science & Policy*, *132*, 109-118. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.02.015

Choi, E., Cho, B. S., & Lee, S. (2015). Seismic retrofit of circular RC columns through using tensioned GFRP wires winding. *Composites Part B: Engineering*, *83*, 216-225. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.041

Choi, Y. W., Moon, D. J., Chung, J. S., & Cho, S. K. (2005). Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and concrete research*, *35*(4), 776-781. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.014

Choi, Y. W., Moon, D. J., Kim, Y. J., & Lachemi, M. (2009). Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. *Construction and Building Materials*, *23*(8), 2829-2835. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.036

CSA (Canadian Standard Association). 2004. *Design of concrete structures*. CSA A23.3-04. Rexdale, ON, Canada: CSA.

Dai, J. G., & Bai, Y. L. (2014). Large rupture strain (LRS) fibre-reinforced polymer (FRP) composites for seismic retrofit of reinforced concrete (RC) piers. In *Advanced composites in bridge construction and repair* (pp. 117-139). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1533/9780857097019.1.117

Dai, K. Y., Lu, D. G., & Yu, X. H. (2021). Experimental investigation on the seismic performance of corroded reinforced concrete columns designed with low and high axial load ratios. *Journal of Building Engineering*, *44*, 102615. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102615

Dawood, A. O., Hayder, A. K., & Falih, R. S. (2021). Physical and mechanical properties of concrete containing PET wastes as a partial replacement for fine aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, *14*, e00482. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00482

del Rey Castillo, E., Griffith, M., & Ingham, J. (2018). Seismic behavior of RC columns flexurally strengthened with FRP sheets and FRP anchors. *Composite Structures*, *203*, 382-395. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.029

Faustino, P., Chastre, C., & Paula, R. (2014). Design model for square RC columns under compression confined with CFRP. *Composites Part B: Engineering*, *57*, 187-198. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.052

FEMA (Federal Emergency Management Agency). 1997. *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*. FEMA 273. Washington, DC: FEMA.

FEMA (Federal Emergency Management Agency). 2007. *Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components*. FEMA 461. Washington, DC: FEMA.

Frigione, M. (2010). Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste management*, *30*(6), 1101-1106. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.030

Galvão, J. C. A., Portella, K. F., Joukoski, A., Mendes, R., & Ferreira, E. S. (2011). Use of waste polymers in concrete for repair of dam hydraulic surfaces. *Construction and Building Materials*, *25*(2), 1049-1055. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.073

Gu, L., & Ozbakkaloglu, T. (2016). Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*, *51*, 19-42. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.005

Hama, S. M. (2022). Behavior of concrete incorporating waste plastic as fine aggregate subjected to compression, impact load and bond resistance. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, *26*(8), 3372-3386. https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1798287

Hameed, A. M., & Ahmed, B. A. F. (2019). Employment the plastic waste to produce the light weight concrete. *Energy Procedia*, *157*, 30-38. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.160

Hannawi, K., Kamali-Bernard, S., & Prince, W. (2010). Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste management*, *30*(11), 2312-2320. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.028

Harihanandh, M., & Karthik, P. (2022). Feasibility study of recycled plastic waste as fine aggregates in concrete. *Materials Today: Proceedings*, *52*, 1807-1811. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.459

He, A., Cai, J., Chen, Q. J., Liu, X., Huang, P., & Tang, X. L. (2018). Seismic behaviour of steel-jacket retrofitted reinforced concrete columns with recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, *158*, 624-639. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.053

Huang, H., Hao, R., Zhang, W., & Huang, M. (2019). Experimental study on seismic performance of square RC columns subjected to combined loadings. *Engineering Structures*, *184*, 194-204. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.095

Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Methods for multiple attribute decision making. *Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey*, 58-191. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3

Ilki, A., Kumbasar, N., & Koc, V. (2004). Low strength concrete members externally confined with FRP sheets. *Structural Engineering and Mechanics*, *18*(2), 167-194. https://doi.org/10.12989/sem.2004.18.2.167

Ismail, Z. Z., & Al-Hashmi, E. A. (2008). Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *Waste management*, *28*(11), 2041-2047. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.023

Ispir, M. (2015). Monotonic and cyclic compression tests on concrete confined with PET-FRP. *Journal of Composites for Construction*, *19*(1), 04014034. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000490

Jain, A., Sharma, N., Choudhary, R., Gupta, R., & Chaudhary, S. (2021). Utilization of non-metalized plastic bag fibers along with fly ash in concrete. *Construction and Building Materials*, *291*, 123329. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123329

Jang, S. J., & Yun, H. D. (2018). Combined effects of steel fiber and coarse aggregate size on the compressive and flexural toughness of high-strength concrete. *Composite Structures*, *185*, 203-211. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.009

Juki, M. I., Awang, M., Annas, M. M. K., Boon, K. H., Othman, N., binti Abdul Kadir, A., ... & Khalid, F. S. (2013a). Relationship between compressive, splitting tensile and flexural strength of concrete containing granulated waste polyethylene terephthalate (PET) bottles as fine aggregate. *Advanced materials research*, *795*, 356-359. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.795.356

Juki, M. I., Muhamad, K., Annas, M. M. K., Boon, K. H., Othman, N., binti Abdul Kadir, A., ... & Khalid, F. S. (2013b). Development of concrete mix design nomograph containing polyethylene terephtalate (PET) as fine aggregate. *Advanced Materials Research*, *701*, 12-16. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.701.12

Kangavar, M. E., Lokuge, W., Manalo, A., Karunasena, W., & Frigione, M. (2022). Investigation on the properties of concrete with recycled polyethylene terephthalate (PET) granules as fine aggregate replacement. *Case Studies in Construction Materials*, *16*, e00934. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00934

Kawecki, D., Wu, Q., Gonçalves, J. S., & Nowack, B. (2021). Polymer-specific dynamic probabilistic material flow analysis of seven polymers in Europe from 1950 to 2016. *Resources, Conservation and Recycling*, *173*, 105733. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105733

Kazemi, F., Asgarkhani, N., Shafighfard, T., Jankowski, R., & Yoo, D. Y. (2024). Machine-Learning Methods for Estimating Performance of Structural Concrete Members Reinforced with Fiber-Reinforced Polymers. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 1-33. https://doi.org/10.1007/s11831-024-10143-1

Kim, J. H., and Mander, J. B. (1999). "Truss modeling of reinforced concrete shear-flexure behavior." MCEER-99-0005, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, N.Y.

Kim, J. H., & Mander, J. B. (2007). Influence of transverse reinforcement on elastic shear stiffness of cracked concrete elements. *Engineering structures*, *29*(8), 1798-1807. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.10.001

Li, Q., Niu, D. T., Xiao, Q. H., Guan, X., & Chen, S. J. (2018). Experimental study on seismic behaviors of concrete columns confined by corroded stirrups and lateral strength prediction. *Construction and Building Materials*, *162*, 704-713. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.030

Liao, W. C., Perceka, W., & Wang, M. (2017). Experimental study of cyclic behavior of high-strength reinforced concrete columns with different transverse reinforcement detailing configurations. *Engineering Structures*, *153*, 290-301. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.10.011

Liu, C., Fan, J., Bai, G., Quan, Z., Fu, G., Zhu, C., & Fan, Z. (2019). Cyclic load tests and seismic performance of recycled aggregate concrete (RAC) columns. *Construction and Building Materials*, *195*, 682-694. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.078

Liu, K., Yan, J., & Zou, C. (2018). A pilot experimental study on seismic behavior of recycled aggregate concrete columns after freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, *164*, 497-507. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.160

Ma, Y., & Gong, J. X. (2018). Probability identification of seismic failure modes of reinforced concrete columns based on experimental observations. *Journal of Earthquake Engineering*, *22*(10), 1881-1899. https://doi.org/10.1080/13632469.2017.1309603

Manda, M. S., Rejab, M. R. M., Hassan, S. A., Wahit, M. U., & Amirnuddin, S. S. (2023). Splitting tensile strength study of tin slag polymer concrete. *Materials Today: Proceedings.* https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.115

Meena, A., & Ramana, P. V. (2022). Mathematical model valuation for recycled material mechanical strengths. *Materials Today: Proceedings*, *60*, 753-759. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.471

Merrington, A. (2017). Recycling of plastics. In *Applied plastics engineering handbook* (pp. 167-189). William Andrew Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00009-2

Mohammed, A. A. (2017a). Flexural behavior and analysis of reinforced concrete beams made of recycled PET waste concrete. *Construction and Building Materials*, *155*, 593-604. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.096

Mohammed, A. A. (2017b). Modelling the mechanical properties of concrete containing PET waste aggregate. *Construction and Building Materials*, *150*, 595-605. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.154

Nibudey, R. N., Nagarnaik, P. B., Parbat, D. K., & Pande, A. M. (2013). Strengths prediction of plastic fiber reinforced concrete (M30). *Int. J. Eng. Res. Appl*, *3*(1), 1818-1825.

Norhana, A. R., Kartini, K., & Hamidah, M. S. (2016, October). Recycled polyethylene terephthalate (PET) and rubber crumb as replacement to fine aggregate. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1774, No. 1). AIP Publishing. https://doi.org/10.1063/1.4965081

Olabi, M. N. (2021). *Düz-Yüzeyli Donatılı Betonarme Perde Duvarların Davranışının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi*. [Doktora tezi]. Sakarya Üniversitesi.

Pan, Z., & Li, B. (2013). Truss-arch model for shear strength of shear-critical reinforced concrete columns. *Journal of Structural Engineering*, *139*(4), 548-560. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000677

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. https://doi.org/10.5459/bnzsee.22.3.155-166

Paulay, T., & Priestley, M. N. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings* (Vol. 768). New York: Wiley.

Pimanmas, A., & Saleem, S. (2018). Dilation characteristics of PET FRP–confined concrete. *Journal of Composites for Construction*, *22*(3), 04018006. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000841

Pimanmas, A., & Saleem, S. (2019). Evaluation of existing stress–strain models and modeling of PET FRP–confined concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *31*(12), 04019303. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002941

Priestley, M. N., Verma, R., & Xiao, Y. (1994). Seismic shear strength of reinforced concrete columns. *Journal of structural engineering*, *120*(8), 2310-2329. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:8(2310)

Raheem, A. B., Noor, Z. Z., Hassan, A., Abd Hamid, M. K., Samsudin, S. A., & Sabeen, A. H. (2019). Current developments in chemical recycling of post-consumer polyethylene terephthalate wastes for new materials production: A review. *Journal of cleaner production*, *225*, 1052-1064. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.019

Rahimi, A., & García, J. M. (2017). Chemical recycling of waste plastics for new materials production. *Nature Reviews Chemistry*, *1*(6), 0046. https://doi.org/10.1038/s41570-017-0046

Rahmani, E., Dehestani, M., Beygi, M. H. A., Allahyari, H., & Nikbin, I. M. (2013). On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*, *47*, 1302-1308. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041

Rajput, A. S., & Sharma, U. K. (2018). Corroded reinforced concrete columns under simulated seismic loading. *Engineering Structures*, *171*, 453-463. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.097

Saikia, N., & Brito, J. D. (2013). Waste polyethylene terephthalate as an aggregate in concrete. *Materials Research*, *16*, 341-350. https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000017

Saikia, N., & De Brito, J. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, *34*, 385-401. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066

Saikia, N., & De Brito, J. (2014). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and building materials*, *52*, 236-244. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049

Saleem, S., Pimanmas, A., & Rattanapitikon, W. (2018). Lateral response of PET FRP-confined concrete. *Construction and Building Materials*, *159*, 390-407. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.116

Sancak, O. F., & Ozyurt, M. Z. (2024). PET Granule Replacement for Fine Aggregate in Concrete and FRP-Wrapping Effect: Overview of Experimental Data and Model Development. *Buildings*, *14*(12), 4009. https://doi.org/10.3390/buildings14124009

Saxena, R., Siddique, S., Gupta, T., Sharma, R. K., & Chaudhary, S. (2018). Impact resistance and energy absorption capacity of concrete containing plastic waste. *Construction and Building Materials*, *176*, 415-421. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.019

Seyhan, E. C., Goksu, C., Uzunhasanoglu, A., & Ilki, A. (2015). Seismic behavior of substandard RC columns retrofitted with embedded aramid fiber reinforced polymer (AFRP) reinforcement. *Polymers*, *7*(12), 2535-2557. https://doi.org/10.3390/polym7121527

Sezen, H., & Moehle, J. P. (2004). Shear strength model for lightly reinforced concrete columns. *Journal of structural engineering*, *130*(11), 1692-1703. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:11(1692)

Sharma, R., & Bansal, P. P. (2016). Use of different forms of waste plastic in concrete–a review. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 473-482. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.042

Siddique, R., Khatib, J., & Kaur, I. (2008). Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste management*, *28*(10), 1835-1852. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.011

Tayeh, B. A., Almeshal, I., Magbool, H. M., Alabduljabbar, H., & Alyousef, R. (2021). Performance of sustainable concrete containing different types of recycled plastic. *Journal of Cleaner Production*, *328*, 129517. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129517

TBDY. 2018. *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Ankara.

Tian, H., Zhou, Z., Wei, Y., & Zhang, L. (2021). Experimental and numerical investigation on the seismic performance of concrete-filled UHPC tubular columns. *Journal of Building Engineering*, *43*, 103118. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103118

Wang, D., Huang, L., Yu, T., & Wang, Z. (2017). Seismic performance of CFRP-retrofitted large-scale square RC columns with high axial compression ratios. *Journal of Composites for Construction*, *21*(5), 04017031. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000813

Wang, D., Wang, Z., Yu, T., & Li, H. (2018). Seismic performance of CFRP-retrofitted large-scale rectangular RC columns under lateral loading in different directions. *Composite Structures*, *192*, 475-488. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.03.029

Wang, Z., Li, Z., Yang, J. Q., Huang, F., & Feng, P. (2022). Axial compressive and seismic performance of GFRP wrapped square RC columns with different scales. *Journal of Building Engineering*, *62*, 105342. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105342

Xiong, B., Falliano, D., Restuccia, L., Di Trapani, F., Demartino, C., & Marano, G. C. (2023). High-strain rate compressive behavior of concrete with two different substituted recycled plastic aggregates: Experimental characterization and probabilistic modeling. *Construction and Building Materials*, *368*, 130279. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130279

Xu, S., Wu, C., Liu, Z., Han, K., Su, Y., Zhao, J., & Li, J. (2017). Experimental investigation of seismic behavior of ultra-high performance steel fiber reinforced concrete columns. *Engineering Structures*, *152*, 129-148. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.09.007

Yang, S. Y., Song, X. B., Jia, H. X., Chen, X., & Liu, X. L. (2016). Experimental research on hysteretic behaviors of corroded reinforced concrete columns with different maximum amounts of corrosion of rebar. *Construction and Building Materials*, *121*, 319-327. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.002

Yu, B., Liu, S., & Li, B. (2019). Probabilistic calibration for shear strength models of reinforced concrete columns. *Journal of Structural Engineering*, *145*(5), 04019026. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002307

Yu, F., Xu, G., Niu, D., Cheng, A., Wu, P., & Kong, Z. (2018). Experimental study on PVC-CFRP confined concrete columns under low cyclic loading. *Construction and Building Materials*, *177*, 287-302. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.111

Yuan, F., Chen, M., & Pan, J. (2019). Experimental study on seismic behaviours of hybrid FRP–steel-reinforced ECC–concrete composite columns. *Composites Part B: Engineering*, *176*, 107272. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107272

Yurt, Ü. (2020). High performance cementless composites from alkali activated GGBFS. *Construction and Building Materials*, *264*, 120222. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120222

Zhang, J., Cai, R., Li, C., & Liu, X. (2020). Seismic behavior of high-strength concrete columns reinforced with high-strength steel bars. *Engineering Structures*, *218*, 110861. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110861

Zhang, X., Hao, H., Shi, Y., Cui, J., & Zhang, X. (2016). Static and dynamic material properties of CFRP/epoxy laminates. *Construction and Building Materials*, *114*, 638-649. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.003

EKLER

EK A. PET ikameli beton için deneysel veri tabanı

EK A

Tablo A.1. PET ikameli beton için deneysel veri tabanı.

İkame türü	Yıl	Referans	28-gün basınç dayanımı testi (mm)	28-gün çekme dayanımı testi (mm)	28-gün eğilme dayanımı testi (mm)	PET Özgül Ağırlık	PET Yoğunluk (kg/m^3)	PET Boyut (mm)	PET (%)	Beton Yoğunluk (kg/m^3)	S/Ç oranı	28-gün basınç dayanımı (MPa)	28-gün silindir basınç dayanımı (MPa)	28-gün çekme dayanımı (MPa)	28-gün silindir çekme dayanımı (MPa)	28-gün eğilme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Çökme (mm)
Hacim	2005	Choi ve ark.	100x200 silindir	100x200 silindir					0	2300	0.53	31.5		3.27			23.5	100
			100x200 silindir	100x200 silindir		1.39	844	5-15	25	2220	0.53	29.7		2.65			23	153
			100x200 silindir	100x200 silindir		1.39	844	5-15	50	2130	0.53	26.3		2.25			21.2	199
			100x200 silindir	100x200 silindir		1.39	844	5-15	75	2010	0.53	21.8		2.04			18.5	223
			100x200 silindir	100x200 silindir					0	2300	0.49	34.6		3.27			23.3	105
			100x200 silindir	100x200 silindir		1.39	844	5-15	25	2230	0.49	33.7		2.76			22.8	154
			100x200 silindir	100x200 silindir		1.39	844	5-15	50	2120	0.49	29.1		2.35			18.1	180
			100x200 silindir	100x200 silindir		1.39	844	5-15	75	2000	0.49	23.2		1.94			16.7	214
			100x200 silindir	100x200 silindir					0	2300	0.45	37.2		3.32			25.5	135
			100x200 silindir	100x200 silindir		1.39	844	5-15	25	2260	0.45	33.8		2.8			18.7	169
			100x200 silindir	100x200 silindir		1.39	844	5-15	50	2160	0.45	31.8		2.55			17.3	184
			100x200 silindir	100x200 silindir		1.39	844	5-15	75	1940	0.45	24.9		2.04			15.6	205
Hacim	2009	Choi ve ark.	100x200 silindir	100x200 silindir					0	2300	0.53	32.05		3.26			23.45	100
			100x200 silindir	100x200 silindir		1.39	844	5-15	25	2218.29	0.53	30.34		2.62			22.63	153
			100x200 silindir	100x200 silindir		1.39	844	5-15	50	2130.59	0.53	26.75		2.24			21.19	199
			100x200 silindir	100x200 silindir		1.39	844	5-15	75	2011.55	0.53	22.56		2.07			18.83	223

Tablo A.2. (Devamı) PET ikameli beton için deneysel veri tabanı.

İkame türü	Yıl	Referans	28-gün basınç dayanımı testi (mm)	28-gün çekme dayanımı testi (mm)	28-gün eğilme dayanımı testi (mm)	PET Özgül Ağırlık	PET Yoğunluk (kg/m^3)	PET Boyut (mm)	PET (%)	Beton Yoğunluk (kg/m^3)	S/Ç oranı	28-gün basınç dayanımı (MPa)	28-gün silindir basınç dayanımı (MPa)	28-gün çekme dayanımı (MPa)	28-gün silindir çekme dayanımı (MPa)	28-gün eğilme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Çökme (mm)
			100x200 silindir	100x200 silindir					0	2300	0.49	36.1		3.26			18.22	105
			100x200 silindir	100x200 silindir		1.39	844	5-15	25	2228.19	0.49	34.77		2.76			23.16	154
			100x200 silindir	100x200 silindir		1.39	844	5-15	50	2117.39	0.49	29.82		2.34			17.97	180
			100x200 silindir	100x200 silindir		1.39	844	5-15	75	1997.53	0.49	24.33		1.97			16.99	214
			100x200 silindir	100x200 silindir					0	2300	0.45	37.81		3.31			25.43	135
			100x200 silindir	100x200 silindir		1.39	844	5-15	25	2260.35	0.45	34.06		2.72			22.34	169
			100x200 silindir	100x200 silindir		1.39	844	5-15	50	2160.28	0.45	32.31		2.53			17.23	184
			100x200 silindir	100x200 silindir		1.39	844	5-15	75	1941.45	0.45	27.59		2.08			15.89	205
Hacim	2009	Albano ve ark.	150x300 silindir	150x300 silindir	ASTM C 78*				0		0.5	27.86		2.79		4.25	29.48	86.9
			150x300 silindir	150x300 silindir	ASTM C 78*			2.6	10		0.5	22.81		2.45		4.58	22.33	64.7
			150x300 silindir	150x300 silindir	ASTM C 78*			2.6-11.4	10		0.5	22.4		2.51		4.64	22.85	74.5
			150x300 silindir	150x300 silindir	ASTM C 78*			11.4	10		0.5	22.04		2.37		3.68	21.1	69.4
			150x300 silindir	150x300 silindir	ASTM C 78*			2.6	20		0.5	17.4		1.89		3.51	16.16	42.1
			150x300 silindir	150x300 silindir	ASTM C 78*			2.6-11.4	20		0.5	18.31		2.19		4.11	16.1	49.5
			150x300 silindir	150x300 silindir	ASTM C 78*			11.4	20		0.5	13.9		1.91		1.65	15.06	0.01
			150x300 silindir	150x300 silindir	ASTM C 78*				0		0.6	21.26		2.33		3.83	22.59	79.3
			150x300 silindir	150x300 silindir	ASTM C 78*			2.6	10		0.6	16.68		1.69		4.04	18.18	40
			150x300 silindir	150x300 silindir	ASTM C 78*			2.6-11.4	10		0.6	18.25		2.17		3.51	18.44	52.6

Tablo A.3. (Devamı) PET ikameli beton için deneysel veri tabanı.

İkame türü	Yıl	Referans	28-gün basınç dayanımı testi (mm)	28-gün çekme dayanımı testi (mm)	28-gün eğilme dayanımı testi (mm)	PET Özgül Ağırlık	PET Yoğunluk (kg/m^3)	PET Boyut (mm)	PET (%)	Beton Yoğunluk (kg/m^3)	S/Ç oranı	28-gün basınç dayanımı (MPa)	28-gün silindir basınç dayanımı (MPa)	28-gün çekme dayanımı (MPa)	28-gün silindir çekme dayanımı (MPa)	28-gün eğilme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Çökme (mm)
			150x300 silindir	150x300 silindir	ASTM C 78*			11.4	10		0.6	13.95		2.25		3.44	20.64	30.3
			150x300 silindir	150x300 silindir	ASTM C 78*			2.6	20		0.6	13.07		1.45		2.95	14.02	23
			150x300 silindir	150x300 silindir	ASTM C 78*			2.6-11.4	20		0.6	12.75		1.74		2.79	15.97	20
			150x300 silindir	150x300 silindir	ASTM C 78*			11.4	20		0.6	8.97		1.49		2.32	11.68	0.01
Hacim	2013	Rahmani ve ark.	100x200 silindir						0		0.42	42.12						
			100x200 silindir			1.11	464	<7	5		0.42	44.27						
			100x200 silindir			1.11	464	<7	10		0.42	41.94						
			100x200 silindir			1.11	464	<7	15		0.42	38.75						
			100x200 silindir						0		0.54	33.39						
			100x200 silindir			1.11	464	<7	5		0.54	37.55						
			100x200 silindir			1.11	464	<7	10		0.54	33.68						
			100x200 silindir			1.11	464	<7	15		0.54	29.57						
			150x300 silindir	150x300 silindir	100x100x500				0	2281.58	0.42	38.71		3.98		6.27	36.38	70
			150x300 silindir	150x300 silindir	100x100x500	1.11	464	<7	5	2258.6	0.42	42.14		3.89		6.55	33.8	60
			150x300 silindir	150x300 silindir	100x100x500	1.11	464	<7	10	2238.85	0.42	39.71		3.66		5.92	31.45	50
			150x300 silindir	150x300 silindir	100x100x500	1.11	464	<7	15	2209.43	0.42	36.73		3.35		5.4	28.61	40
			150x300 silindir	150x300 silindir	100x100x500				0	2221.83	0.54	31.58		3.76		5.64	33.81	80
			150x300 silindir	150x300 silindir	100x100x500	1.11	464	<7	5	2207.28	0.54	35.36		3.55		6.03	31.2	65

Tablo A.4. (Devamı) PET ikameli beton için deneysel veri tabanı.

İkame türü	Yıl	Referans	28-gün basınç dayanımı testi (mm)	28-gün çekme dayanımı testi (mm)	28-gün eğilme dayanımı testi (mm)	PET Özgül Ağırlık	PET Yoğunluk (kg/m^3)	PET Boyut (mm)	PET (%)	Beton Yoğunluk (kg/m^3)	S/Ç oranı	28-gün basınç dayanımı (MPa)	28-gün silindir basınç dayanımı (MPa)	28-gün çekme dayanımı (MPa)	28-gün silindir çekme dayanımı (MPa)	28-gün eğilme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Çökme (mm)
			150x300 silindir	150x300 silindir	100x100x500	1.11	464	<7	10	2175.87	0.54	31.76		3.25		5.49	28.79	50
			150x300 silindir	150x300 silindir	100x100x500	1.11	464	<7	15	2147.68	0.54	28.91		2.98		5.2	25.85	35
			50 küp						0		0.42	55.4	44.32					
			50 küp			1.11	464	<7	5		0.42	59.51	47.61					
			50 küp			1.11	464	<7	10		0.42	55.5	44.40					
			50 küp			1.11	464	<7	15		0.42	52.07	41.66					
			50 küp						0		0.54	46.17	36.94					
			50 küp			1.11	464	<7	5		0.54	49.8	39.84					
			50 küp			1.11	464	<7	10		0.54	45.88	36.70					
			50 küp			1.11	464	<7	15		0.54	42.09	33.67					
			100 küp						0		0.42	54.49	43.59					
			100 küp			1.11	464	<7	5		0.42	55.56	44.45					
			100 küp			1.11	464	<7	10		0.42	52.55	42.04					
			100 küp			1.11	464	<7	15		0.42	50.46	40.37					
			100 küp						0		0.54	41.85	33.48					
			100 küp			1.11	464	<7	5		0.54	48.01	38.41					
			100 küp			1.11	464	<7	10		0.54	43.09	34.47					
			100 küp			1.11	464	<7	15		0.54	41.57	33.26					
			150 küp						0		0.42	52.2	41.76					
			150 küp			1.11	464	<7	5		0.42	53.24	42.59					
			150 küp			1.11	464	<7	10		0.42	50.52	40.42					
			150 küp			1.11	464	<7	15		0.42	46.59	37.27					
			150 küp						0		0.54	41.1	32.88					
			150 küp			1.11	464	<7	5		0.54	44.76	35.81					
			150 küp			1.11	464	<7	10		0.54	39.94	31.95					
			150 küp			1.11	464	<7	15		0.54	38.52	30.82					
Hacim	2013	Saikia ve De Brito	NP EN 12390-3*	NP EN 12390-6*	NP EN 12390-5*				0	2409.41	0.53	43.07	34.46	3.49		4.74		
			NP EN 12390-3*	NP EN 12390-6*	NP EN 12390-5*	1.34	555	0.5-4	5	2347.61	0.57	36.11	28.89	3.07		4.26		
			NP EN 12390-3*	NP EN 12390-6*	NP EN 12390-5*	1.34	555	0.5-4	10	2304.07	0.6	30.79	24.63	2.83		3.76		
			NP EN 12390-3*	NP EN 12390-6*	NP EN 12390-5*	1.34	555	0.5-4	15	2231.04	0.64	25.33	20.26	2.28		2.99		

Tablo A.5. (Devamı) PET ikameli beton için deneysel veri tabanı.

İkame türü	Yıl	Referans	28-gün basınç dayanımı testi (mm)	28-gün çekme dayanımı testi (mm)	28-gün eğilme dayanımı testi (mm)	PET Özgül Ağırlık	PET Yoğunluk (kg/m^3)	PET Boyut (mm)	PET (%)	Beton Yoğunluk (kg/m^3)	S/Ç oranı	28-gün basınç dayanımı (MPa)	28-gün silindir basınç dayanımı (MPa)	28-gün çekme dayanımı (MPa)	28-gün silindir çekme dayanımı (MPa)	28-gün eğilme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Çökme (mm)
			NP EN 12390-3*	NP EN 12390-6*	NP EN 12390-5*	1.34	827	0.5-4	5	2364.47	0.53	37.82	30.26	3.21		4.54		
			NP EN 12390-3*	NP EN 12390-6*	NP EN 12390-5*	1.34	827	0.5-4	10	2339.89	0.52	36.86	29.49	3.13		4.24		
			NP EN 12390-3*	NP EN 12390-6*	NP EN 12390-5*	1.34	827	0.5-4	15	2304.07	0.52	33.41	26.73	2.87		3.98		
Hacim	2013b	Juki ve ark.	BS 1881-Part 116-83*	BS 1881: Part 117*					0	2386.18	0.45	31.34	25.07	3.21			31.29	
			BS 1881-Part 116-83*	BS 1881: Part 117*				<5	25	2290.85	0.45	27.91	22.33	2.7			26.89	
			BS 1881-Part 116-83*	BS 1881: Part 117*				<5	50	2209.76	0.45	22.99	18.39	2.02			21.55	
			BS 1881-Part 116-83*	BS 1881: Part 117*				<5	75	2041.87	0.45	17.04	13.63	1.57			10.33	
			BS 1881-Part 116-83*	BS 1881: Part 117*					0	2371.95	0.55	26.76	21.41	3.52			30.87	
			BS 1881-Part 116-83*	BS 1881: Part 117*				<5	25	2315.04	0.55	25.39	20.31	2.98			18.71	
			BS 1881-Part 116-83*	BS 1881: Part 117*				<5	50	2249.59	0.55	20.36	16.29	2.38			16.12	
			BS 1881-Part 116-83*	BS 1881: Part 117*				<5	75	2232.52	0.55	15.78	12.62	2.02			10.07	
			BS 1881-Part 116-83*	BS 1881: Part 117*					0	2380.49	0.65	25.39	20.31	2.97			36.73	
			BS 1881-Part 116-83*	BS 1881: Part 117*				<5	25	2286.59	0.65	25.28	20.22	2.21			25.82	
			BS 1881-Part 116-83*	BS 1881: Part 117*				<5	50	2262.4	0.65	19.22	15.38	1.42			18.68	
			BS 1881-Part 116-83*	BS 1881: Part 117*				<5	75	2185.57	0.65	15.56	12.45	1.19			13.65	
Hacim	2013a	Juki ve ark.	100x200 silindir	100x200 silindir	100x100x500				0	2372.59	0.55	26.69		3.52		4.99	30	
			100x200 silindir	100x200 silindir	100x100x500			<5	25	2343.22	0.55	22.83		2.99		4.75	23	
			100x200 silindir	100x200 silindir	100x100x500			<5	50	2322.79	0.55	20.37		2.38		3.8	15	

Tablo A.6. (Devamı) PET ikameli beton için deneysel veri tabanı.

İkame türü	Yıl	Referans	28-gün basınç dayanımı testi (mm)	28-gün çekme dayanımı testi (mm)	28-gün eğilme dayanımı testi (mm)	PET Özgül Ağırlık	PET Yoğunluk (kg/m^3)	PET Boyut (mm)	PET (%)	Beton Yoğunluk (kg/m^3)	S/Ç oranı	28-gün basınç dayanımı (MPa)	28-gün silindir basınç dayanımı (MPa)	28-gün çekme dayanımı (MPa)	28-gün silindir çekme dayanımı (MPa)	28-gün eğilme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Çökme (mm)
			100x200 silindir	100x200 silindir	100x100x500			<5	75	2231.94	0.55	15.2		2.02		2.61	9	
Hacim	2014	Saikia ve De Brito	150 küp	100x150 silindir	150x150x600				0	2387	0.53	42.96	34.37	3.45		4.72	39.79	127
			150 küp	100x150 silindir	150x150x600	1.32	555	0.5-4	5	2336	0.57	36.2	28.96	3.12		4.36	35.1	122
			150 küp	100x150 silindir	150x150x600	1.32	555	0.5-4	10	2290	0.6	30.92	24.74	2.66		3.75	29.9	122
			150 küp	100x150 silindir	150x150x600	1.32	555	0.5-4	15	2243	0.64	25.53	20.42	2.22		2.98	24.69	120
			150 küp	100x150 silindir	150x150x600	1.36	827	0.5-4	5	2347	0.53	37.78	30.22	3.29		4.51	36.15	122
			150 küp	100x150 silindir	150x150x600	1.36	827	0.5-4	10	2297	0.52	36.9	29.52	3.16		4.24	35.94	122
			150 küp	100x150 silindir	150x150x600	1.36	827	0.5-4	15	2254	0.52	33.19	26.55	2.81		3.97	31.04	132
Hacim	2017a	Mohammed	100x200 silindir						0	2375	0.5	33.07						
			100x200 silindir				353	3-12	5	2362	0.5	27.05						
			100x200 silindir				353	3-12	10	2407	0.5	31.82						
			100x200 silindir				353	3-12	15	2348	0.5	32.57						
			100x200 silindir						0	2350	0.5	31.36						
			100x200 silindir				353	3-12	5	2303	0.5	23.81						
			100x200 silindir				353	3-12	10	2317	0.5	24.92						
			100x200 silindir				353	3-12	15	2314	0.5	23.66						
Hacim	2018	Al-Hadithi ve Al-Ani							0	2350.51	0.29	69	55.20				43.06	
						1.29	447	<4.75	2.5	2339.36	0.29	60.38	48.30				40.81	
						1.29	447	<4.75	5	2331.92	0.29	56.93	45.54				40.76	
						1.29	447	<4.75	7.5	2313.35	0.29	50.35	40.28				40.52	

Tablo A.7. (Devamı) PET ikameli beton için deneysel veri tabanı.

İkame türü	Yıl	Referans	28-gün basınç dayanımı testi (mm)	28-gün çekme dayanımı testi (mm)	28-gün eğilme dayanımı testi (mm)	PET Özgül Ağırlık	PET Yoğunluk (kg/m^3)	PET Boyut (mm)	PET (%)	Beton Yoğunluk (kg/m^3)	S/Ç oranı	28-gün basınç dayanımı (MPa)	28-gün silindir basınç dayanımı (MPa)	28-gün çekme dayanımı (MPa)	28-gün silindir çekme dayanımı (MPa)	28-gün eğilme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Çökme (mm)
Hacim	2022	Kangavar ve ark.	100x200 silindir	100x200 silindir	150x150x700				0	2417	0.45	34.23		3.96		3.96	24.41	98
			100x200 silindir	100x200 silindir	150x150x700	1.34	1380	<4.75	10	2340	0.45	37.34		4.3		4.33	24.13	98
			100x200 silindir	100x200 silindir	150x150x700	1.34	1380	<4.75	30	2125	0.45	33.78		3.81		3.99	20.25	94
			100x200 silindir	100x200 silindir	150x150x700	1.34	1380	<4.75	50	1845	0.45	25.16		3.31		3.47	18.93	90
Hacim	2022	Babafemi ve ark.	100 küp	100 küp					0		0.5	36.37	29.10	4.01	3.21			100
			100 küp	100 küp		1.47		<3	5		0.5	37.37	29.90	3.81	3.05			100
			100 küp	100 küp		1.47		<3	10		0.5	37.27	29.82	3.63	2.90			124
			100 küp	100 küp		1.47		<3	15		0.5	35	28.00	3.57	2.86			135
Hacim	2022	Hama	150x300 silindir						0	2428	0.42	35.76					27.4	96
			150x300 silindir			1.36		<4.75	10	2392	0.42	36.8					24.05	94
			150x300 silindir			1.36		<4.75	15	2374	0.42	34.78					22.31	92
			150x300 silindir			1.36		<4.75	20	2358	0.42	28.48					21.82	86
			150x300 silindir			1.36		<4.75	25	2340	0.42	25.63					20.42	80
Hacim	2023	Xiong ve ark.	150x300 silindir						0	2454	0.44	53.2					30.15	235
			150x300 silindir					≤1.6	5	2424	0.44	50.2					24.93	215
			150x300 silindir					≤1.6	10	2420	0.44	46.9					26.9	200
			150x300 silindir					≤1.6	20	2412	0.44	43.7					24.94	205
			150x300 silindir					≤1.6	30	2389	0.44	40.8					21.87	180
Hacim	2024	Sancak ve Ozyurt	100x200 silindir	100x200 silindir	100x100x400				0	2307.88	0.5	26.91		2.46		3.37	30.57	48
			100x200 silindir	100x200 silindir	100x100x400	1.39	1280	2	10	2271.66	0.5	25.11		2.35		3.23	27.22	45

Tablo A.8. (Devamı) PET ikameli beton için deneysel veri tabanı.

İkame türü	Yıl	Referans	28-gün basınç dayanımı testi (mm)	28-gün çekme dayanımı testi (mm)	28-gün eğilme dayanımı testi (mm)	PET Özgül Ağırlık	PET Yoğunluk (kg/m^3)	PET Boyut (mm)	PET (%)	Beton Yoğunluk (kg/m^3)	S/Ç oranı	28-gün basınç dayanımı (MPa)	28-gün silindir basınç dayanımı (MPa)	28-gün çekme dayanımı (MPa)	28-gün silindir çekme dayanımı (MPa)	28-gün eğilme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Çökme (mm)
			100x200 silindir	100x200 silindir	100x100x400	1.39	1280	2	20	2234.49	0.5	23.31		2.24		3.1	25.06	40
			100x200 silindir	100x200 silindir	100x100x400	1.39	1280	2	30	2177.94	0.5	21.8		2.16		2.3	21.32	38
Ağırlık	2008	Ismail ve AL-Hashmi	150 küp		ASTM C293*				0	2399.02	0.53	44	35.20			5.88		75
			150 küp		ASTM C293*		368.7	0.5-12	10	2307.11	0.53	33.23	26.58			4.59		24
			150 küp		ASTM C293*		368.7	0.5-12	15	2244.68	0.53	29.64	23.71			4.26		9
			150 küp		ASTM C293*		368.7	0.5-12	20	2223.87	0.53	29.63	23.70			4.06		3
Ağırlık	2010	Frigione ve ark.	150 küp	150x300 silindir					0		0.45	68	54.40	6.1				
			150 küp	150x300 silindir		1.32	660	<2.36	5		0.45	67.5	54.00	6				
			150 küp	150x300 silindir		1.32	660	<2.36	0		0.55	41.5	33.20	4.2				
			150 küp	150x300 silindir		1.32	660	<2.36	5		0.55	40.7	32.56	4.1				
			150 küp	150x300 silindir					0		0.45	70	56.00	6.3				
			150 küp	150x300 silindir		1.32	660	<2.36	5		0.45	69.7	55.76	6.3				
			150 küp	150x300 silindir		1.32	660	<2.36	0		0.55	44	35.20	4.7				
			150 küp	150x300 silindir		1.32	660	<2.36	5		0.55	43.2	34.56	4.6				
Ağırlık	2011	Galvao ve ark.	NBR 5739/07*	NBR 7222/94*					0		0.45	34.13		3.35				
			NBR 5739/07*	NBR 7222/94*		1.32		1.2-12.5	0.5		0.45	37.67		3.75				
			NBR 5739/07*	NBR 7222/94*		1.32		1.2-12.5	1		0.45	39.52		3.6				
			NBR 5739/07*	NBR 7222/94*		1.32		1.2-12.5	2.5		0.45	35.98		3.69				
			NBR 5739/07*	NBR 7222/94*		1.32		1.2-12.5	5		0.45	34.13		3.3				
			NBR 5739/07*	NBR 7222/94*		1.32		1.2-12.5	7.5		0.45	28.9		3.49				

Tablo A.9. (Devamı) PET ikameli beton için deneysel veri tabanı.

İkame türü	Yıl	Referans	28-gün basınç dayanımı testi (mm)	28-gün çekme dayanımı testi (mm)	28-gün eğilme dayanımı testi (mm)	PET Özgül Ağırlık	PET Yoğunluk (kg/m^3)	PET Boyut (mm)	PET (%)	Beton Yoğunluk (kg/m^3)	S/Ç oranı	28-gün basınç dayanımı (MPa)	28-gün silindir basınç dayanımı (MPa)	28-gün çekme dayanımı (MPa)	28-gün silindir çekme dayanımı (MPa)	28-gün eğilme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Çökme (mm)
Ağırlık	2016	Azhdarpour ve ark.	150x300 silindir	150x300 silindir	130x150x450				0	2158.05	0.5	35		2.5		4.4	48.87	
			150x300 silindir	150x300 silindir	130x150x450	1.38		0.05-4.9	5	2119.02	0.5	51		3.1		6.1		
			150x300 silindir	150x300 silindir	130x150x450	1.38		0.05-4.9	10	2087.93	0.5	38		3.3		4.9	27.06	
			150x300 silindir	150x300 silindir	130x150x450	1.38		0.05-4.9	15	2050.12	0.5	31		2.9		4.8		
			150x300 silindir	150x300 silindir	130x150x450	1.38		0.05-4.9	20	2014.15	0.5	29		2.8		4.3	16.98	
			150x300 silindir	150x300 silindir	130x150x450	1.38		0.05-4.9	25	1979.39	0.5	22		2.2		4.1		
			150x300 silindir	150x300 silindir	130x150x450	1.38		0.05-4.9	30	1935.49	0.5	19		1.6		3	9.44	
Ağırlık	2016	Norhana ve ark.	100 küp		100x100x500				0		0.5	44	35.20			5.6		
			100 küp		100x100x500			<5	10		0.5	35	28.00			4.7		
			100 küp		100x100x500			<5	20		0.5	30	24.00			4.5		
			100 küp		100x100x500			<5	30		0.5	24	19.20			4.3		
Ağırlık	2018	Saxena ve ark.	100 küp						0		0.45	26.7	21.36					
			100 küp					<4.75	5		0.45	26.11	20.89					
			100 küp					<4.75	10		0.45	25.61	20.49					
			100 küp					<4.75	15		0.45	13.89	11.11					
			100 küp					<4.75	20		0.45	5.4	4.32					
Ağırlık	2020	Almeshal ve ark.	BS 1881*	ASTM C 496*	ASTM C 293*				0	2394.91	0.54	35.6	28.48	3.11		7.64		89
			BS 1881*	ASTM C 496*	ASTM C 293*		1410	0.075-4	10	2369.21	0.54	35.2	28.16	2.78		7.46		78
			BS 1881*	ASTM C 496*	ASTM C 293*		1410	0.075-4	20	2297.42	0.54	34.11	27.29	2.51		6.83		62
			BS 1881*	ASTM C 496*	ASTM C 293*		1410	0.075-4	30	2211.46	0.54	24.58	19.66	2.01		5.92		44
			BS 1881*	ASTM C 496*	ASTM C 293*		1410	0.075-4	40	1992.73	0.54	14.25	11.40	1.74		3.21		23
			BS 1881*	ASTM C 496*	ASTM C 293*		1410	0.075-4	50	1806.12	0.54	3.36	2.69	0.45		1.21		10

Tablo A.10. (Devamı) PET ikameli beton için deneysel veri tabanı.

İkame türü	Yıl	Referans	28-gün basınç dayanımı testi (mm)	28-gün çekme dayanımı testi (mm)	28-gün eğilme dayanımı testi (mm)	PET Özgül Ağırlık	PET Yoğunluk (kg/m^3)	PET Boyut (mm)	PET (%)	Beton Yoğunluk (kg/m^3)	S/Ç oranı	28-gün basınç dayanımı (MPa)	28-gün silindir basınç dayanımı (MPa)	28-gün çekme dayanımı (MPa)	28-gün silindir çekme dayanımı (MPa)	28-gün eğilme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Çökme (mm)
Ağırlık	2021	Bamigboye ve ark.	ASTM. C39/ C39M-20*	100x200 silindir					0		0.55	31		3.2				30
			ASTM. C39/ C39M-20*	100x200 silindir				0.075-5	10		0.55	22.3		2.81				45
			ASTM. C39/ C39M-20*	100x200 silindir				0.075-5	20		0.55	22		2.57				60
			ASTM. C39/ C39M-20*	100x200 silindir				0.075-5	30		0.55	21.7		2.45				100
			ASTM. C39/ C39M-20*	100x200 silindir				0.075-5	40		0.55	20.7		2.41				105
			ASTM. C39/ C39M-20*	100x200 silindir				0.075-5	100		0.55	16.3		2.02				40
Ağırlık	2021	Dawood ve ark.	150 küp	100x200 silindir	100x100x500	1.38		0.6-3	0	2361.39	0.41	34.79	27.83	2.41		4.54	27.14	160
			150 küp	100x200 silindir	100x100x500	1.38		0.6-3	5	2355.57	0.41	46.79	37.43	2.6		5.76	24.47	140
			150 küp	100x200 silindir	100x100x500	1.38		0.6-3	7.5	2303.61	0.41	49.58	39.66	3.06		5.88	22.65	130
			150 küp	100x200 silindir	100x100x500	1.38		0.6-3	10	2296.58	0.41	44.92	35.94	2.86		5.71	22.62	120
			150 küp	100x200 silindir	100x100x500	1.38		0.6-3	12.5	2278.16	0.41	43.3	34.64	2.86		5.33	22.39	100
			150 küp	100x200 silindir	100x100x500	1.38		0.6-3	15	2223.04	0.41	35.62	28.50	2.43		4.53	22.06	80
			150 küp	100x200 silindir	100x100x500	1.38		0.6-3	20	2193.79	0.41	32.75	26.20	2.32		4.33	21.08	60
Ağırlık	2021	Tayeh ve ark.	100 küp	150x300 silindir	100x100x500	0.9-0.96		0.075-2	0	2448.34	0.51	39.76	31.81	5.56		7.96		103
			100 küp	150x300 silindir	100x100x500	0.9-0.96		0.075-2	10	2442.22	0.51	39.01	31.21	5.25		7.65		138
			100 küp	150x300 silindir	100x100x500	0.9-0.96		0.075-2	20	2400.41	0.51	33.59	26.87	5.13		7.43		175
			100 küp	150x300 silindir	100x100x500	0.9-0.96		0.075-2	30	2396.33	0.51	33.21	26.57	4.25		7.33		233
			100 küp	150x300 silindir	100x100x500	0.9-0.96		0.075-2	40	2343.31	0.51	31.15	24.92	4.17		6.77		299

Tablo A.11. (Devamı) PET ikameli beton için deneysel veri tabanı.

İkame türü	Yıl	Referans	28-gün basınç dayanımı testi (mm)	28-gün çekme dayanımı testi (mm)	28-gün eğilme dayanımı testi (mm)	PET Özgül Ağırlık	PET Yoğunluk (kg/m^3)	PET Boyut (mm)	PET (%)	Beton Yoğunluk (kg/m^3)	S/Ç oranı	28-gün basınç dayanımı (MPa)	28-gün silindir basınç dayanımı (MPa)	28-gün çekme dayanımı (MPa)	28-gün silindir çekme dayanımı (MPa)	28-gün eğilme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Çökme (mm)
Ağırlık	2022	Harihanveh ve Karthik	150 küp		100x100x500				0		0.45	37.8	30.24	4.27		3.75		120
			150 küp		100x100x500			1-2	5		0.45	39.99	31.99	4.46		3.94		110
			150 küp		100x100x500			1-2	10		0.45	38.25	30.60	4.33		3.78		70
			150 küp		100x100x500			1-2	15		0.45	24.225	19.38	3.63		2.51		20
			150 küp		100x100x500			1-2	20		0.45	19.55	15.64	2.92		2.08		0
			150 küp		100x100x500			1-2	25		0.45	14.02	11.22	2.56		1.58		0

*Çalışmada numune boyutları değil uyulan standart belirtilmiştir.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ömer Fatih SANCAK

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans :** 2018, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans :** 2019, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği
- **Yükseklisans :** 2020, Sakarya Üniversitesi, İşletme
- **Yükseklisans :** 2021, Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Bilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2022 yılından itibaren Doğuş Üniversitesi İnşaat Teknolojisi Bölümünde öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Sancak, O. F., & Ozyurt, M. Z. (2024). PET Granule Replacement for Fine Aggregate in Concrete and FRP-Wrapping Effect: Overview of Experimental Data and Model Development. *Buildings*, *14*(12), 4009.

DİĞER ESERLER:

- Sancak, O. F., & Ozyurt, M. Z. (2022). The effect of iron chip additive on structural behavior of under-reinforced and over-reinforced cantilever beams. *Revista de la construcción*, *21*(3), 768-777.
- Ozyurt, M. Z., & Sancak, O. F. (2022). The effect of stirrup spacing and hook angle on RC cantilever beams with iron chip waste. *Emerging Materials Research*, *11*(3), 331-337.

- Özyurt, M. Z., & Sancak, Ö. F. (2021). Etriye Kanca Açısı ve %20 Demir Talaşı Katkısının Betonarme Konsol Kirişin Davranışına Etkisi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *9*(1), 307-321.