



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**BETONARME YAPI ELEMANLARINDA
GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ PET ATIĞININ
KULLANILMASI**

Fidan GÜZEL

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Eylül-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Fidan GÜZEL tarafından hazırlanan “**Betonarme Yapı Elemanlarında Geri Dönüştürülmüş PET Atığının Kullanılması**” adlı tez çalışması **10/09/2025** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN

.....

Danışman

Doç. Dr. Yunus DERE

.....

Üye

Prof. Dr. Hasan Hüsnü KORKMAZ

.....

Üye

Doç. Dr. Ceyhun AKSOYLU

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Nebi ÖZDÖNER

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

Doç. Dr. Yasin Onuralp ÖZKILIÇ bu tez çalışmasının ikinci danışmanıdır.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Fidan GÜZEL

Tarih: 06/10/2025

ÖZET

DOKTORA TEZİ

BETONARME YAPI ELEMANLARINDA GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ PET ATIĞININ KULLANILMASI

Fidan GÜZEL

NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Doç. Dr. Yunus DERE

2025, 107 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Yunus DERE

Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN

Prof. Dr. Hasan Hüsnü KORKMAZ

Doç. Dr. Ceyhun AKSOYLU

Dr. Öğr. Üyesi Nebi ÖZDÖNER

Poliyeten tereftalat (PET) atık, yaygın olarak kullanılması nedeniyle en bol bulunan plastik atık türlerinden biridir. PET atıklarının bertarafı için çeşitli geliştirilen yöntemler arasında betona ilave edilerek kullanımı, etkili bir atık yönetimi sağlamaktadır. Bu çalışma, parçalanmış PET ilavesinin beton malzeme özellikleri ve betonarme kirişler üzerindeki etkisini incelemektedir. PET atığı, beton hacmine göre altı farklı oranda betona dahil edilmiştir: %0 (referans), %1, %3, %5, %10 ve %20. Ayrıca beton üretimi için iki farklı çimento tipi kullanılırken (CEM II 32.5 ve CEM II 42.5), betonarme kiriş için CEM IV 32.5 çimentosu tercih edilmiştir. Betonarme kirişler 8 mm, 10 mm ve 12 mm çaplarında çekme donatıları ile oluşturulmuştur. Etriye aralığının etkisini incelemek amacıyla ise, 16 cm, 20 cm ve 27 cm etriye aralıkları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, betondaki PET oranı arttıkça işlenebilirliğin azaldığını göstermektedir. Ayrıca, %3'e kadar PET ilavesinin betonun basınç dayanımı üzerinde olumsuz bir etki gözlenmemiştir. Bu orandan fazla PET ilavesi, basınç dayanımında önemli bir azalmaya neden olmuştur. Beton içerisindeki PET oranının artması, yarmada çekme dayanımını artırmıştır. Eğilme dayanımı ise %10'a kadar PET ilavesiyle artmıştır. Çalışmada donma-çözülme ve yüksek sıcaklık etkilerinin basınç dayanımı üzerindeki etkilerine odaklanılmış ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri ile desteklenmiştir. Elde edilen sonuçlar, betona PET ilavesinin donma-çözülme etkisini iyileştirdiğini, PET oranı arttıkça basınç dayanımındaki azalmaların daha düşük seviyede gerçekleştiğini göstermiştir. Ayrıca, CEM II 32.5 çimentosu ile üretilen hem referans hem de PET katkılı tüm beton karışımlarında, 100°C ve 150°C'de basınç dayanımında artış gözlenmiş, daha yüksek sıcaklıklarda (200°C ve 300°C) ise dayanım değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Buna karşın, CEM II 42.5 çimentosuna dayalı tüm karışımlar, tüm sıcaklık seviyelerinde basınç dayanımında düşüş göstermiştir. SEM ve EDS analizleri ise, betona PET ilavesinin mikro yapıyı ve element bileşimini değiştirdiğini, donma-çözülme döngülerine maruz kaldığında yapısal bütünlüğün korunmasına ve dayanım kaybının azaltılmasına katkı sağladığını ortaya koymuştur. %5'e kadar PET ilavesinin daha büyük çaplı çekme donatısına sahip betonarme kirişlerde daha yüksek taşıma kapasitesi ve rijitlik sağladığı gözlenmiştir. Buna karşın, %5'ten fazla PET ilavesi, 8 mm çapında donatılı kirişlerde sünekliği ve şekil değiştirme kapasitesini önemli ölçüde artırmıştır. Ayrıca, sık etriye aralıkları, özellikle 16 cm aralık, her PET oranında daha yüksek taşıma kapasitesi ve süneklik sağlamıştır. Çekme donatısı çapı ve etriye aralığından bağımsız olarak, %10 ve %20 PET ilaveleri kirişlerin taşıma kapasitesini düşürürken, şekil değiştirme kapasitelerini artırmıştır.

Anahtar Kelimeler: Betonarme Kiriş, Betonun Mekanik Özellikleri, Donma-Çözülme, Nihai Taşıma Kapasitesi, PET Atığı, Sıcaklık Etkisi, Süneklik, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

ABSTRACT

Ph.D THESIS

USE OF RECYCLED PET WASTE IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURAL ELEMENTS

Fidan GÜZEL

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY IN CIVIL ENGINEERING**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Yunus DERE

2025, 107 Pages

Jury

**Assoc. Prof. Dr. Yunus DERE
Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN
Prof. Dr. Hasan Hüsnü KORKMAZ
Assoc. Prof. Dr. Ceyhun AKSOYLU
Asst. Prof. Dr. Nebi ÖZDÖNER**

Polyethylene terephthalate (PET) waste is one of the most abundant types of plastic waste due to its widespread use. Among the various methods developed for its disposal, incorporating PET into concrete offers an effective waste management solution. This study investigates the effects of shredded PET addition on the material properties of concrete and the structural performance of reinforced concrete beams. PET waste was added to concrete at six different volume ratios: 0% (reference), 1%, 3%, 5%, 10%, and 20%. Two different cements (CEM II 32.5 and CEM II 42.5) were used for concrete production, while CEM IV 32.5 cement was preferred for reinforced concrete beams. The beams were reinforced with tensile steel bars of 8 mm, 10 mm, and 12 mm diameters. To examine the influence of stirrup spacing, 16 cm, 20 cm, and 27 cm intervals were used. The results showed that increasing the PET content reduced workability. Up to 3% PET addition had no adverse effect on compressive strength, but higher percentages led to significant reductions. However, splitting tensile strength increased with PET content, and flexural strength improved with additions up to 10%. The study also focused on the effects of freeze-thaw cycles and high temperatures on compressive strength, supported by Scanning Electron Microscope (SEM) analyses. The findings revealed that PET addition improved resistance to freeze-thaw damage and mitigated strength loss at higher PET ratios. Concrete mixes with CEM II 32.5 cement showed increased compressive strength at 100°C and 150°C, but strength declined at 200°C and 300°C. In contrast, all mixes with CEM II 42.5 cement exhibited reduced compressive strength across all temperature levels. SEM and Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) analyses confirmed that PET altered the microstructure and elemental composition of concrete, contributing to structural integrity and reduced strength degradation under freeze-thaw conditions. Reinforced concrete beams with up to 5% PET and larger-diameter tensile reinforcement exhibited greater load-carrying capacity and stiffness. On the other hand, PET additions exceeding 5% significantly enhanced ductility and deformation capacity in beams with 8 mm reinforcement. Tighter stirrup spacing, particularly 16 cm, improved both load capacity and ductility at all PET levels. Regardless of reinforcement diameter and stirrup spacing, 10% and 20% PET additions reduced load-carrying capacity but increased deformation capacity.

Keywords: Ductility, Freeze-Thaw, Mechanical Properties of Concrete, PET Waste, Reinforced Concrete Beam, Scanning Electron Microscope (SEM), Temperature Effect, Ultimate Load-Bearing Capacity

ÖNSÖZ

Geri dönüştürülmüş pet atığının yeniden kullanılması sürecine önemli derecede katkı sağlayacağına ve yeni bir bakış açısı oluşturacağını düşündüğüm “Betonarme Yapı Elemanlarında Geri Dönüştürülmüş PET Atığının Kullanılması” adlı bu çalışma, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında doktora tezi olarak hazırlanmıştır.

Öncelikle, tez çalışmalarım sırasında bana sürekli destek ve anlayış gösteren, bilgi ve tecrübeleriyle bana yardımcı olan tez danışmanlarım ve değerli hocalarım Doç. Dr. Yunus DERE ve Doç. Dr. Yasin Onuralp ÖZKILIÇ’a en içten teşekkürlerimi iletmek istiyorum. Her adımda sağladıkları yardımlar ve öneriler için minnettarım.

Tez İzleme Komitesi jürimde görev alan kıymetli öğretim üyeleri Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN ile Prof. Dr. Hasan Hüsnü KORKMAZ’a ve doktora eğitimim boyunca bana her türlü yardımı sağlayan Necmettin Erbakan Üniversitesi İnşaat Mühendisliği’ndeki değerli hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın uygulama aşamalarını gerçekleştirmemde imkan sağlayan Iğdır Üniversitesi ve Necmettin Erbakan Üniversitesi laboratuvarlarına teşekkür ederim.

Son olarak da hayatımın her safhasında bana destek olan anne ve babama, bu süreçte maddi ve manevi desteğini bir an olsun esirgemeyen, her türlü sıkıntıma katlanan sevgili eşim Yusuf GÜZEL’e ve enerjileri ile güç veren kızıma ve oğullarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Fidan GÜZEL
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1 PET'in Beton Üretiminde Kullanımı Üzerine Çalışmalar	5
2.2 PET'in Beton Kiriş Üretiminde Kullanımı Üzerine Çalışmalar	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM	16
3.1 Beton Numunelerin Hazırlanması	16
3.1.1 Basınç, yarmada-çekme ve eğilme deneyleri	20
3.1.2 Sıcaklık deneyleri	21
3.1.3 Donma-çözülme deneyleri	22
3.1.4 Taramalı-elektron mikroskobu (SEM) analizleri.....	23
3.2 Betonarme Kiriş Numunelerin Hazırlanması	24
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	30
4.1 Beton Numune Deney Sonuçları	30
4.1.1 Çökme deneyi sonuçları.....	30
4.1.2 Basınç deneyi sonuçları	31
4.1.3 Yarmada çekme deneyi sonuçları	34
4.1.4 Eğilme deneyi sonuçları.....	36
4.1.5 Normalize edilmiş sonuçlar	39
4.1.6 Donma-çözülme testi sonuçları	42
4.1.7 Sıcaklık değişimi deney sonuçları	44
4.1.8 Normalize edilmiş sıcaklık değerleri	50
4.1.9 Mikroyapısal analiz sonuçları (SEM ve EDS).....	51
4.2 Betonarme Kiriş Deney Sonuçları	56
4.2.1 Beton karışımı çökme deneyi sonuçları.....	56
4.2.2 Beton karışımının mekanik özellikleri.....	57
4.2.3 Betonarme kiriş test sonuçları.....	58
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	80

5.1	Beton Numunelerin Test Sonuçları.....	80
5.2	Betonarme Kiriş Numunelerin Test Sonuçları.....	82
5.3	Öneriler ve Gelecek Çalışmalar	83
6.	KAYNAKLAR	84



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Yıllara göre beton üretimi ve beton yıkımı (beton malzemeli yapıların yıkımı) ile birlikte kullanımda olan beton yapı stoğundaki beton miktarı (Watari vd., 2023).....	2
Şekil 1.2. Yıllara göre agrega ve fosil yakıtlarının üretimindeki değişim (Watari vd., 2023)	2
Şekil 3.1. Bireysel agregaların (kırmataş çakıl (5-12 mm ve 12-19 mm) ve nehir kumu) ve karışımların TS706 tarafından belirtilen üst ve alt sınırlarla birlikte parçacık boyut dağılımları.....	17
Şekil 3.2. PET için elek analizi sonuçları.....	18
Şekil 3.3. Karışımlarda kullanılan malzemeler	19
Şekil 3.4. (a) 10 cm'lik küp beton numuneleri (b) 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde silindirik beton numuneleri (c)10x10x40 cm'lik beton kiriş numunesi örneği.....	20
Şekil 3.5. Beton kirişlerin eğilme dayanımını ölçmek için 4 noktalı yükleme deney düzeneği (TS EN 12390-5).....	21
Şekil 3.6. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılmadan önce hazırlanan numuneler (ref. için 10 cm küp beton ve PET içerikli) (sol) ve 300 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra referans ve PET modifiye edilmiş numuneler (sağ).....	22
Şekil 3.7. Donma-çözülme kabini (Sol) ve kabindeki numunelerin düzenlenmesi (sağ)	23
Şekil 3.8. SEM analizlerinde kullanılan numunelerin örneği.....	24
Şekil 3.9. Polietilen tereftalat (PET).....	24
Şekil 3.10. Deney kalıpları ve örnekleri	26
Şekil 3.11. a) Betonarme kirişlerin 3 boyutlu şematik görünümü ve (b) 16 cm, (c) 20 cm ve (d) 27 cm etriye aralıklarına sahip betonarme numunelerin gösterimi	27
Şekil 3.12. a) Betonarme kirişin 3 boyutlu şematik görünümü ve (b) Sabit etriye aralıklı ve 8, 10 ve 12 mm çekme donatısı çaplı betonarme kirişler.....	28
Şekil 3.13. Eğilme testleri için dört noktalı yükleme düzeneği.....	29
Şekil 4.1. Konik döküm beton numunesinin çökme davranışına ilişkin çökme ölçümü örneği.....	30
Şekil 4.2. (a) CEM II 32.5 ve (b) CEM II 42.5 çimento tipleri ile üretilen ve farklı oranlarda PET içeren beton karışımları için çökme testi değerleri.....	30
Şekil 4.3. PET katkılı ve PET katkısız (referans) CEM II 32.5 (a) ve CEM II 42.5 (b) ile üretilen beton numunelerinin 3, 7 ve 28 günlük kür sürelerindeki basınç dayanımlarındaki değişimler.....	32
Şekil 4.4. CEM II 32.5 (a) ve CEM II 42.5 (b) çimento tipleriyle üretilen beton numunelerinin, PET katkısız (Referans) ve belirli oranlarda PET katkılı karışımlarda, 7 ve 28 günlük kürleme süreleri için yarmada çekme dayanımı değişimleri	34
Şekil 4.5. CEM II 32.5 (a) ve CEM II 42.5 (b) çimento tipleriyle, PET içermeyen (referans) ve farklı oranlarda PET içeren beton kirişlerin eğilme dayanımındaki değişim grafiği.....	36
Şekil 4.6. CEM II 32.5 ve CEM II 42.5 çimento kullanılan beton kirişlerin, referans (P0) ve PET katkılı numuneler için eğilme dayanımı değerleri	37
Şekil 4.7. Eğilme dayanımına karşı yarmada çekme dayanımının eğilme dayanımına oranı grafiği (literatür ve bu çalışma verileri).....	38
Şekil 4.8. Bu çalışmanın sonuçlarıyla birlikte literatürden elde edilen normalleştirilmiş basınç dayanımı değerleri; (a) %5 ile %95 ve (b) %0 ile %10 arasındaki PET içerikleri için	39

Şekil 4.9. Literatürden elde edilen normalize edilmiş yarmada çekme dayanımı değerleri ile bu çalışmanın sonuçları; (a) %5 ile %75 ve (b) %0 ile %9 aralığındaki PET içerikleri için	40
Şekil 4.10. Literatürden elde edilen eğilme dayanımı değerleri ile bu çalışmanın sonuçları, PET içerikleri için; (a) %5 ile %90 aralığında ve (b) %0 ile %10 aralığında	41
Şekil 4.11. CEM II 32.5 çimentolu beton numunelerin normal koşullardaki ve çözülme sonrası basınç dayanımı değerleri.....	42
Şekil 4.12. CEM II 42.5 çimentosu ile üretilen beton numunelerin normal koşullardaki ve çözülme sonrası basınç dayanımı değerleri	43
Şekil 4.13. CEM II 32.5 çimentolu beton numunelerin farklı sıcaklıklarda gösterdiği basınç dayanımı değişimi.....	45
Şekil 4.14. Farklı sıcaklık seviyelerine maruz bırakılan CEM II 42.5 çimentolu numunelerin basınç dayanımı değerlerindeki değişim	46
Şekil 4.15. (a) CEM II 32.5 ve (b) CEM II 42.5 çimentosu ile elde edilen numunelerin farklı sıcaklık seviyelerinde gösterdiği basınç değerlerinin, normal şartlardaki beton numunelerin sonuçlarına göre normalize edilmiş durumu	51
Şekil 4.16. Normal şartlarda PET katlı ve katkısız karışımlar için SEM ve EDS analiz sonuçları.....	53
Şekil 4.17. Donma çözülme sonrası PET katlı ve katkısız karışımlar için SEM ve EDS analiz sonuçları	56
Şekil 4.18. 8 mm, 10 mm ve 12 mm çapında çekme donatısı ile 10 cm sabit etriye aralığına sahip, referans ve PET katlı betonarme kiriş numunelerine ait yük-deplasman eğrileri.....	59
Şekil 4.19. 8 mm, 10 mm ve 12 mm çaplarında çekme donatısı ile 10 cm sabit etriye aralığına sahip, referans ve PET katlı betonarme kiriş numunelerine ait test sonuçları	64
Şekil 4.20. $\phi 8$, $\phi 10$ ve $\phi 12$ çekme donatılı, referans ve PET katlı betonarme kirişlerin kırılma biçimleri	69
Şekil 4.21. 16, 20 ve 27 cm etriye aralıklarına sahip, referans ve PET ilaveli betonarme kirişlerden elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri	70
Şekil 4.22. Referans ve PET ile modifiye edilmiş betonarme kiriş numunelerinden elde edilen deneysel sonuçlar (Burada çekme donatı çapı 12 mm sabit tutulmuş ve kirişlerde 16 cm, 20 cm ve 27 cm'lik etriye aralıkları kullanılmıştır.).....	75
Şekil 4.23. $\phi 8/16$, $\phi 8/20$ ve $\phi 8/27$ etriyeli referans ve PET katlı kirişlerin kırılma biçimleri.....	79

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. CEM II/B-M (P-L) 32.5 N ve CEM II/A-M (P-L) 42.5R Portland kompozit çimentosunun kimyasal bileşimleri.	16
Çizelge 3.2. Kırmataş çakıl ve nehir kumunun fiziksel özellikleri	16
Çizelge 3.3. Elek analizi ile belirlenen agregaların geçme yüzdeleri.....	17
Çizelge 3.4. PET'in fiziksel özellikleri	18
Çizelge 3.5. Beton karışımındaki malzeme miktarı (metreküp başına) (kg).....	19
Çizelge 3.6. Beton karışımındaki malzeme miktarları (metreküp başına) (kg).....	25
Çizelge 3.7. Üretilen toplam numune sayısı.....	26
Çizelge 4.1. Farklı oranlarda PET içeren CEM II 32.5 ve CEM II 42.5 ile üretilen beton karışımları için çökme testi değerleri.....	31
Çizelge 4.2. CEM II 32.5 ve CEM II 42.5 çimentolu farklı PET içerikli beton numunelerinin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları (MPa).....	33
Çizelge 4.3. CEM II 32.5 ve CEM II 42.5 çimento tipleriyle üretilen, farklı PET içeriklerine sahip beton numunelerinin 7 ve 28 günlük yarmada çekme dayanımları (MPa)	35
Çizelge 4.4. CEM II 32.5 ve CEM II 42.5 çimento tipleriyle üretilen beton numunelerinde, PET miktarının artmasıyla birlikte eğilme dayanımı değerlerindeki değişim.....	36
Çizelge 4.5. CEM II 32.5 çimentolu PET katkılı ve katkısız beton numunelerin, farklı sıcaklık seviyelerine maruz kaldıktan sonra basınç dayanımları ve referans dayanımına göre değişim yüzdeleri.....	45
Çizelge 4.6. CEM II 42.5 çimentolu PET katkılı ve katkısız beton numunelerin, farklı sıcaklık seviyelerine maruz kaldıktan sonra basınç dayanımları ve referans dayanımına göre değişim yüzdeleri.....	46
Çizelge 4.7. Referans ve PET ile Modifiye Edilmiş Betonun Çökme ve Akma Sonuçları	57
Çizelge 4.8. Betonun mekanik özellikleri	57
Çizelge 4.9. Referans ve PET katkılı olarak üretilen, 10 cm aralıklı 8 mm çapında etriyeli ve farklı çapta çekme donatılı betonarme kiriş numuneleri test sonuçları	60
Çizelge 4.10. Referans ve PET ilaveli karışımlar kullanılarak 16, 20 ve 27 cm etriye aralıklarına sahip betonarme kirişlerden elde edilen deneysel sonuçlar.....	71

SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER

f_{cf}	Eğilme dayanımı
F	Maksimum yük
I	Mesnet makaraları arasındaki mesafe
d_1, d_2	Kiriş en kesit boyutları
PET	Polietilen Tereftalat
STS	Yarmada çekme dayanımı
NCS	Normalize basınç dayanımı
NSTS	Normalize yarmada çekme dayanımı
NFS	Normalize eğilme dayanımı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
EDS	Enerji dağılımlı spektroskopi
δ_y	Akma anında yerdeğiştirme
P_y	Akma anındaki kuvvet
S_y	Akma rijitliği
$\delta_{P_{max}}$	Maksimum kuvvetteki yerdeğiştirme
P_{max}	Maksimum kuvvet
$S_{P_{max}}$	Maksimum yük rijitliği
δ_u	Dayanımın tamamını kaybetmeden önceki yerdeğiştirme
η	Süneklik katsayısı

KISALTMALAR

P%	Ağırlıkça PET katkı oranı. P0, %0 PET katkı; P1, %1 PET katkı, vb.
S#_P%	S, etriye aralığı ve P, ağırlıkça PET katkı oranı. S16_P0, 16cm etriye aralığı ve %0 PET katkıli betonarme giriş, vb.
Phi#_P%	Phi çekme donatısı çapı ve P ağırlıkça PET katkı oranı. Phi8_P0, 8 mm çekme donatılı ve %0 PET katkıli betonarme giriş, vb.

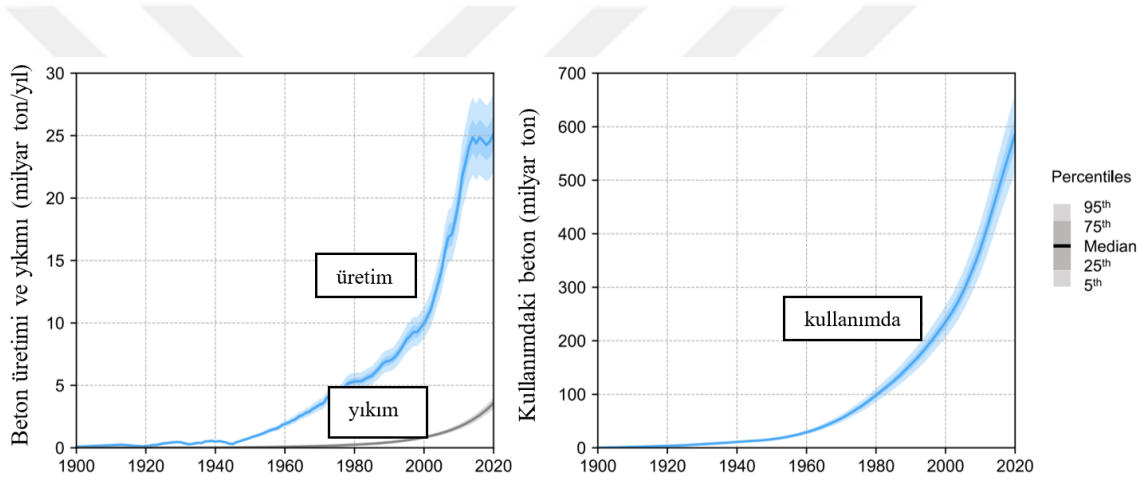
1. GİRİŞ

Günümüzde binaların inşasında kullanılan en önemli kabul görmüş yapı malzemesi beton olarak tanımlanmaktadır (Keshavarzve Mostofinejad, 2019) . Beton, temelde bağlayıcı malzemeler, su, agregalar ve katkı maddeleri gibi farklı bileşenlerden oluşan kompozit bir malzemedir. Bu bileşenler arasında, agregalar herhangi bir inşaat çalışması için vazgeçilmez malzeme olarak, toplam beton hacminin yaklaşık %60-75'ini kapsayarak beton üretiminde çok önemli bir rol oynamaktadır (Kosmatka vd., 2003). Betonun büyük inşaat işlerindeki inşaat malzemesi olarak çok yönlülüğü, yüksek dayanımı, düşük bakım maliyeti, hava koşullarına karşı direnci, diğer inşaat malzemelerine göre ekonomik olması ve mükemmel yapısal performansından kaynaklanmaktadır.

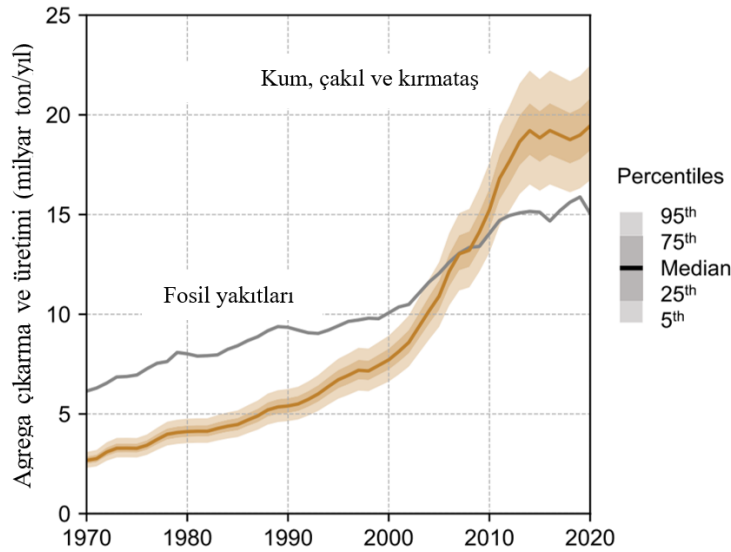
Beton malzemesine olan ihtiyacın hızlı nüfus artışı ve kırsal kesimden kentlere göç nedenlerinden dolayı artarak devam edeceği görülmektedir. Birleşmiş Milletlerin tahmini doğrultusunda 2019 yılında yaklaşık 7,6 milyar olan dünya nüfusunun 2050 yılında 9,7 ila 10,1 milyar arasında bir değere ulaşacağı söylenmektedir. Bu nüfus artışının özellikle gelişmekte olan ülkelerde (Nijerya ve Hindistan gibi) olacağı ve kırsal nüfusunun 2050 yılına kadar yaklaşık 3,4 milyar kadar düşeceği rapor edilmektedir. Bu nüfus artışı ve kırsal kesimden kentlere göçün neticesinde bina ihtiyacının yüksek oranlarda artması ve dolayısı ile betona olan ihtiyacın da aynı şekilde yükselmesi söz konusudur (Santamourisve Vasilakopoulou, 2021).

Beton endüstrisi, %50 hammadde, %40 toplam enerji tüketimi ve toplam atıkların %50'sini üreterek, büyük miktarda doğal kaynak tüketmektedir (De Schepper vd., 2014). Küresel beton üretimi 1990 ile 2020 yılları arasında dört katına çıkarak 2020 yılında yaklaşık 26 milyar tona ulaşmıştır (Şekil 1.1) (Watari vd., 2023). Buna göre, 2020 yılında yıllık beton talebini karşılamak için yaklaşık 4 milyar ton çimento, yaklaşık 20 milyar ton agrega ve yaklaşık 2 milyar ton karışım suyu kullanılmıştır. Kullanımda olan beton stoğu (yani şu anda binalarda ve altyapılarda kullanılan beton) 2020 yılında yaklaşık 590 milyar ton (kişi başına 76 ton) olarak gerçekleşmiştir. Böylesine hızlı bir beton üretimi artışı ve sınırlı döngüsellik, doğal agregalara (yani kum, çakıl ve kırma taş) olan taleplerde büyük bir artışa yol açmaktadır. Tüketim oranındaki bu artışla birlikte, agrega talebinin önümüzdeki iki ile üç on yıl içinde iki katına çıkması beklenmektedir. 1990 yılında, beton üretimi için kullanılan doğal agregalar, tüm fosil yakıt çıkarımının yalnızca yaklaşık %60'ını oluşturuyordu (Şekil 1.2). Ancak, bu fark zamanla daralmış ve 2000'li yıllarda

tamamen tersine dönmüştür. 2020 yılı itibari ile doğal beton agregasına olan talebin (yaklaşık 20 milyar/yıl), tüm fosil yakıtların çıkarımından (yaklaşık 15 milyar/yıl) dikkate değer ölçüde fazla olduğu gözlemlenmektedir. Bu aşırı miktarda agrega çıkarımı beraberinde çevresel sorunları da getirmektedir. Agreganın en belirgin çevresel etkisi, genellikle gelişmemiş veya tarım arazilerinin bir çukur veya taşocağına dönüşmesiyle doğal ortamda meydana gelen değişikliktir. Diğer bir etki ise araç hareketleri, işleme ekipmanları ve patlatmalardan kaynaklanan gürültü ve tozdur. Ayrıca agrega çıkarımı, bitki örtüsünün kaldırılmasını gerektirir, bu da rüzgar ile birlikte yüzeysel değişimi tetikleyerek erozyonu teşvik edebilir ve dolayısıyla yakınlardaki akarsularda sediman katmanının artmasına yol açabilir. Son olarak, betonun ana bileşenlerinden biri olan agrega üretiminde dikkate değer ölçüde CO₂ ortaya çıkmaktadır.



Şekil 1.1. Yıllara göre beton üretimi ve beton yıkımı (beton malzemeli yapıların yıkımı) ile birlikte kullanımda olan beton yapı stoğundaki beton miktarı (Watari vd., 2023).



Şekil 1.2. Yıllara göre agrega ve fosil yakıtlarının üretimindeki değişim (Watari vd., 2023)

Betonun ana bileşenlerinden biri olan çimento üretiminde de dikkate değer ölçüde çevresel etkiler söz konusudur. Örneğin, 1 ton portland çimento üretiminde 960 kilogram ve 1 ton beton üretiminde 108 kilogram karbondioksit (CO₂) ortaya çıktığı tahmin edilmektedir. Bilhassa çimento üretimi, doğal kayaçlar ve su gibi yenilenemeyen hammaddeleri kullanır. Ayrıca, çimento sektörü, üretim sürecindeki kimyasal emisyonlar nedeniyle küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %6'sından sorumludur (Kermeli vd., 2019). Bu nedenle, çevresel etkiyi, enerji tüketimini ve beton üretiminde ortaya çıkan CO₂ yoğunluğundaki artışı en aza indirmek, inşaat endüstrisi için sürdürülebilir kalkınmaya yönelik en önemli bir yaklaşım haline gelmiştir.

Bunun yanı sıra, sanayileşme ve kentleşmenin hızla artan oranı, devasa miktarda endüstriyel yan ürünlerin ve dolayısı ile atıkların oluşmasına yol açmıştır. Her geçen yıl, bu yan ürünlerin üretiminde önemli bir artış yaşanmıştır. Endüstriyel atık üretiminin 2030 yılına kadar 2,59 milyar ton ve 2050 yılına kadar 3,40 milyar ton olacağını açıklamıştır (Tursunov vd., 2024). Metal döküm, termik santraller, bakır üretimi, otomobil üretimi, plastik üretimi ve cam yapımı gibi yaygın sanayiler, yeniden kullanımına rağmen çöplüklere atılan ve bertaraf edilen cürufklar ve yan ürünlerin üretiminden sorumludur. Taşıma, döküm maliyetlerinin keskin bir şekilde artması ve çöplüklerin azalması, bu yan ürünlerin etkin bir şekilde kullanılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Verimli atık bertaraf sistemlerinin olmaması, atık sahası ve etrafında yok olmasına yol açarak sağlık ve diğer çevresel problemlere neden olmaktadır (Kirthika vd., 2020). Endüstriyel atıkların verimli bir şekilde bertarafı veya tekrar üretim zincirine kazandırılması sürdürülebilirlik, dünyanın ekolojik ve çevresel dengesini korumak için şu anki en büyük ihtiyaçtır.

En önemli yapı malzemelerinden biri olarak sunulan beton malzemesine olan ihtiyacın hiç olmadığı kadar yüksek olması betonun basınç ve çekme dayanımlarının iyileştirilmesi hem tasarım hem dayanım yönü ile vazgeçilmez olmaktadır. Üstelik, beton üretiminde kullanılan malzemelerin ve betondan yapılan binaların çevresel etkileri göz önünde bulundurulduğunda daha çevre duyarlı ya da yapısal (yıkılmış bina kalıntıları), endüstriyel veya zirai atık olarak ortaya çıkan malzemelerin çimento veya agregaya alternatif olarak kullanılmasını gerekli kılmaktadır (Osial vd., 2022). Çözülebilir veya çözülemez olarak iki ayrı kategoriye ayırabileceğimiz bu atıkların artan popülasyon ile birlikte aşırı oranlara ulaştığı gözlemlenmektedir. Atığın doğada çözülebilir ya da çözülemez olması betonda kullanımı bakımından fark oluşturmasa da çevreye olan etkisi yönü ile çözülemez atıklar büyük problemler oluşturmaktadır (Kishoreve Gupta, 2020). Bu atık malzemelerin beton üretiminde agrega ya da bağlayıcı malzemeye

alternatif olması hem atıkların doğaya atılmasını engelleyecek hem de doğal kaynakların (agrega ve çimento üretimi için kullanılan kaynaklar) korunmasını sağlayacaktır. Bina kalıntıları, seramik, porselen ve plastik atıkları, cam atıkları, doğranmış PET şişeleri, granular polistren, kokonat ve odun atıkları beton üretiminde kullanılması potansiyel malzeme olarak görülmektedir (Patilve Sangle, 2019; Samadi vd., 2022).

Bu tez çalışması plastik atık olan polietilen tereftalatın (PET) beton üretiminde kullanılmasının betonun mekanik özelliklerine ve betonarme kirişin davranışına olan etkisini konu edinmiştir. Bunun için öncelikle parçalanmış (shredded) PET atığı tedarik edilmiştir ve beton hacminin %1, %3, %5, %10 ve %20 oranlarında kullanılarak farklı oranlarda PET içerikli beton karışımları elde edilmiştir. Ayrıca, iki farklı dayanıma sahip çimento kullanılmıştır (CEM II 32.5 ve CEM II 42.5). Basınç, yarmada çekme ve beton kiriş eğilme dayanımları için sırasıyla 10x10x10 (cm³), 10x20 (cm²) ve 10x10x40 (cm³) boyutlarında numuneler üretilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra, donma-çözülme ve sıcaklık değişiminin betonun mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Son olarak, bahsi geçen beton karışımları ile 10x15x100 (cm³) betonarme kirişler üretilerek PET içeriğinin beton davranışına etkisi incelenmiştir. Bu deneyler, farklı çapta çekme donatıları (8 mm, 10 mm ve 12 mm) ve farklı etriye aralıkları (16 cm, 20 cm ve 27 cm) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece çekme donatısı çapının ve etriye aralığının betonarme kiriş davranışına etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmanın, yüksek oranlarda PET içeriğinin beton yerine kullanımı ve iki farklı dayanıma sahip çimento kullanılarak üretilen beton numunelerin mekanik özelliklerine etkisini çalışması yönü ile literatüre önemli bir katkı sağladığı düşünülmektedir. Ayrıca bu çalışmanın, yüksek PET içerikli beton numunelerinin donma-çözülme ve yüksek sıcaklığa maruz kalması durumunda, numune dayanımlarına olan etkisini incelemesi literatüre ayrı bir katkıdır. Son olarak, betonarme kiriş deneyleri ile gerçekleştirilen çalışma, PET atığının betonarmede kullanılabilirliğini ortaya koymuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kompozit bir malzeme olarak agrega, çimento, su ve özel katkı malzemelerinin karışımı ile meydana gelen beton en önemli yapı malzemesi olarak yerini korumaktadır. Farklı oranlardaki PET içeriğinin betonun mekanik ve durabilite karakteristikleri ile betonarme kirişin davranışına olan etkisini konu edinen bu tez çalışmasıyla alakalı geçmişte yapılan çalışmalar bu bölümde sunulmuştur.

2.1 PET'in Beton Üretiminde Kullanımı Üzerine Çalışmalar

Dünya nüfusu artmaya devam ettikçe, yüksek katlı binalara ve karmaşık altyapılara olan talep artmaktadır ve bu da artan inşaat faaliyetlerine yol açmaktadır. Beton, güçlü ve uzun ömürlü olması nedeniyle inşaatta en yaygın kullanılan malzemelerden biridir (Neville, 2011). İnşaatta temel bir malzeme olan beton hacminin yaklaşık %70-80'ini doğal agregalar oluşturmaktadır. 2015 yılında, inşaat sektöründe agrega tüketimi dünya çapında 48,3 milyar metrik tona ulaşmış ve yıllık yaklaşık %5 artış göstermiştir (Islamve Shahjalal, 2021). Doğal agregaların bu önemli kullanımı, habitat tahribatı, su kirliliği ve biyolojik çeşitliliğin kaybı da dahil olmak üzere çevresel kaynaklar üzerinde önemli bir baskı oluşturmaktadır. Sonuç olarak, inşaat taleplerini sürdürülebilir bir şekilde karşılamak için alternatif malzemelerin belirlenmesine yönelik acil bir ihtiyaç görülmektedir (Islam vd., 2022).

Ayrıca, günlük hayatta tek kullanımlık ürünlerin üretim ve tüketimindeki artış, atık yönetiminin küresel zorluğunu yoğunlaştırmıştır. Yetersiz bertaraf uygulamaları çevre kirliliğine yol açmakta ve toprak sağlığını olumsuz etkilemektedir. Çeşitli atık türleri arasında, plastik malzemeler bozulmaya karşı dirençleri nedeniyle özellikle sorunludur ve bu durum çöplüklerde önemli bir birikime neden olmaktadır (Frigione, 2010). Özellikle, küresel plastik üretimi 1950'de 5 milyon tondan 2001'de 100 milyon tonun üzerine çıkmıştır (UK Waste online 2006). Sadece Batı Avrupa'da, kişi başına yılda yaklaşık 23 milyon ton plastik atık bertaraf edilmiştir (Adrados vd., 2012). Amerika Birleşik Devletleri, 2018'de 11 milyon ton plastik atık ürettiğini bildirmiştir. Asya kıtasında, Çin ve Hindistan gibi ülkeler plastik malzemelerin en büyük tüketicileri arasındadır (Kim vd., 2010). Dünya genelinde kişi başına düşen plastik ürün tüketimi ortalaması yılda 20 kg civarındadır (Islam vd., 2016).

Plastik atıkların geri dönüştürülmesinin yeni plastik ürünler üretmeye kıyasla ekonomik dezavantajı, çöplüklerde önemli miktarda plastik atık birikmesine yol açmıştır.

Plastik atıkların bertarafı ve yakılması, ciddi çevre ve sağlık riskleri oluşturan dioksinler ve furanlar dahil olmak üzere zararlı kirleticilerin salınmasına neden olur. Dahası, plastiklerin bozulması, mikroplastiklerin yayılmasına ve ağır metallerin su ekosistemlerine sızmasına katkıda bulunarak deniz yaşamını ve su kalitesini olumsuz yönde etkiler. Tarımsal ortamlarda, plastik atık toprak geçirgenliğini ve verimliliğini azaltabilir ve ürün verimliliğini etkileyebilir (Duraiswamy vd., 2024). Geri dönüşüm genellikle maliyetlidir ve, bu sebeple, plastik atıkların %93'ünün çöplüklerde son bulmasına neden olur (Prakhash vd., 2020; Priyan vd., 2023). Atıkların yakılması ve parçalanması kirlilik, küçük plastik parçalar ve ağır metallerin açığa çıkmasına neden olur ve bu durum da doğayı ciddi yönde olumsuz olarak etkileyebilir (Duraiswamy vd., 2024).

Betona olan ihtiyacın artması ve plastik atıklarla ilgili endişelerin artması nedeniyle araştırmacılar, plastiklerin beton üretiminde kullanma potansiyeli üzerine birçok araştırma yapmışlar ve halen de yapılmaya devam etmektedir. Polipropilen (PP) ve polietilen tereftalat (PET), sürdürülebilir inşaatta potansiyel uygulamalara sahip termoplastiklerdir (Islam vd., 2016; Kim vd., 2010). Yaklaşık 160°C'lik daha yüksek erime noktasıyla bilinen PP, diğer plastiklere kıyasla üstün ısı direnci sunar. Dahası, mekanik olarak dayanıklıdır ve yüksek kimyasal direnç gösterir (Whiteley vd., 2005). Geri dönüştürülmüş PP'nin kullanılması, polimer atık bertarafıyla bağlantılı zorlukları hafifletebilir, çevre kirliliğini önleyebilir, enerjiyi koruyabilir ve doğal agregalara olan bağımlılığı azaltabilir (Islam vd., 2022).

Plastik içeriğin dahil edilmesi taze betonun işlenebilirliğini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. (Ismailve Al-Hashmi, 2008) tarafından yapılan çalışmada, plastik içeriğin artmasıyla çökme değerinde önemli bir azalma olduğu bildirilmiş ve daha düşük işlenebilirliğin nedeni olarak plastik agreganın köşeli ve düzensiz şekilleri gösterilmiştir. Tersine, pelet şeklindeki PET'in dahil edilmesiyle çökme değerinde artışlar gözlemlenmiş, diğer araştırmalar çökme değeri üzerinde önemli bir etki bulmamıştır (Saikiave De Brito, 2014). Plastiğin daha düşük özgül ağırlığı nedeniyle, onu betona dahil etmek beton birim ağırlığını azaltabilir. Örneğin, betona genişmiş polistiren (EPS) miktarının eklenmesi birim ağırlığında önemli bir azalmaya yol açmıştır (Sabaave Ravindrarah, 1997). Betonun birim ağırlığının %70 EPS ikamesi ile %31 oranında azaldığı bildirilmiştir. Etilen-vinil asetat (EVA) atığında da benzer eğilimler gözlemlenmiştir ve bu durum hafif beton üretmenin mümkün olduğunu göstermiştir (Lima vd., 2010).

Doğal ince veya iri agregaların PET ile ikame edilmesi betonun mekanik özelliklerini de etkileyebilir. Granüle yüksek fırın cürufu içeren hafif üretimde ince agreganın hacimce %0, %25, %50 ve %75 oranlarında PET atığı ile değiştirilmesi incelenmiştir (Choi vd., 2005). Hafif betonun basınç dayanımının PET katılımının artmasıyla azaldığı gösterilmiştir. En büyük düşüş %33 oranında ince agreganın yaklaşık %75 oranında PET tarafından ikame edilmesiyle gözlenmiştir. Benzer şekilde iri agreganın hacimce %0, %20, %30, %40 ve %50 oranında PET ile değiştirilmesinin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi farklı su/çimento oranlarında incelenmiştir. Önerilen optimum PET ikamesi 0,42 s/ç oranında %20 olmuş ve basınç dayanımında sadece %9 oranında azalma gözlenmiştir (Islam vd., 2016). Ayrıca, farklı agrega-çimento oranlarında iri agreganın %5 oranında PET ile değiştirilmesi, normal betona kıyasla karşılaştırılabilir basınç dayanımı ile sonuçlanmıştır (Supit, 2022). Başka bir çalışmada, betona %25, %50 ve %75 oranında iri agreganın değiştirilmesiyle PET eklenmesi, referans betonla karşılaştırıldığında basınç dayanımında sırasıyla %15, %24 ve %43'lük azalmaya yol açmıştır (Juki vd., 2013). Benzer şekilde, bahsi geçen PET değiştirme oranlarında, yarmada çekme dayanımındaki (STS) azalmalar %15, %32 ve %42 olmuştur. PET agregasının türü veya kürlenme süresinden bağımsız olarak, PET içeriğinin artması basınç dayanımının, STS'nin, kopma modülünün ve elastisite modülünün azalmasına neden olmuştur (Saikiave De Brito, 2014). Bununla birlikte, PET betonunun referans betonla karşılaştırıldığında gelişmiş aşınma direnci gösterdiği kaydedilmiştir. Beton üretiminde %0, %0,75 ve %1,25'lik düz ve zikzak şekilli PET katılımları da incelenmiştir (Haque vd., 2021). Sonuçlar, düz PET lifleri için beton basınç dayanımının 19,84 MPa'dan 19,54 MPa ve 18,84 MPa'ya ve zikzak PET lifleri için 18,49 MPa ve 15,69 MPa'ya sınırlı bir düşüş olduğunu göstermiştir. Sonuçlar ayrıca PET atığının dahil edilmesiyle beton sünekliğinin arttığını da göstermiştir. Benzer şekilde, PET'in betonda %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranlarında katılımı araştırılmıştır (Özaşıkve Eren, 2022). Betonun basınç, eğilme ve ayrılma çekme dayanımları, %1'e kadar PET katılımıyla olumsuz yönde etkilenmemiştir. Ancak, %1'den daha büyük oranlarda, mekanik özellikler biraz düşmüştür. Bununla birlikte, PET katılımları betonun büzülme direncini ve darbe dirençlerini iyileştirmiştir.

Duraiswamy vd. (2024) tarafından yapılan başka bir çalışmanın bulguları, daha önce bahsedilen çalışmanın bulgularını desteklemektedir. Daha açık bir şekilde, betona %0, %0,25, %0,5, %0,75 ve %1 oranlarında PET katılımı, inşaat ve yıkım atıklarından üretilen betonun basınç dayanımında hafif bir azalmaya yol açmıştır. Eğilme dayanımı ve

yarmada çekme dayanımı değerlerinin sırasıyla %11,7 ve %18'e kadar arttığı gösterilmiştir. Hacimce %0, %7,5 ve %15 oranlarında PET atığı ile doğal agregaların ikame edilmesini içeren kürlenme koşullarının betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi de incelenmiştir (Ferreira vd., 2012). Üç farklı kürlenme koşulu, laboratuvar, nemli hücre (wet chamber) ve dış ortamlardır. Sonuçlar, kürlenme koşullarından bağımsız olarak, betondaki PET oranı arttıkça, basınç, yarmada çekme ve elastisite modülündeki azalmaların daha fazla olduğunu göstermiştir. Nemli ortamın, PET katılımı olmadan betonun mekanik özellikleri için daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. PET katılımıyla, optimum kürlenme ortamı PET oranıyla değişim göstermiştir. Ancak, PET içeren beton, aşınmaya karşı direnç açısından daha iyi performansa sahip olduğu belirtilmiştir. Bir diğer çalışmada, ince agregalar %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında PET atığıyla değiştirilerek beton karakteristikleri test edilmiştir (Azhdarpour vd., 2016). Betona %5 ve %10 oranında PET katıldığı durumda, betonun basınç, çekme ve eğilme dayanımları artmıştır. PET'in daha yüksek oranlarda dahil edilmesi ile birlikte, betonun dayanım özelliklerinde önemli bir azalmaya neden olduğu ortaya konmuştur.

Silva vd. (2013), doğal ince ve iri agregalar yerine PET kullanmanın betonu nasıl etkilediğine, %7,5 ve %15'lik değiştirme miktarlarını kullanarak incelemiştir. Bulguları, iri agreganın PET ile değiştirilmesinin, geleneksel betona kıyasla %42,1'e kadar basınç dayanımında azalmaya neden olduğu ortaya konmuştur. Benzer şekilde, Juki vd. (2013) %25, %50 ve %75 oranlarında PET içerikleri ile birlikte basınç dayanımında sırası ile %15, %24 ve %43'lük azalmalar gözlemlenmiştir. Ek olarak, bu PET içerikli beton numunelerinin yarmada çekme dayanımındaki azalmalar %15, %32 ve %42 olarak kaydedilmiştir. Saikia ve De Brito (2013), PET agrega türü veya kürlenme süresinden bağımsız olarak, PET miktarındaki bir artışın basınç dayanımı, çekme dayanımı, kopma modülü ve elastik modül değerlerinde bir azalmaya neden olduğunu gözlemlenmiştir. Ancak, çalışmaları ayrıca PET içeren betonun geleneksel betona kıyasla üstün aşınma direnci gösterdiğini göstermiştir.

Islam vd. (2016), PET'in %20, %30, %40 ve %50 seviyelerinde iri agrega yerine kısmi bir ikame olarak kullanımını araştırmıştır. Elde ettikleri sonuçlar, PET içeriği arttıkça mekanik dayanımın azalmasına rağmen %20'ye kadar olan ikamelerin hala kabul edilebilir performans sınırları içerisinde olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde, Ferreira vd. (2012) kürlenme koşullarının (örneğin laboratuvar kontrollü, ıslak ve dış ortamlar) plastik içeren betonun mekanik performansını değiştirme etkilerini incelemiştir. Bulguları, kürlenme koşullarının performansı önemli ölçüde etkilemesine rağmen, dış

çevresel faktörlere maruz kalmanın çimentolu matris ile plastik agregalar arasındaki bağı güçlendirdiğini göstermiştir.

Babu vd. (2005) EPS miktarının beton sertliği üzerindeki etkisini analiz etmiş ve EPS hacmindeki artışın daha kademeli bir kırılma örüntüsüne yol açarak gelişmiş sünekliği gösterdiğini göstermiştir. Bu bulgular Lima vd. (2010) tarafından yapılan çalışmayla da desteklenmektedir. PET ve etilen vinil asetatın (EVA) beton davranışları üzerinde benzer etkilere sahip olduğunu göstermişlerdir. Dahası, Ahmed vd. (2024), HDPE'den üretilmiş agregalarının geri dönüştürülmüş agrega beton endüstrisinde doğal ince agregalara bir alternatif olabileceğini ve işlenebilirliğini önemli ölçüde artırabileceğini belirtmişlerdir. Bu bulguyu destekler şekilde, Abbas vd. (2024), doğal iri agregaların HDPE agregalarıyla değiştirilmesinin beton işlenebilirliğini iyileştirdiğini göstermişlerdir. Ek olarak, optimum beton mukavemet özellikleri, iri agregaların %30 oranında değiştirilmesiyle elde edileceğini ortaya koymuşlardır. Gayake ve Desai (2024), betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek için beton karışımında PET şişe kapağından üretilmiş agregalarının potansiyel kullanımına dikkat çekmişlerdir. Agregalar için PET ile maksimum %5'lik bir değiştirmeye kadar betonun mekanik özelliklerini koruduğunu göstermişlerdir.

Yang vd. (2015) ince agregaların PP ile %10, %15, %20 ve %30 oranlarında kısmi ikamesinin beton özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bulguları, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımının %15'lik ikameye kadar iyileştiğini, bunun ötesinde ilişkili değerlerde bir düşüş gözlemlendiğini göstermiştir. Benzer şekilde, Akinyele vd. (2015) betonarme kirişlerde ince agrega olarak PP'nin farklı yüzdelerde (örneğin %0, %4, %8, %12 ve %16) kullanımını sunmuştur. Sonuçları, referans kirişlerin en yüksek eğilme kapasitesini gerçekleştirirken, %12 ve %16 PP'ye sahip kirişlerin en düşük eğilme kapasitelerini gösterdiğini göstermiştir. Bununla birlikte, PP'ye sahip kirişler daha fazla sapma kapasitesi sergilerken, çatlak genişliği PP içeriği miktarıyla orantılı olarak artmıştır. Araştırmacılar bu bulgulara dayanarak, geleneksel betonla karşılaştırılabilir mekanik performansın korunması için geri dönüştürülmüş PP ince agregasının eklenmesinin %4'ün altında sınırlandırılmasını önermişlerdir.

Wattanavichien ve Iwanami (2024), %30 PET eklenmesinin ince agregaların klorür direncinde %12-13'lük bir iyileştirmeye yol açtığını, ancak aynı zamanda geleneksel betonla karşılaştırıldığında basınç ve çekme dayanımı değerlerinde azalmaya neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Dahası, Chen vd. (2024), ince agregaların kısmi bir ikamesi olarak PET kullanımının, beton yoğunluğunu azaltırken kırılma gelişimini

küçülttüğünü ve nihai gerinim kapasitelerini artırdığını incelemiştir. Gravina vd. (2021), doğal agregaların PET ve HDPE plastik agregalarla değiştirilmesinin, betonun yapısal bütünlüğünü korumak için %25 ile sınırlandırılması gerektiğini önermişlerdir.

PET modifiyeli betonların mekanik özelliklerine odaklanan araştırmalara ek olarak, PET modifiyeli betonun dayanıklılık karakteristikleri de incelenmiştir. Örneğin, Silva vd. (2013), PET agregalarının eklenmesinin, referans betona kıyasla klorür iyon geçirgenliğini ve klorür göç katsayılarını artırdığını ve bunun betonun uzun vadeli dayanıklılığını etkileyebileceğini göstermiştir. Dahası, Albano vd. (2009), PET içeren beton üzerinde yüksek sıcaklıkların etkisini değerlendirerek, 200°C'de önemli yüzey değişiklikleri gözlemlenmediğini belirtmiştir. Ancak, sıcaklık 200°C'den 400°C'ye çıktığında, betonun yüzey rengi griden kahverengiye döndüğünü ve bunun da termal bozulmayı gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Sjah vd. (2018) PP'nin %0,10 ila %3 arasında değişen bir hacim oranında betona ezilmiş polipropilen plastik ve cam atığının entegrasyonunun betona etkisini incelemişlerdir. Araştırmaları sonucunda, PP içeriğinin artmasıyla çökme değerlerinde bir azalma olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, %1 PP ikamesi basınç dayanımında %11'lik bir artışa neden olurken, %0,3 PP ikamesi çekme dayanımında %5'lik bir iyileştirme ile sonuçlandığı gösterilmiştir. Ridwan vd. (2014), PP atığının çimento yerine belirli oranlarda ikamesinin betonun özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Yapılan bu araştırmanın sonucunda %1,25 PP ikamesi seviyesinde basınç dayanımında %22,8'lik bir düşüş görülmüştür. Bununla birlikte, %0,50 PP içeriği ile beton çekme dayanımı %21,8 arttırmış, bu da betondaki düşük PP seviyelerinin belirli mekanik özellikler geliştirebileceğini göstermektedir. Sabaa ve Ravindrarajah (1997), EPS modifiyeli betonun kuruma büzülme özelliklerini araştırmış ve artan EPS içeriğinin daha yüksek büzülme değerlerine neden olduğunu bulmuştur. Özellikle, agreganın %70 EPS ile değiştirilmesi durumunda, büzülme oranı 240 günlük bir süre boyunca yaklaşık %40 artmıştır.

Bunun yanında, Sri Ravindrarajah ve Tuck (1994), polistiren esaslı betonun, öncelikle polistiren boncukların daha düşük sertliğinden dolayı, geleneksel betona kıyasla daha fazla büzülme gösterdiğini vurgulamıştır. Bu bulgular, Akçaözoğlu vd. (2010) ve Chen ve Liu (2004) tarafından yürütülen çalışmaların sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca, PET ve EPS esaslı betonun standart beton karışımlarına kıyasla daha fazla büzülme gösterdiğini göstererek bu bulguları doğrulamıştır. Özellikle Chen ve Liu (2004) tarafından yapılan çalışmada, 90 günlük kürlenmeden sonra, agregalar için

%55 EPS ikamesi içeren betonun, referans betonun neredeyse iki katı kuruma büzülmesi sergilediğini gözlemlenmiştir.

Yüksek sıcaklıklara maruz kalmış PP modifiyeli betonun karakteristik özellikleri de ayrıca araştırılmıştır. Ozbakkaloglu vd. (2017), doğal iri agregayı %10, %20 ve %30 seviyelerinde PP ile değiştirerek, mekanik özelliklerin artan PP içeriğiyle azalırken, %10 PP ikamesi seviyesinde azalmanın %6'nın altında kaldığını göstermiştir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklara maruz kalma, özellikle daha yüksek PP içeriği içeren beton karışımlarında, basınç dayanımında önemli bir düşüşe yol açmıştır. Ek olarak, PP modifiyeli beton, geleneksel betona göre daha düşük işlenebilirlik ve yoğunluk sergilemiştir. Islam ve Shahjalal (2021), %10 ve %20 PP'yi değiştirerek tuğla ve taş agregalarının yerine PP agregalarının kullanımını incelemiş ve fiziksel ve mekanik özelliklerini değerlendirmiştir. Basınç ve çekme dayanımları ile elastisite modülü ve kopma modülü dahil diğer mekanik özellikler arasında ampirik ilişkiler geliştirmişlerdir. Dahası, ultrasonik darbe hızı (UPV) ile basınç dayanımı arasında bir korelasyon kurarak, PP betonunun yapısal davranışına ilişkin içgörüler sağlamıştır.

Skripkiūnas vd. (2013), farklı çimento tiplerinin kullanılmasının, hem farklı miktarlarda priz geciktirici eklenerek hem de eklenmeden betonun donma-çözülme ve tuz direnci üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Farklı sayıda donma-çözülme döngüsünden sonra elde edilen kütle kaybı, ultrasonik darbe hızı ve deformasyon verileri değerlendirilmiştir. Priz geciktirici katkı maddesi kullanılmadan CEM III-B 32.5 ile üretilen beton numunesinin donma-çözülme döngülerine ve buz çözücü tuzlara karşı en yüksek direnci gösterdiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, Ghaemi-Fard vd. (2018) tarafından yürütülen bir çalışmada, üç farklı çimento mukavemet sınıfıyla (32,5, 42,5 ve 52,5 MPa) üretilen beton harcının mekanik özellikleri donma-çözülme döngüleri altında incelenmiştir. Çalışma sonucunda, donma-çözülme çevrimleri nedeniyle hem basınç hem de eğilme dayanımlarının önemli ölçüde azaldığı ve bu azalmaların çevrim sayısı ile doğru orantılı olarak ilerlediği görülmüştür. Ayrıca, donma-çözülme çevrimleri nedeniyle gözlenen azalmaların, basınç dayanımı 32,5 MPa olan çimento içeren beton harcında en belirgin olduğu gösterilmiştir.

2.2 PET'in Beton Kiriş Üretiminde Kullanımı Üzerine Çalışmalar

PET içeriği ile betonun mekanik özelliklerindeki değişimin yanında betonarme kiriş üretiminde PET kullanımı üzerine de birçok araştırma yapılmıştır. Bu bölümde geçmişte yapılmış çalışmalar ve bulguları verilmiştir.

Polietilen tereftalat (PET) elyaf takviyeli polimer (FRP) laminatlarla harici olarak güçlendirilen betonarme (RC) kirişlerin eğilme performansı araştırılmıştır (Hawileh vd., 2022). Çalışma, iki kat PET-FRP ile güçlendirilen numunelerin, güçlendirilmemiş kirişle karşılaştırıldığında %47'lik kayda değer bir dayanım iyileştirmesi gösterdiğini bulmuştur. Ullah Khan ve Ayub (2020), polietilen tereftalat (PET) elyaf ve şeritler içeren kendiliğinden yerleşen betonarme kirişlerin eğilme ve kesme davranışını incelemiştir. Araştırma, şerit veya elyaf formunda olsun, PET şeritlerin kullanılmasıyla süneklikte ve yük taşıma kapasitesinde bir artış ve çökme türünde bir değişiklik olduğunu göstermiştir.

PET liflerinin çatlak köprüleme etkisi, bu performans iyileştirmesinin arkasındaki mekanizma tarafından sağlanır. Bu lifler, gelişen mikro çatlaklar boyunca mekanik bağlantılar görevi görerek çatlakların yayılmalarını ertelediği gözlemlenmiştir (Paulayve Priestley, 1992). Bu çatlakların gelişmesinde dolayı çatlama sonrası betonun tokluğunu artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte, PET lifli betonun performansı lif içeriğine ve dağılımına duyarlıdır. %1 üzerinde PET lifi katkısı, lif aglomerasyonu ve zayıf dispersiyon nedeniyle işlenebilirlikte ve mukavemette düşüşe neden olabilir. Aynı şekilde, yüksek oranda PET lif içeriği, çimento matrisi arasındaki bağlantıyı azalttığı görülmüştür (Pelisser vd., 2012). Ek olarak, betonarme kirişe %1 PET eklendiğinde, standart kirişe kıyasla eğilme mukavemetinde %25'lik bir azalma olduğu ortaya konmuştur (Abdolkhani vd., 2024). Aynı çalışmaya göre, kumun %30 PET ile değiştirilmesi sonucunda çekme çatlak geriliminde bir artış meydana geldiği belirtilmiştir. Ayrıca, Batayneh vd. (2007) betondaki kumun bir kısmını plastik atıkla değiştirmiş ve bu çalışmanın sonucunda, kumun %20'sinin plastik ile değiştirilmesiyle referans betona göre basınç dayanımında %70 oranında azalma gözlemlenmiştir.

Khalid Ali vd. (2022), PET liflerle güçlendirilmiş beton kirişlerin davranışı hakkında, özellikle eğilme uygulamalarına odaklanarak daha fazla araştırma yürüttüler. Çalışmaları, PET lif betonunun tam kesitli ve katmanlı uygulamalarını içeriyordu. Katmanlı yöntemde, PET lifler kiriş kesitinin çekme bölgelerine, örneğin alt çeyreğe veya yarıya yerleştirildi. Katmanlı PET lif yerleşimine sahip kirişler, tam PET lif dağılımına sahip olanlara kıyasla gelişmiş tokluk ve süneklik sergilediği görülmüştür. Bu bulgular, kritik gerilim bölgelerinde liflerin lokalize edilmesinin malzeme kullanımını en aza indirirken yapısal performansı iyileştirdiğini gösteren Sri Ravindrarajah ve Tam (1984) tarafından yapılan önceki araştırmalara dayanmaktadır.

Beton uygulamalarında PET kullanımının potansiyeli yalnızca elyaflarla sınırlı değildir. Geleneksel çelik donatılar yerine doğrudan takviye olarak dokunmuş PET elyaf

halatları kullanarak yeni bir yöntem tanıttı. Bu halatlar, PET şişelerin şeritlere parçalanması ve çekme özelliklerine sahip kordonlara örülmesiyle yapıldı. Çeşitli PET halat ve çelik çubuk karışımlarıyla güçlendirilmiş toplam altı beton kiriş üzerinde deneyler yapılmıştır. Sadece PET halat kullanılan kirişler, çelikle güçlendirilmiş olanlara göre daha az nihai yük kapasitesi gösterirken, çok daha iyi süneklik oranlarına sahipti ve %400'e kadar bir artış göstermiştir(Jouyandeh vd., 2023).

PET elyaf takviyeli betonun mekanik özellikleri elyaf boyutu, geometri, en boy oranı ve PET parçacıklarının yönelimi dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır. Borg vd. (2016), pürüzsüz ve dalgalı PET elyaf katılımlarının beton kiriş özelliklerine etkisini karşılaştırdı. Dalgalı elyafların eğilme mukavemetini önemli ölçüde iyileştirdiğini gösterdiler. Foti (2011) ayrıca belirli şekilli PET elyafların (örneğin bantlar veya şeritler) etkisini de ele almıştır. PET elyafların şekli, çekme mukavemetini doğrudan etkilediği ve çatlak genişliğini azalttığı bulgusuna ulaşılmıştır. Benzer şekilde, elyaf boyutları ve yüzey özellikleri çimento hamuruyla mekanik bağı etkilerken, yükleme sırasında genel enerji dağılımı bunlar nedeniyle değişmiştir (Khalid vd., 2025).

Dayanıklılık ve çevresel maruziyet betonun dayanım ve dayanıklılığı açısından dikkate alınması gereken diğer önemli hususlardır. PET lifleri alkali koşullarda kararlılık gösterir ve aşınmaz; ancak donma-çözülme döngülerine, klorürlere ve UV ışınlarına maruz kaldıklarında zaman içindeki dayanıklılıkları hala araştırma konusu olmaya devam etmektedir (Qaidi vd., 2022). Örneğin, betona dahil edildiğinde, PET lifleri uzun bir süre sonra yüksek klorür seviyelerine sahip ortamlarda daha az etkili hale gelebilir (Pelisser vd., 2012). Alani vd. (2019), PET'in ultra yüksek performanslı betona dahil edilmesinin agresif çevresel maruziyete karşı direncini artırdığını göstermiştir.

Kim vd. (2010), beton içerisine hacimce %0,5, %0,75 ve %1,0 oranlarında ilave edilen PET elyaflarının betonarme kirişlerin eğilme davranışına etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, PET elyaf katkısı yapılan numunelerin nihai eğilme kapasitelerinde, elyaf içermeyen kontrol numunesine kıyasla sırasıyla %25, %31 ve %32 oranında artış gözlemlenmiştir. Ayrıca, PET elyaf içeren kirişlerin sehim sünekliklerinin, referans numuneye kıyasla yaklaşık 7,56 ila 10,34 kat daha yüksek olduğu rapor edilmiştir. Bu iyileşmenin, elyafların çekme dayanımını artırması ve makro çatlak oluşumunu geciktirme potansiyeline bağlandığı belirtilmiştir.

Koo vd. (2014) ise, çimento hacminin %0,5'i oranında PET elyafı içeren DB kirişlerin eğilme kapasitesinde %15 ve sehim süneklik indeksinde %80 oranında artış kaydedildiğini bildirmiştir. Bu gelişmiş performans, PET elyaflarının gerilme bölgesinde

gerilmeyi taşıyabilme ve çatlak oluşumunu kontrol etme özellikleriyle ilişkilendirilmiştir. Al-Hadithi ve Abbas (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, beton hacminin %0,25 ile %1,5'i arasında değişen oranlarda PET elyafı içeren betonarme kirişlerin kesme dayanımları değerlendirilmiştir. PET elyaf oranı %1'e kadar artırıldığında kesme dayanımında artış gözlenmiştir. En yüksek artış, %1 PET elyaf katkılı numunede kontrol kirişine göre %8,4 olarak kaydedilmiştir. Ancak bu eşik değerin üzerine çıktığında dayanımda düşüş meydana gelmiştir. Ayrıca, PET elyaf katkısının kirişlerin sehim sünekliğini artırdığı gözlemlenmiştir. Çünkü elyafların betonarme kirişlerin yük altında çatlak gelişimini geciktirmesi ile alakalı olduğu bildirilmiştir.

PET atıklarının donatılı beton içerisindeki aderans davranışına etkisi üzerine yapılan çalışmalar sınırlı olmakla birlikte, Assaad vd. (2022), 1–6 mm boyutlarındaki parçalanmış PET atıklarını beton karışımına %0 ile %4.5 arasında değişen hacim oranlarında eklemiştir. Elde edilen bulgulara göre, %1,5 ve %3 oranında PET atığı içeren numunelerde aderans dayanımı sırasıyla %9 ve %7 oranlarında artış göstermiştir. En yüksek aderans dayanımı %1,5 oranında PET içeren numunede elde edilmiş olup, PET oranının daha fazla artırılması durumunda aderans dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Bu azalma, parçalanmış PET atığı ile beton matrisi arasındaki zayıf bağ ve düşük yoğunlukla açıklanmıştır.

Yapısal performans açısından, PET liflerinin özellikle dinamik koşullar altında enerji emilimini, darbe direncini ve çatlak sonrası davranışını önemli ölçüde iyileştirdiği gösterilmiştir. Geri dönüştürülmüş PET lifleri, dinamik yüklemeye maruz kalan betonun performansını arttırmıştır (Kim vd., 2010). Ayrıca, epoksi ile bağlanmış bükülmüş PET lifleri beton kirişlerin çekme mukavemetini artırabilir (Falih vd., 2020). Bu çalışmalar, PET liflerinin beton yapıların mukavemetini ve esnekliğini artırmada hayati bir rol oynayabileceğini göstermektedir. Ekonomik açıdan bakıldığında, PET elyaf takviyeli beton uzun vadede maliyet açısından etkilidir. İlk işleme maliyeti biraz daha yüksek olsa da, bakım tasarrufu ve yapıların uzatılmış hizmet ömrü bu farkı telafi eder. Khalid vd. (2025) göre, polimer elyaf takviyeli beton, geleneksel betona kıyasla yaşam döngüsü maliyetlerini %30-35 oranında azaltır. Bu durum, polimer elyaf takviyeli betonu rutubetli veya aşırı çevresel etkilerin bulunduğu ortamlara maruz kalan altyapılar için iyi bir sürdürülebilir alternatif inşaat malzemesi yapar. Bu avantajlara rağmen, PET elyaf takviyeli betonun döngüsel veya yorulma yüklenme koşulları altında uzun vadeli davranışına ilişkin daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Bu bağlamda, elyaf takviyeli kirişlerdeki karmaşık çatlak oluşumunu daha iyi anlamak için geliştirilmiş

kesme modellerine ihtiyaç vardır (Shibayamave Nishiyama, 2023). Ek olarak, standardizasyon önemli bir zorluk oluşturmaktadır. Mevcut tasarım yönergeleri şu anda PET elyaf takviyeli betonun kullanımını desteklememektedir, bu da bu malzemelerin profesyoneller için yapısal tasarımlarda uygulanmasını zorlaştırmaktadır (Bandelt ve Billington, 2016).

PET ve diğer geri dönüştürülmüş malzemeler veya nano-eklenmiş malzemeler içeren hibrit çözümlerin de betonun genel performansını güçlendirdiği ortaya konmuştur. Örneğin, PET bazlı jeopolimer betona nano-silika eklenmesi, plastik dahil edilme nedeniyle oluşan mukavemet kaybını önemli ölçüde azalttığı ifade edilmiştir (Ahmed vd., 2023). Dahası, elektrokimyasal işlemde geçmiş geri dönüştürülmüş lifler çimento matrisleriyle daha etkili bir şekilde bağlandığı gözlemlenmiştir. Bu, yüzey modifikasyonunun PET ile güçlendirilmiş kompozitlerin mukavemet özelliklerini daha da iyileştirebileceği anlamına geldiği sonucuna varılmıştır (Li vd., 2022).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Beton Numunelerin Hazırlanması

Bu tez çalışmasında hazırlanan beton karışımlarında bağlayıcı olarak TS EN 197-1 standardına göre Ağrı arkoz CEM II/B-M (P-L) 32.5 N ve CEM II/A-M (P-L) 42.5R Portland kompozit çimentoları kullanılmıştır. Çimentoların özgül ağırlıkları sırasıyla 2,91 g/cm³ ve 2,95 g/cm³ olup kimyasal bileşimleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. CEM II/B-M (P-L) 32.5 N ve CEM II/A-M (P-L) 42.5R Portland kompozit çimentosunun kimyasal bileşimleri.

		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Özgül ağırlık
CEM II 32.5	%	48,2	21,2	5,41	3,52	1,42	0,43	0,58	2,95	2,91
CEM II 42.5	%	58,93	19,58	4,58	3,45	1,46	0,06	0,51	2,57	2,95

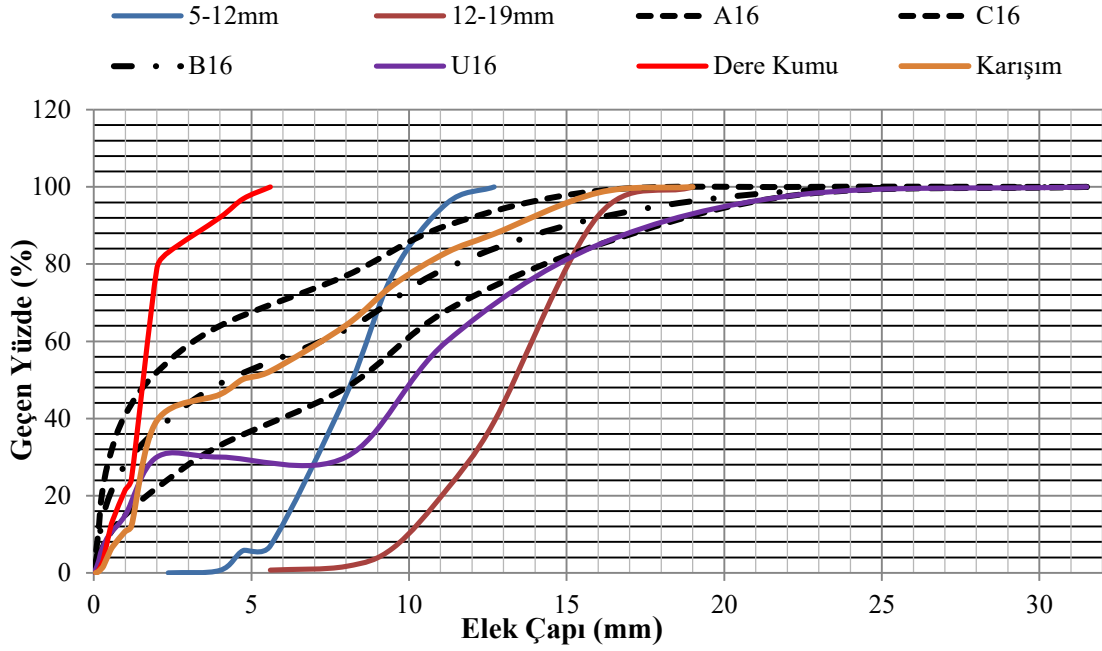
Agrega olarak kırmataş çakıl ve nehir kumu kullanılmıştır. Kırmataş çakıl İğdir ilinden, nehir kumu ise Aras dere yataklarından temin edilmiştir. Bu agregat tiplerinin uygun oranlarda karıştırılmasıyla, kabul edilebilir sınırlar içerisinde bir gradasyon eğrisi elde edilmiştir. Agregaların fiziksel özellikleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Kırmataş çakılın yığın yoğunluğu 1,57 g/cm³ iken, nehir kumunun yığın yoğunluğu 1,55 g/cm³’tür. Ayrıca, kırmataş çakılın özgül ağırlığı nehir kumundan daha yüksektir. Öte yandan, kırmataş çakılın su emme oranı %1,3 ve nehir kumunun su emme oranı %1,4’tür.

Çizelge 3.2. Kırmataş çakıl ve nehir kumunun fiziksel özellikleri

Agrega Tipi	Yığın Yoğunluğu (gr/cm ³)	Özgül ağırlık (gr/cm ³)	Su Emme (%)
Kırmataş Çakıl	1,57	2,74	1,3
Dere Kumu	1,55	2,35	1,4

Deneyde kullanılan agregaların parçacık boyut dağılımları (gradasyon eğrileri), Şekil 3.1’de gösterildiği gibi, maksimum agregat boyutu 16 mm olan bir beton karışımı için TS706’da (TS706 2003) özetlenen agregat boyut dağılım limitlerine dayanarak belirlenmiştir. Şekilde, A16 ve B16 sembolleri sırasıyla gradasyon eğrisinin üst ve alt sınırlarını belirtirken, B16 optimum gradasyon eğrisini temsil etmektedir. Deneysel

karışımlarda, 0-5 mm nehir kumu ince agregası ile 5-12 mm ve 12-19 mm kırma taş çakıl iri agregaları kullanılmıştır. Bu agregaların parçacık boyut dağılımları Şekil 3.1'de sunulmakta ve Çizelge 3.3'de daha ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Belirtilen gradasyon sınırları içerisinde bir karışım elde etmek için, 1 m³ beton karışımı için toplam agrega bileşimi %50 ince agrega, %30 5-12 mm iri agrega ve %20 12-19 mm iri agrega olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.1. Bireysel agregaların (kırmataş çakıl (5-12 mm ve 12-19 mm) ve nehir kumu) ve karışımların TS706 tarafından belirtilen üst ve alt sınırlarla birlikte parçacık boyut dağılımları

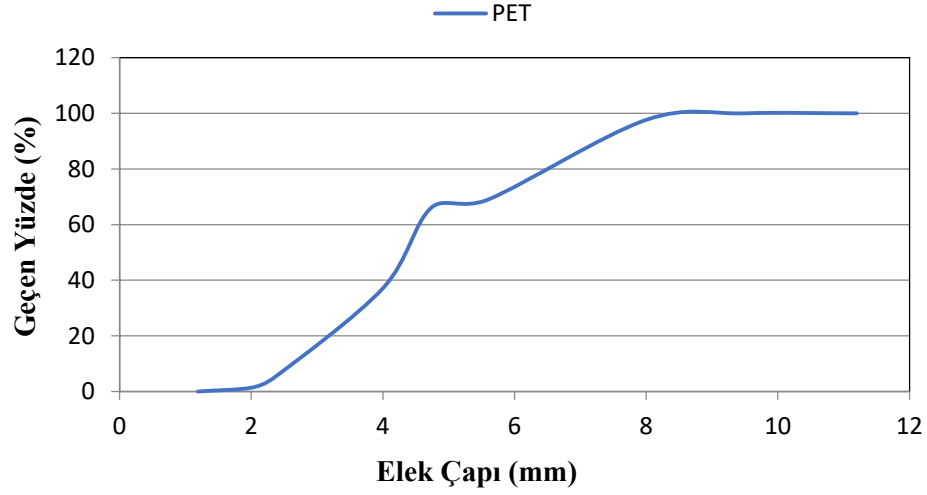
Çizelge 3.3. Elek analizi ile belirlenen agregaların geçme yüzdeleri

Agrega Tipi	Elek Çapı (mm)										İncelik Modülü
	32	16	13	8	4	2	1	1	0	0,25	
	Geçen Yüzde %										
5-12 mm Kırmataş Çakıl	100	100	100	46	1	0	0	0	0	0	6,53
12-19 mm Kırmataş Çakıl	100	93	39	2	0	0	0	0	0	0	7,7
Dere Kumu	100	100	100	100	92	79	22	11	3	2	3,91

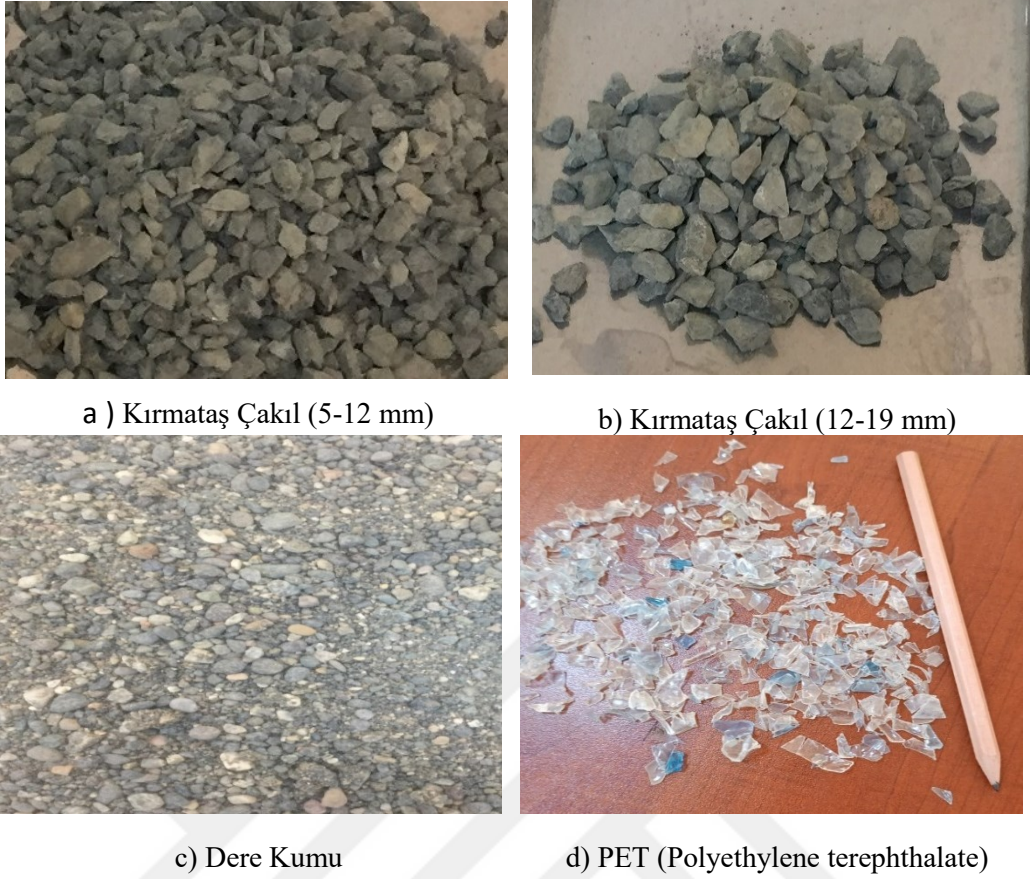
Beton karışımına hacim oranına göre parçalanmış halde PET (polietilen tereftalat) eklenmiştir. PET'in fiziksel özellikleri ve elek analizi sonuçları sırasıyla Çizelge 3.4 ve Şekil 3.2'de sunulmuştur.

Çizelge 3.4. PET'in fiziksel özellikleri

Yığın Yoğunluk (gr/cm ³)	0,25
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	1,1

**Şekil 3.2.** PET için elek analizi sonuçları

Çimento olarak CEM II/B-M (P-L) 32.5N ve CEM II/A-M (P-L) 42.5R, iri agrega olarak kırmataş çakıl, ince agrega olarak nehir kumu ve ek malzeme olarak PET kullanılmıştır. Karışımdaki su oranı 0,5 olarak kullanılmıştır. İlk olarak referans beton hazırlanmış ve ardından beton karışımına %1, %3, %5, %10 ve %20 hacim oranlarında PET eklenerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Referans beton ve her PET yüzdesi için üç numune hazırlanmış ve sonuçların ortalaması hesaplanmıştır. Karışımlarda kullanılan malzemeler Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Karışımlarda kullanılan malzemeler

Referans beton ve PET içerikli betonda kullanılan malzeme miktarları Çizelge 3.5’de sunulmaktadır.

Çizelge 3.5. Beton karışımındaki malzeme miktarı (metreküp başına) (kg)

Karışım	w/c	Çimento	Çakıl 5-19 mm	Dere Kumu 0-5 mm	PET
Referans	0,5	407	878	911	-
1%	0,5	407	878	911	2,5
3%	0,5	407	878	911	7,5
5%	0,5	407	878	911	12,5
10%	0,5	407	878	911	25
20%	0,5	407	878	911	50

3.1.1 Basınç, yarmada-çekme ve eğilme deneyleri

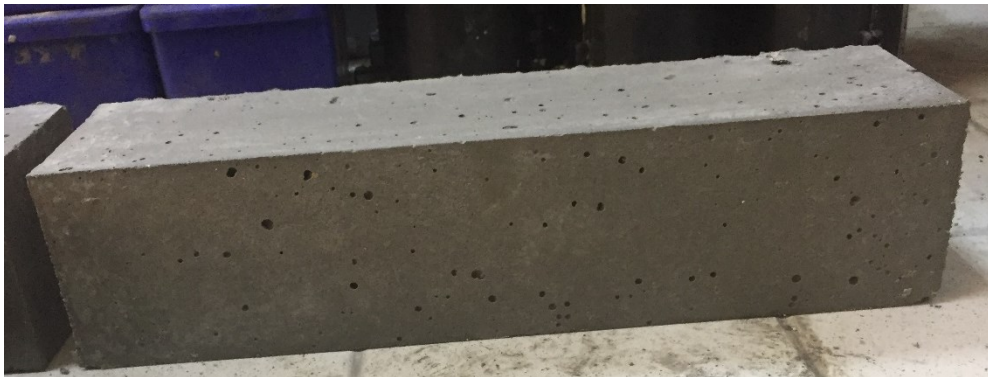
Standart 10x10x10 cm küp beton numuneler hazırlanarak TS EN 12390-3 standardına uygun olarak 0,25 N/mm²/s yükleme hızıyla (TSE 2003) basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deneyde, referans ve tüm PET yüzdeleri için üçer adet numune hazırlanarak, üç farklı kür süresi için toplam 54 adet deney numunesi elde edilmiştir. Numuneler 20°C sıcaklıkta kireçle doyurulmuş su içeren tanklarda 3, 7 ve 28 gün süreyle kür edilmiş ve ardından basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, her kür süresi için üç numunedan alınan ortalama değerler hesaplanarak elde edilmiştir. Yarmada çekme dayanımı deneyleri, 10x10x20 cm boyutlarındaki silindir numuneler kullanılarak TS EN 12390-6 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Toplam 36 adet numune üretilerek aynı şartlarda kürlenmiş ve 7 ve 28 günlük kür süresinin ardından deneylere tabi tutulmuştur.



a) Basınç deneyi için hazırlanan numuneler



b) Yarmada-çekme deneyi için hazırlanan numuneler

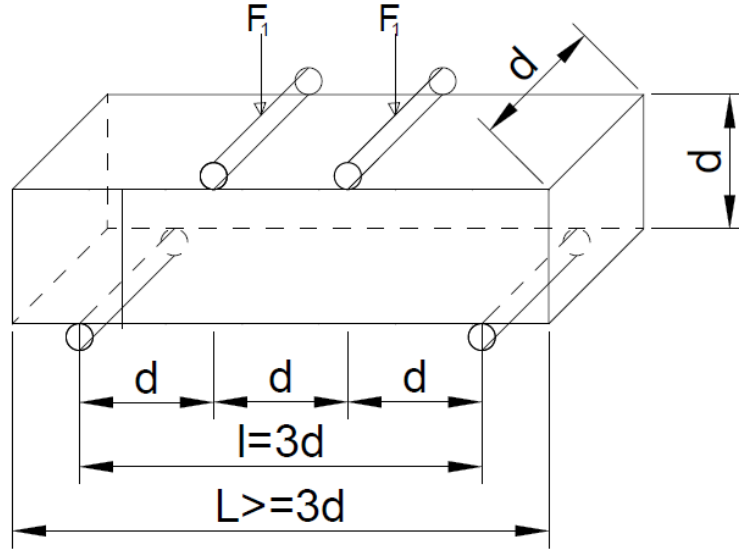


c) Eğilme Deneyi için hazırlanan numune

Şekil 3.4. (a) 10 cm'lik küp beton numuneleri (b) 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde silindir beton numuneleri (c) 10x10x40 cm'lik beton kiriş numunesi örneği

Kiriş eğilme testleri TS EN 12390-5 standardına (TSE 2002) uygun olarak gerçekleştirilmiştir. 10×10×40 cm ölçülerindeki kiriş numuneleri üretildi ve 28 günlük

bir süre boyunca aynı koşullar altında kürlenmiştir. Şekil 3.4'de gösterildiği gibi, toplam 18 test numunesi iki nokta yükleme düzeneği kullanılarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.5. Beton kirişlerin eğilme dayanımını ölçmek için 4 noktalı yükleme deney düzeneği (TS EN 12390-5)

Beton kirişin eğilme dayanımı (f_{cf}) aşağıda verilen formül kullanılarak belirlenmiştir:

$$f_{cf} = \frac{F \times I}{d_1 \times d_2^2} \quad \text{Denklem 3.1}$$

Burada, F maksimum yükü, I destek makaraları arasındaki mesafeyi ve d_1 ve d_2 kirişin en kesit boyutlarını ifade etmektedir.

3.1.2 Sıcaklık deneyleri

CEM II 32.5 ve CEM II 42.5 çimentosu kullanılarak standart 10x10x10 cm küp numuneler hazırlanmış ve farklı yüksek sıcaklıklarda basınç dayanımındaki değişimler hem referans numuneler hem de farklı PET oranları içeren numuneler için incelenmiştir. Bu amaçla numuneler 24 saat boyunca 100, 150, 200 ve 300 °C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Daha sonra basınç dayanımı testleri yapılmadan önce 24 saat daha laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Deney tabii tutmak için hem referans karışımı hem de farklı oranlarda PET içeren beş karışım için her birinden üçer numune olmak üzere toplam 144 adet test numunesi hazırlanmıştır. Numuneler basınç testine tabii tutulmadan

önce 28 günlük kürlenme süresi boyunca 20 °C sıcaklıktaki kireçle doyurulmuş suya daldırılmıştır. Basınç deneyi TS EN 12390-3 standardına uygun olarak 0,25 N/mm²/s (TSE 2003) yükleme hızıyla gerçekleştirilmiştir. Bulgular, üç test numunesinden alınan değerlerin ortalaması alınarak elde edilmiştir.



Şekil 3.6. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılmadan önce hazırlanan numuneler (ref. için 10 cm küp beton ve PET içerikli) (sol) ve 300 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra referans ve PET modifiye edilmiş numuneler (sağ)

3.1.3 Donma-çözülme deneyleri

Donma-çözülme testi için, 10x10x10 cm ölçülerindeki küp numuneler, CEM II 32.5 ve CEM II 42.5 çimentosu kullanılarak üretilmiştir ve 28 gün boyunca kürlenmiştir. Kürlenme işleminin ardından numuneler ASTM C666 (ASTM, 2017) standartlarına uygun olarak donma-çözülme döngülerine tabi tutulmuştur. Toplamda 36 numune test edilmiştir. Her numune nemli, berrak bir jel ile kaplanmış ve donma-çözülme odasına yerleştirilmiştir. 25 döngüden sonra, mukavemetteki azalma ölçülmüştür. Her döngünün toplam süresi 360 dakika olup, aşağıdaki şekilde ayrılmıştır:

- İlk 180 dakika: +4°C'den -20°C'ye sıcaklık değişimi yapılmış.
- Sonraki 30 dakika: -20°C'de tutulmuş.
- Sonraki 120 dakika: -20°C'den +4°C'ye sıcaklık değişimi yapılmış.
- Son 30 dakika: +4°C'de tutulmuş.

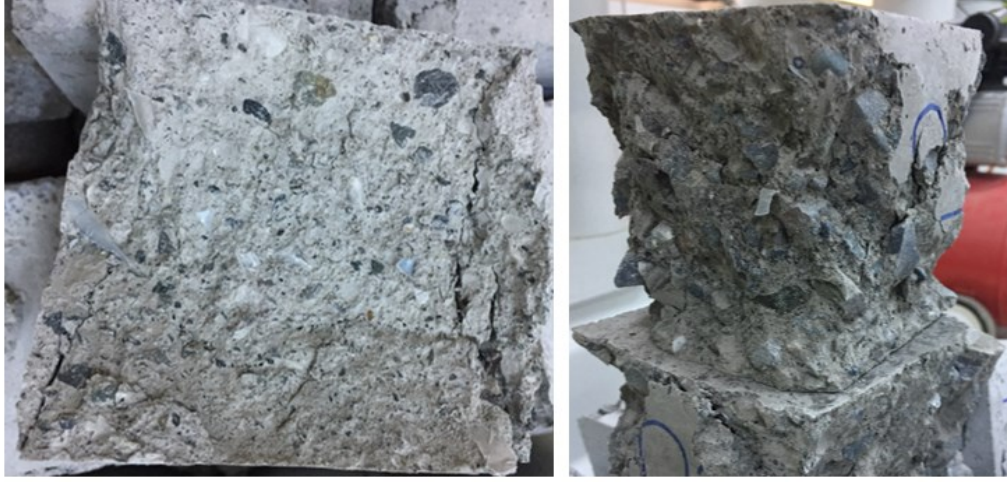


Şekil 3.7. Donma-çözülme kabini (Sol) ve kabindeki numunelerin düzenlenmesi (sağ)

Normal kürlenmiş ve donma-çözölmeye maruz bırakılmış numunelerin sıkıştırma testlerinden sonra, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri gerçekleştirilmiştir. Betonun SEM analizi, mikro yapısal özelliklerini incelemek ve malzemenin performansını değerlendirmek amacıyla yapılmıştır.

3.1.4 Taramalı-elektron mikroskobu (SEM) analizleri

Normal kürlenmiş ve donma-çözölmeye maruz bırakılmış numunelerin basınç testlerinden sonra, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri yapılmıştır. Betonun SEM analizi, mikro yapısal özelliklerini incelemek ve malzemenin performansını değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.8. SEM analizlerinde kullanılan numunelerin örneği

3.2 Betonarme Kiriş Numunelerin Hazırlanması

Kiriş, küp ve silindir numunelerin hazırlanmasında sülfata dayanıklı puzolanik bir çimento olan CEM IV/B(P) 32.5R-SR kullanılmıştır. Su oranı 0,5 olarak seçilmiştir. Çimento, toplam agrega içeriğinin %25'ini oluşturmaktadır. 1 m³ beton için agrega oranları %50 ince agrega ve %50 iri agrega olarak belirlenmiştir. Beton karışımında, tane çapı 5-13 mm arasında değişen iri agregalar ile çapı 0-4 mm arasında değişen ince agregalar kullanılmıştır. Bu çalışmada, karışım hacimine bağlı olarak %1, %3, %5, %10 ve %20 oranlarında parçalanmış polietilen tereftalat (PET) eklenmiştir. PET'in yığın yoğunluğu ve özgül ağırlığı sırasıyla 0,25 gr/cm³ ve 1,1 gr/cm³ olarak belirlenmiştir. Elek analizine göre, PET'in tane boyutu dağılımının 2-8 mm aralığında olduğu görülmüştür. Karışımında kullanılan PET yığını Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Polietilen tereftalat (PET)

Beton karışımında iri ve ince agregalarla birlikte CEM IV/B(P) 32.5R-SR çimentosu kullanılmış, PET ise tamamlayıcı malzeme olarak eklenmiştir. Başlangıçta referans beton karışımı üretilmiş ve daha sonra deneysel çalışmanın bir parçası olarak hacimce %1, %3, %5, %10 ve %20 oranlarında PET beton karışımına dahil edilmiştir. Tüm beton testleri için üçer numune üretilmiş ve elde edilen sonuçların ortalama değerleri hesaplanmıştır. Referans ve PET eklenmiş beton için malzeme miktarları Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Beton karışımındaki malzeme miktarları (metreküp başına) (kg)

Karışım	Su/çimento	Çimento	Çakıl (5-13 mm)	Dere Kumu (0-4 mm)	PET
Referans	0,5	407	878	911	-
1%	0,5	407	878	911	2,5
3%	0,5	407	878	911	7,5
5%	0,5	407	878	911	12,5
10%	0,5	407	878	911	25
20%	0,5	407	878	911	50

Tüm deneyler, numunelerin hazırlandığı Necmettin Erbakan Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı için standart 15x15x15 cm küp beton numuneler, yarmada çekme dayanımı için 10x10x20 cm silindir numuneler ve eğilme dayanımı için 10x10x40 cm beton kiriş numuneleri kullanılarak 28 günlük dayanım elde edilmiştir. Ayrıca betonarme kiriş numuneleri 15x10x100 cm boyutlarında tasarlanmıştır.



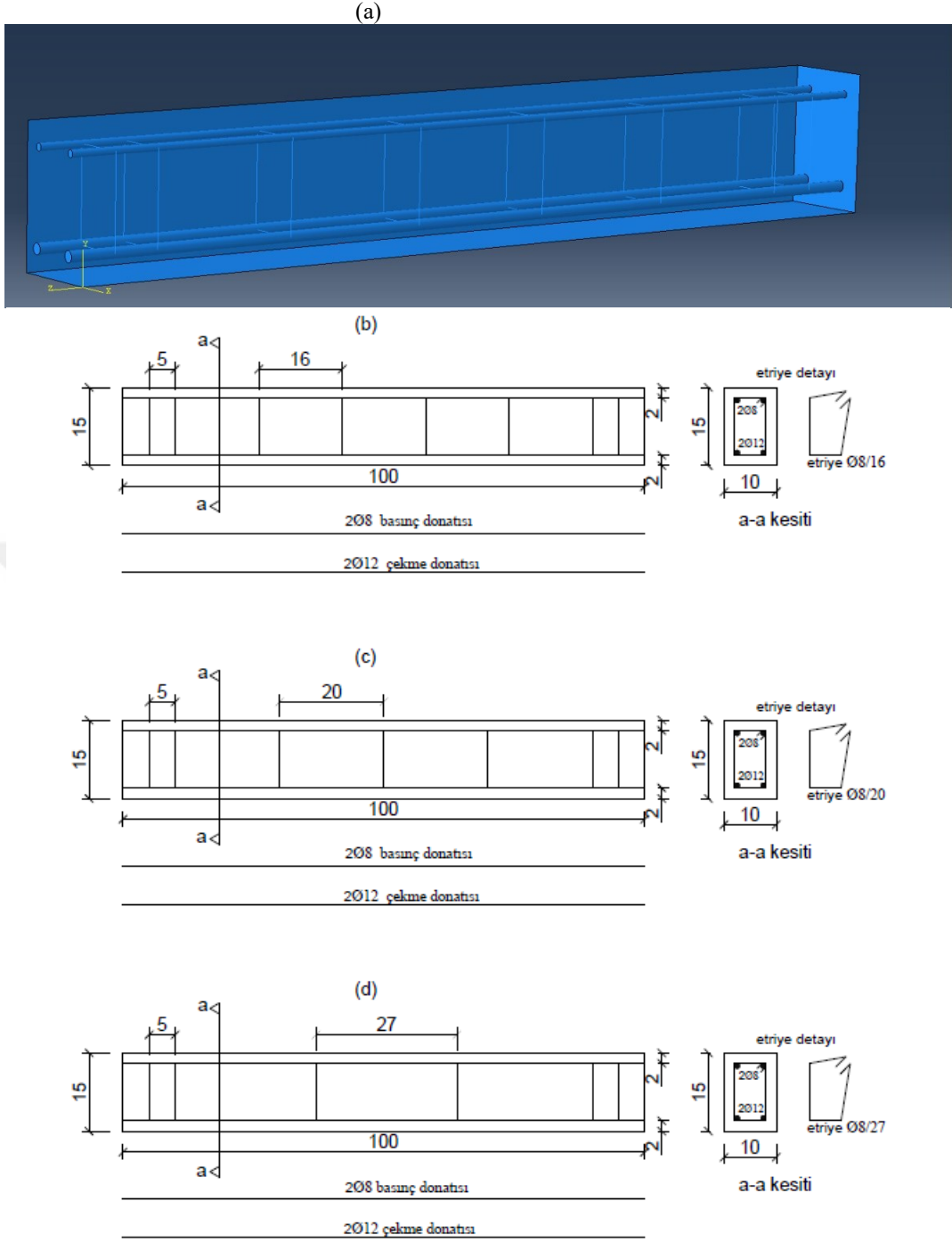
Şekil 3.10. Deney kalıpları ve örnekleri

Deneyde kullanılan kalıplar ve numuneler Şekil 3.10’da gösterildiği gibidir. Testler için 90 adet numune hazırlanmış ve test edilmiştir. Deneyler için üretilen numune sayıları Şekil 3.7’ de verilmiştir.

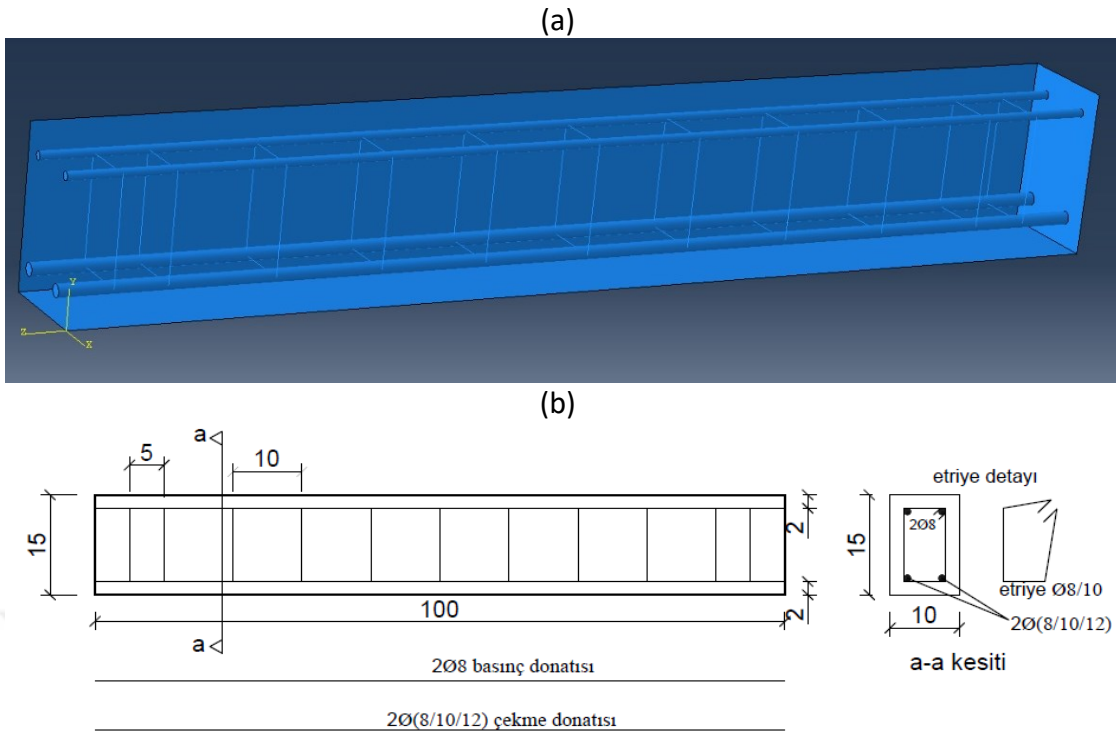
Çizelge 3.7. Üretilen toplam numune sayısı

Numune Tipi	Toplam Numune Sayısı
Küp	18
Silindir	18
Beton kiriş	18
Betonarme Kiriş	36

Şekil 3.11’de görüldüğü gibi, numunelerin kesme performansını incelemek amacıyla, betonarme kirişler için etriye aralıkları 16 cm, 20 cm ve 27 cm olmak üzere üç farklı değer seçilmiştir. Geriye kalan betonarme kirişlerde etriye aralıkları sabit tutulurken, çekme donatı çapları 8 mm, 10 mm ve 12 mm olarak değiştirilmiştir. (Şekil 3.12).



Şekil 3.11. a) Betonarme kirişlerin 3 boyutlu şematik görünümü ve (b) 16 cm, (c) 20 cm ve (d) 27 cm etriye aralıklarına sahip betonarme numunelerin gösterimi



Şekil 3.12. a) Betonarme kirişin 3 boyutlu şematik görünümü ve (b) Sabit etriye aralıklı ve 8, 10 ve 12 mm çekme donatısı çaplı betonarme kirişler

Kiriş numunelerin eğilme testleri dört noktalı yükleme düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel düzenleme iki tür mesnet içermektedir: biri sabit, diğeri hareketli. Deneylerin yürütülmesi sırasında yük ve yer değiştirme verileri toplanmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.13'de gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Eğilme testleri için dört noktalı yükleme düzeneği

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

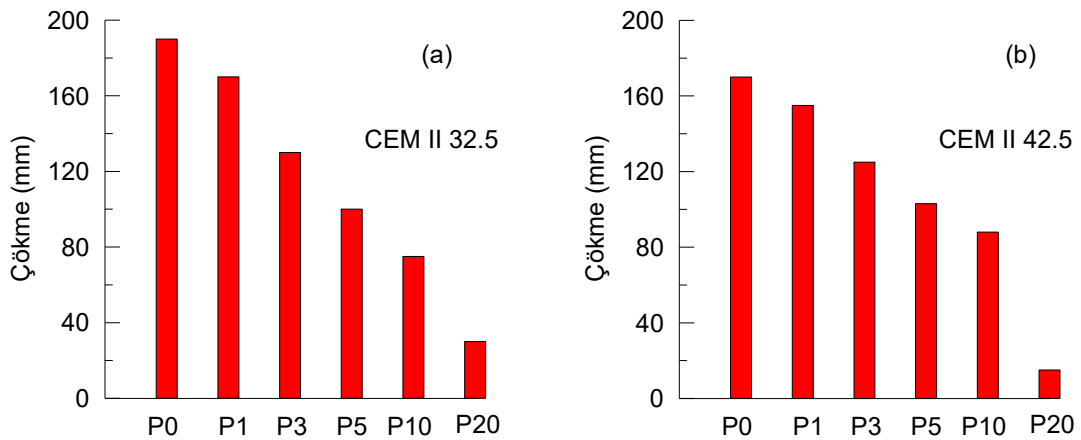
4.1 Beton Numune Deney Sonuçları

4.1.1 Çökme deneyi sonuçları

Çökme deneyi, TS EN 12350-2 standardına (TSE 2002) uygun olarak 300 mm yüksekliğinde ve 102 mm taban çapında bir çökme konisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Beton, çelik bir çubuk vasıtasıyla 25 vuruş yapılarak üç katman halinde sıkıştırılmış, daha sonra koni 5 saniye sonrasında kaldırılmış ve çökme miktarı ölçülmüştür. Şekil 4.1'de deneyin yapılma sürecinden bir kesit gösterilmiştir. Çökme deneyi, referans ve tüm PET içeren numuneler için gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 4.2 ve Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Konik döküm beton numunesinin çökme davranışına ilişkin çökme ölçümü örneği



Şekil 4.2. (a) CEM II 32.5 ve (b) CEM II 42.5 çimento tipleri ile üretilen ve farklı oranlarda PET içeren beton karışımları için çökme testi değerleri

Çizelge 4.1. Farklı oranlarda PET içeren CEM II 32.5 ve CEM II 42.5 ile üretilen beton karışımları için çökme testi değerleri

Karışım	Çökme Değerleri (mm)		Azalma Oranı (%)
	CEM II 32.5	CEM II 42.5	
P0 (Referans)	190	170	10,53
P1	170	155	8,82
P3	130	125	3,85
P5	100	103	-3,00
P10	75	88	-17,33
P20	30	15	50,00

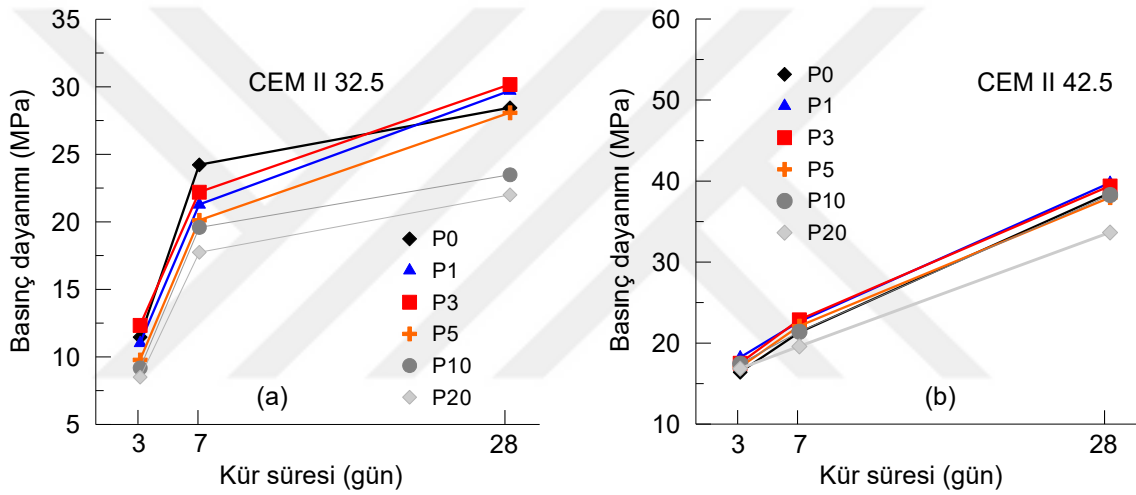
Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi, CEM II 32.5 için referans karışımının çökme değeri 190 mm olarak ölçülmüştür. Hacimce %1 PET eklenmesiyle çökme değeri 170 mm'ye düşmüştür. Ayrıca, hacimce %3 ve %5 PET eklendiğinde, kaydedilen çökme değerleri sırasıyla 130 mm ve 100 mm olmuştur. Benzer şekilde, %10 ve %20 PET eklemeleriyle daha fazla azalma gözlemlenmiş ve sırasıyla 75 mm ve 30 mm'lik çökme ölçümleri elde edilmiştir. CEM II 42.5 için ise referans betonun çökme değeri 170 mm olarak kaydedilmiştir. %1 PET ilaveli karışım (P1) için çökme değeri 155 mm olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde, %3, %5 ve %10 PET ilavesiyle çökme değerleri sırasıyla 125 mm, 103 mm ve 88 mm'ye düşmüştür. En yüksek PET içeriğinde (%20) önemli bir azalma gözlenmiş ve çökme değeri 15 mm'ye düşmüştür.

Genel olarak, CEM II 32.5 ve CEM II 42.5 ile hazırlanan beton karışımlarının çökme değerleri Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi birbirinden belirgin şekilde farklıdır. Daha açık bir şekilde, referans beton karışımları olan P1, P3 ve P20'de, CEM II 32.5 yerine CEM II 42.5 kullanılması sırasıyla yaklaşık %11, %9, %4 ve %50 oranında azalmaya yol açmıştır. Buna karşılık, P5 ve P10 beton karışımlarında CEM II 32.5 yerine CEM II 42.5 kullanılması sırasıyla %3 ve %17,33 oranında artışlara yol açmıştır.

4.1.2 Basınç deneyi sonuçları

Şekil 4.3, farklı kür süreleri (3, 7 ve 28 gün) için iki farklı çimento türü kullanılarak beton karışımlarının basınç dayanımı gelişimini gösteren iki alt grafikten oluşmuştur: CEM II 32.5 (a) ve CEM II 42.5 (b). Veriler referans beton (P0) ve P1, P3, P5, P10 ve P20 olarak etiketlenen tüm PET ilaveleri için sergilenmiştir. CEM II 32.5 ile elde edilen beton karışımlarını gösteren Şekil 4.3(a)'da tüm numuneler kür süresi ilerledikçe basınç dayanımında artan bir eğilim göstermiştir. Daha açık bir şekilde, CEM II 32.5 içerikli tüm beton karışımlarında, basınç dayanımı değerlerindeki artış oranı, Çizelge 4.2'de sunulduğu gibi, kür süresi 3 günden 7 günlüğe çıktığında yaklaşık %100

olarak elde edilmiştir. Bu oranlar, kür süresi 7 günden 28 güne çıktığında %20 ile %40 arasında değişmiştir. CEM II 42.5 ile elde edilen karışımlar için artış oranları ise daha düşük kalmıştır. Artış oranları 3 günlük kür süresinden 7 günlük kür süresine çıktığında yaklaşık olarak %16-%30 değer aralığında gözlenmiştir. Ancak, basınç dayanımı değerlerinin 7 günden 28 güne kadar kürlenme sürelerindeki artış oranları %80,76'ya kadar ulaşmış, en düşük artış oranı ise %71,77 olmuştur. Dolayısıyla, beton karışımlarından bağımsız olarak, CEM II 32.5 çimento tipinin daha hızlı erken dayanım kazanımına (7 gün içinde) neden olduğu, CEM II 42.5 ile elde edilen 28 günlük basınç dayanımı kazanımının ise CEM II 32.5 içerikli betonunun basınç dayanımlarını geride bıraktığı söylenebilmektedir.



Şekil 4.3. PET katkılı ve PET katkısız (referans) CEM II 32.5 (a) ve CEM II 42.5 (b) ile üretilen beton numunelerinin 3, 7 ve 28 günlük kür sürelerindeki basınç dayanımlarındaki değişimler

CEM II 32.5 çimento tipi ile üretilen beton karışımlarının basınç dayanım değerleri PET miktarına göre karşılaştırıldığında, referans (P0), P1 ve P3 beton karışımları tüm kür sürelerinde birbirine çok yakın basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Bu üç karışım arasında, referans karışım 7 günlük kür süresi sonunda en yüksek basınç dayanımına ulaşmıştır (24,22 MPa). Bu değer Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. P3 karışımı ise, en yüksek basınç dayanımına sırasıyla 3 ve 28 günlük kür sürelerinde 12,34 MPa ve 30,17 MPa olarak ulaşmıştır. P5, özellikle de P10 ve P20 beton karışımları ise her zaman, referans karışım ile P1 ve P3 beton karışımlarına kıyasla daha düşük basınç dayanımı değerleri göstermiştir. En düşük basınç dayanımı, P20 betonunda 3, 7 ve 28 günlük kür sürelerinde sırasıyla 8,5 MPa, 17,75 MPa ve 22 MPa olarak elde edilmiştir. Genel olarak, P1 ve P3 karışımlarının basınç dayanımları referans betona (basınç

dayanımı değeri 28,45 MPa) kıyasla artış (29,71 MPa ve 30,17 MPa'ya) gösterirken, P5 karışımında 28 günlük kür süresinde minimal bir azalma gözlenmiştir. Betondaki PET içeriği %10 (P10) ve %20'ye (P20) çıkarıldığında, referans betonun 28 günlük basınç dayanımına kıyasla sırasıyla %17,43 ve %22,67 oranlarında anlamlı değişimler gözlenmiştir.

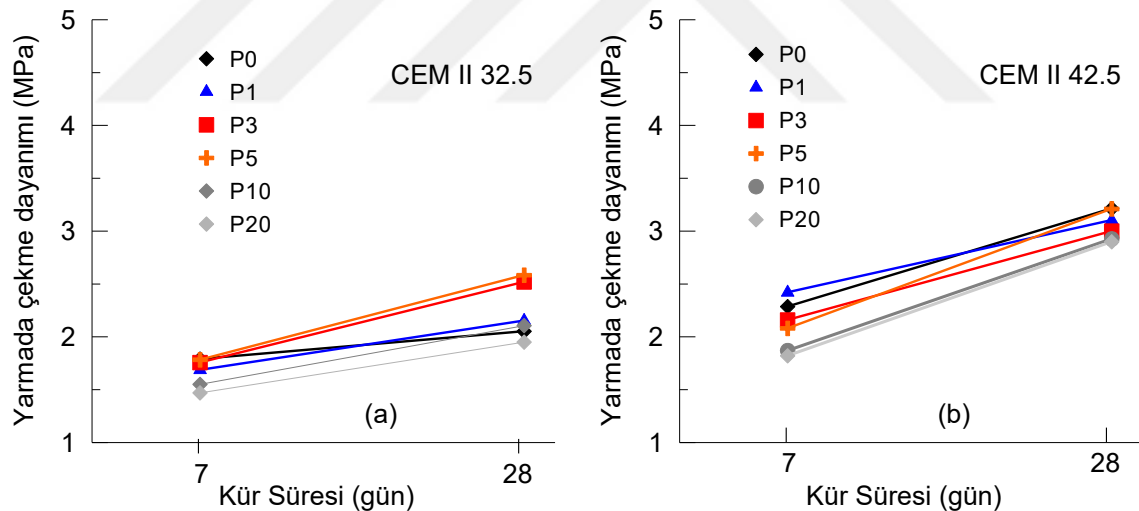
Çizelge 4.2. CEM II 32.5 ve CEM II 42.5 çimentolu farklı PET içerikli beton numunelerinin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları (MPa)

Karışım	CEM II 32.5					CEM II 42.5				
	3 günlük	7 günlük	Artış oranı (%)	28 günlük	Artış oranı (%)	3 günlük	7 günlük	Artış oranı (%)	28 günlük	Artış oranı (%)
P0(Referans)	11,5	24,2	111,3	28,5	17,5	16,4	21,3	29,8	38,5	80,8
P1	11,0	21,3	93,1	29,7	39,6	18,2	22,6	24,3	39,8	75,6
P3	12,3	22,2	79,9	30,2	35,9	17,5	22,9	30,5	39,4	72,2
P5	9,8	20,1	105,7	28,1	39,6	17,0	22,1	29,9	38,0	71,8
P10	9,2	19,5	113,4	23,5	19,9	17,5	21,4	22,6	38,3	78,9
P20	8,5	17,8	108,8	22,0	23,9	16,9	19,6	16,3	33,7	71,8

CEM II 42.5 çimento tipi ile hazırlanan beton karışımlarının basınç dayanım değerleri Şekil 4.3 ve Çizelge 4.2'de sunulmuştur. Referans beton karışımının 3, 7 ve 28 günlük kür sürelerindeki basınç dayanım değerleri sırasıyla 16,42 MPa, 21,31 MPa ve 38,52 MPa olarak bulunmuştur. Beton karışımına %1 (P1) PET katıldığında ise 3, 7 ve 28 günlük kür sürelerindeki basınç dayanım değerleri sırasıyla 18,21 MPa, 22,64 MPa ve 39,76 MPa'ya yükselmiştir. P3 karışımının basınç dayanımı da tüm kür sürelerinde P1 karışımına göre daha yakın değerler göstermiştir. Ayrıca, tüm beton karışımları arasında 7 günlük kür süresinde en yüksek basınç dayanımı P3 karışımında, 3 ve 28 günlük kür sürelerinde ise en yüksek basınç dayanımları P1 karışımında gözlenmiştir. Bununla birlikte, beton karışımına %5 oranında PET eklendiğinde, referans değerlere kıyasla tüm kürlenme sürelerinde basınç dayanımında hafif bir azalma gözlenmiştir. Ek olarak, P10 beton karışımında tüm kürlenme süreleri boyunca basınç dayanımı değerleri, P5 beton karışımına kıyasla hafif bir artış göstererek sırasıyla 17,45 MPa, 21,4 MPa ve 38,28 MPa olarak ölçülmüştür. Ancak, P20 karışımının 3, 7 ve 28 günlük kürlenme sürelerindeki basınç dayanımı değerleri sırasıyla 16,85 MPa, 19,59 MPa ve 33,65 MPa'ya düşmüştür. Genel olarak, P20 karışımı hariç olmak üzere, PET içeren tüm beton karışımlarının basınç dayanım değerlerinin önemli bir azalma olmaksızın kabul edilebilir bir aralıkta kaldığı gözlemlenmiştir.

4.1.3 Yarmada çekme deneyi sonuçları

Tüm beton karışımlarının 7 ve 28 günlük kürlenme ile yarmada çekme dayanımı test sonuçları Şekil 4.4'de sunulmuştur. Şekil 4.4.a, CEM II 32.5 çimento tipi ile hazırlanan karışımların yarmada çekme dayanımı değerlerini gösterirken; Şekil 4.4.b, CEM II 42.5 çimento tipi ile elde edilen karışımlardaki değerleri göstermektedir. Ayrıca, testlerden elde edilen kesin ölçüm değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir. Şekil 4.4'de de görüldüğü üzere, her iki çimento tipi için de tüm numuneler için kürlenme süresi ilerledikçe çekme dayanımında artış kaydedilmiştir. Daha açık bir ifadeyle, CEM II 32.5 çimento tipiyle hazırlanan tüm beton karışımlarında 7 günden 28 güne kadar olan kürlenme süreleri için yarmada çekme dayanımındaki artış oranı yaklaşık olarak %14 ile %45 arasında değişmiştir (Çizelge 4.3). CEM II 42.5 çimento tipiyle elde edilen beton karışımlarında ise bu artış oranı 7 ila 28 günlük kürlenme süresi boyunca yaklaşık %28 ile %60 arasında değişmiştir. Genel olarak, CEM II 42.5 çimento tipi kullanılan tüm numunelerdeki yarmada çekme dayanımı değerleri, 7 ve 28 günlük kür süreleri için CEM II 32.5 tipi kullanılanlara kıyasla daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 4.4. CEM II 32.5 (a) ve CEM II 42.5 (b) çimento tipleriyle üretilen beton numunelerinin, PET katkısız (Referans) ve belirli oranlarda PET katkılı karışımlarda, 7 ve 28 günlük kürlenme süreleri için yarmada çekme dayanımı değişimleri

CEM II 32.5 çimento tipiyle hazırlanan karışımda, referans (P0) betonun 7 ve 28 günlük yarmada çekme dayanımları sırasıyla 1,19 MPa ve 2,05 MPa olarak elde edilmiştir. Beton karışımına %1, %3 ve %5 oranlarında PET ilavesiyle birlikte, 28 günlük kür süresinde yarmada çekme dayanımında düzenli bir artış gözlemlenirken; 7 günlük kür süresinde elde edilen dayanım değerleri referans betonunkine yakın seviyelerde kalmıştır. Ayrıca,

en yüksek çekme dayanımı 28 günlük kür süresinde 2,58 MPa olarak ölçülmüştür. %10 (P10) ve %20 (P20) PET ilavelerinden sonra ise, kür sürelerinin tamamında çekme dayanımında düzenli bir azalma meydana gelmiştir. P10'dan P20'ye geçildiğinde, 28 günlük çekme dayanımı 2,11 MPa'dan 1,95 MPa'ya, 7 günlük çekme dayanımı ise 1,55 MPa'dan 1,47 MPa'ya düşmüştür. Genel olarak, %5'e kadar olan PET katkılarında 7 ve 28 günlük kür süreleri için tüm numunelerde dayanım değerlerinde artış gözlemlenirken, bu oranın üzerindeki ilavelerde dayanımda azalma meydana gelmiştir.

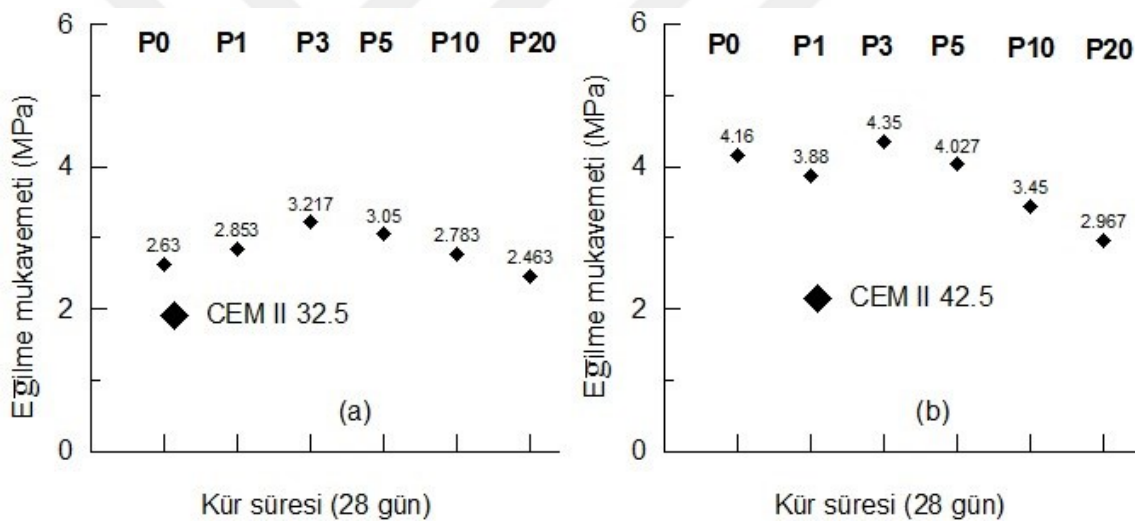
Çizelge 4.3. CEM II 32.5 ve CEM II 42.5 çimento tipleriyle üretilen, farklı PET içeriklerine sahip beton numunelerinin 7 ve 28 günlük yarmada çekme dayanımları (MPa)

Karışım	CEM II 32.5			CEM II 42.5		
	7 günlük	28 günlük	Artış oranı (%)	7 günlük	28 günlük	Artış oranı (%)
Referans	1,79	2,05	14,53	2,29	3,21	40,17
P1	1,69	2,15	27,22	2,42	3,1	28,10
P3	1,76	2,52	43,18	2,16	3	38,89
P5	1,78	2,58	44,94	2,08	3,21	54,33
P10	1,55	2,11	36,13	1,87	2,93	56,68
P20	1,47	1,95	32,65	1,82	2,9	59,34

CEM II 42.5 çimento tipiyle hazırlanan beton karışımlarının yarmada çekme dayanımı değerlendirildiğinde, referans (P0) betonun 7 ve 28 günlük kür sürelerindeki çekme dayanımı sırasıyla 2,29 MPa ve 3,21 MPa olarak ölçülmüştür. Karışıma %1 ve %3 oranlarında PET ilavesiyle birlikte, 28 günlük betonun çekme dayanımında azalma gözlenmiş; bu değerler sırasıyla 3,1 MPa ve 3 MPa olarak ölçülmüştür. Ancak, 7 günlük beton çekme dayanımında farklı bir eğilim gözlenmiş; %1 PET ilavesi çekme dayanımı 2,42 MPa'ya yükselirken, %3 PET ilavesi 2,16 MPa'ya düşürmüştür. Bununla birlikte, %5 PET ilavesinde 7 günlük kür süresindeki çekme dayanımı 2,08 MPa'ya düşerken, 28 günlük kür süresinde bu değer 3,21 MPa'ya yükselmiştir. %10 PET ilavesinden sonra ise, hem 7 günlük hem de 28 günlük kür sürelerinde yarmada çekme dayanımı değerleri düzenli bir şekilde azalmıştır. En düşük çekme dayanımı değerleri, %20 PET içeren beton karışımında elde edilmiş olup; 7 günlük betonda 1,82 MPa ve 28 günlük betonda 2,9 MPa olarak ölçülmüştür. Özetle, 7 günlük kürlemede en yüksek yarmada çekme dayanımı P1 karışımında gözlenirken, 28 günlük kürlemede en yüksek değerler referans beton ve %5 PET ilaveli beton karışımında elde edilmiştir.

4.1.4 Eğilme deneyi sonuçları

Şekil 4.5, CEM II 32.5 (a) ve CEM II 42.5 (b) çimento tipleriyle hazırlanmış beton karışımları için 28 günlük kür süresi sonunda elde edilen eğilme dayanımı test sonuçlarını göstermektedir. Elde edilen net değerler ve artış oranları ise Çizelge 4.4’de sunulmuştur. Çimento tipinin CEM II 32.5’ten CEM II 42.5’e değiştirilmesi, tüm karışımların eğilme dayanımında artışla sonuçlanmıştır. Referans (P0) karışımında en yüksek artış gözlenmiş olup, eğilme dayanımı CEM II 32.5 çimentosu ile 2,63 MPa iken, CEM II 42.5 ile 4,16 MPa olarak ölçülmüş ve bu da %58,17 oranında bir artışa karşılık gelmiştir. P1, P3, P5, P10 ve P20 karışımlarının eğilme dayanımlarında ise sırasıyla %36 , %35,22 , %32,03 , %23,97 ve %20,46 oranlarında artış gözlenmiştir. CEM II 42.5 kullanımıyla (CEM II 32.5 yerine) elde edilen eğilme dayanımı artış oranının, karışıma katılan PET miktarının artmasıyla birlikte azaldığı açıkça gözlemlenmiştir.

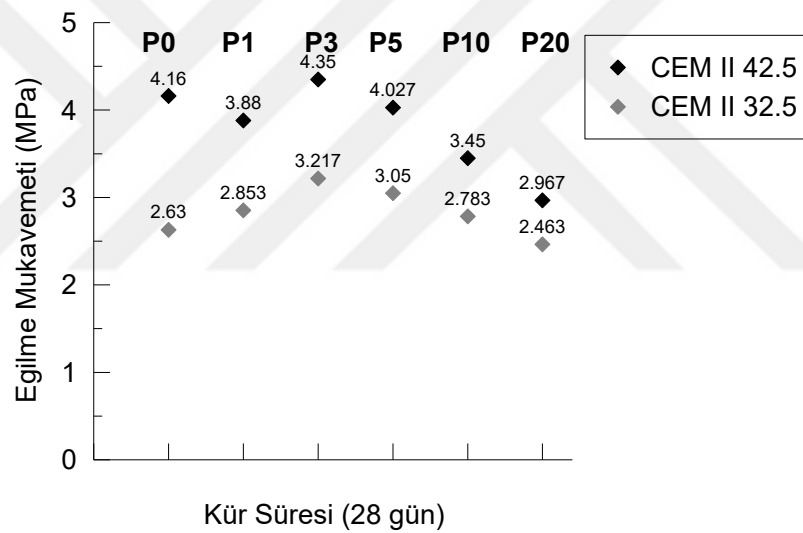


Şekil 4.5. CEM II 32.5 (a) ve CEM II 42.5 (b) çimento tipleriyle, PET içermeyen (referans) ve farklı oranlarda PET içeren beton karışımlarının eğilme dayanımındaki değişim grafiği

Çizelge 4.4. CEM II 32.5 ve CEM II 42.5 çimento tipleriyle üretilen beton numunelerinde, PET miktarının artmasıyla birlikte eğilme dayanımı değerlerindeki değişim

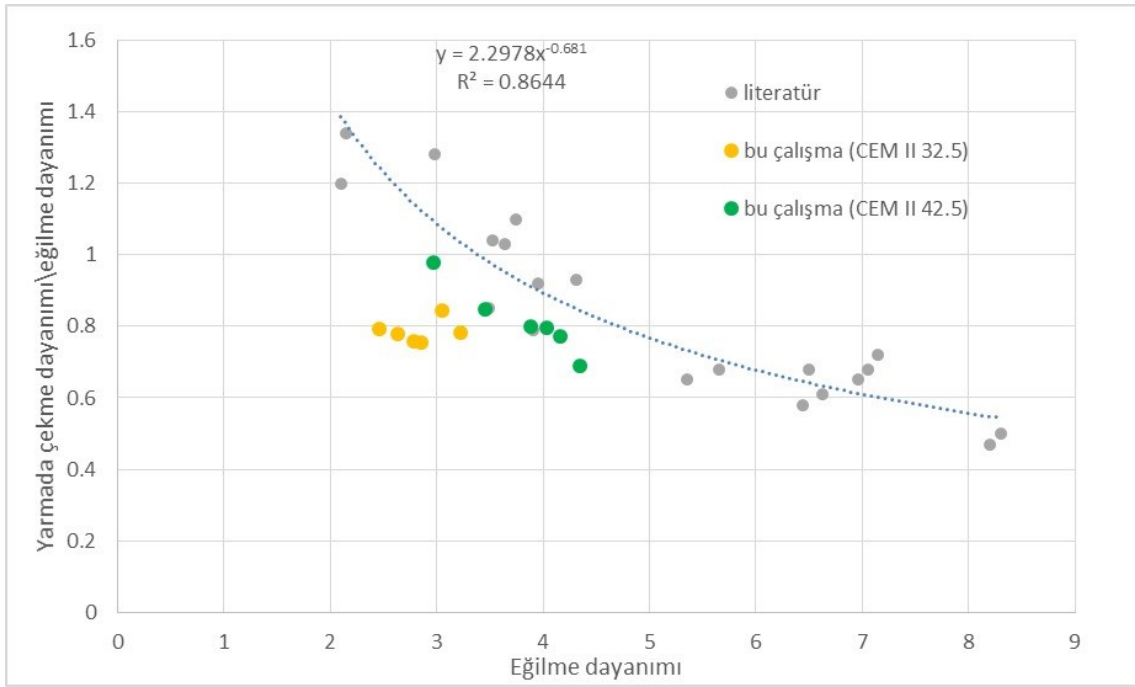
Karışım	Çimento Türü		Artış oranı (%)
	CEM II 32.5	CEM II 42.5	
Referans	2,63	4,16	58,17
P1	2,85	3,88	36,00
P3	3,22	4,35	35,22
P5	3,05	4,03	32,03
P10	2,78	3,45	23,97
P20	2,46	2,967	20,46

CEM II 32.5 çimento tipiyle üretilen karışımların eğilme dayanımı değerleri karşılaştırıldığında, referans (P0) karışımdan P3 karışımına kadar (sırasıyla 2,63 MPa ve 3,22 MPa) artış eğilimi gözlenmiştir. Ancak PET ilavesinin bu oranın üzerine çıkması, eğilme dayanımında düşüşe neden olmuştur. Örneğin, P5 karışımı için eğilme dayanımı 3,05 MPa olarak ölçülmüşken, P10 karışımı için bu değer 2,78 MPa ve P20 karışımı için ise 2,46 MPa olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, bu düşüş eğilimine rağmen, %10'a kadar olan PET ilavesi (yani P10'a kadar), betonun eğilme dayanımı kapasitesini iyileştirmiştir. CEM II 42.5 çimento tipiyle elde edilen beton karışımlarının eğilme dayanımı değerlerine bakıldığında ise, referans (P0), P1, P3 ve P5 karışımları arasında büyük farklılıklar görülmemiş; bu karışımların eğilme dayanımı sırasıyla 4,16 MPa, 3,88 MPa, 4,35 MPa ve 4,027 MPa olarak ölçülmüştür. Geriye kalan PET katkılı iki beton karışımı (P10 ve P20), belirgin şekilde daha düşük eğilme dayanımı değerleriyle ilişkilendirilmiştir.



Şekil 4.6. CEM II 32.5 ve CEM II 42.5 çimento kullanılan beton karışımların, referans (P0) ve PET katkılı numuneler için eğilme dayanımı değerleri

Genel olarak, CEM II 32.5 ve CEM II 42.5 çimento tipleriyle elde edilen tüm beton karışımları arasında en yüksek eğilme dayanımı, %3 oranında PET ilavesiyle sağlanmıştır (Şekil 4.6). Ayrıca, CEM II 32.5 çimento tipi kullanıldığında %10'a kadar, CEM II 42.5 kullanıldığında ise %5'e kadar olan PET ilavesi betonun eğilme dayanımını artırmıştır. Ancak, belirtilen bu oranların üzerindeki PET katkıları, eğilme dayanımı değerlerinde belirgin bir azalmaya yol açmıştır.

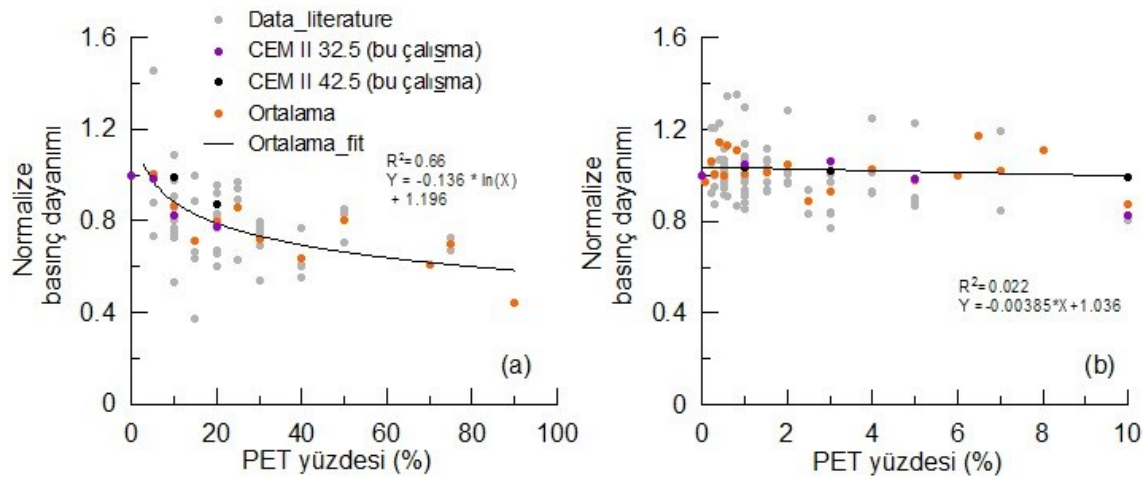


Şekil 4.7. Eğilme dayanımına karşı yarmada çekme dayanımının eğilme dayanımına oranı grafiği (literatür ve bu çalışma verileri)

Şekil 4.7’de yarmada çekme dayanımının eğilme dayanımına oranı ile eğilme dayanımı arasındaki bağıntı ele alınmıştır. Literatürde mevcut olan verilerle elde edilen logaritmik regresyon eğrisi ($R^2 = 0.8644$) (Mohamed vd., 2017), eğilme dayanımının artışıyla bu oranın düştüğünü göstermektedir. Bu araştırmada kullanılan CEM II 32.5 (sarı) ve CEM II 42.5 (yeşil) çimento çeşitleri ile elde edilen bulgular, literatürdeki genel eğilimle oldukça uyumludur. CEM II 32.5 çimentosu ile daha düşük, CEM II 42.5 çimentosu ile ise daha yüksek dayanım seviyeleri elde edilmiştir. Ancak her iki çimento türü için yarmada çekme/eğilme dayanımı oranları, eğilme dayanımı arttıkça azalma eğilimi göstermektedir. Bu durum, malzeme dayanım özelliklerinin birbirine doğrusal olmayan bir ilişkiyle bağlı olduğunu ve çimento türünün bu bağlantı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

4.1.5 Normalize edilmiş sonuçlar

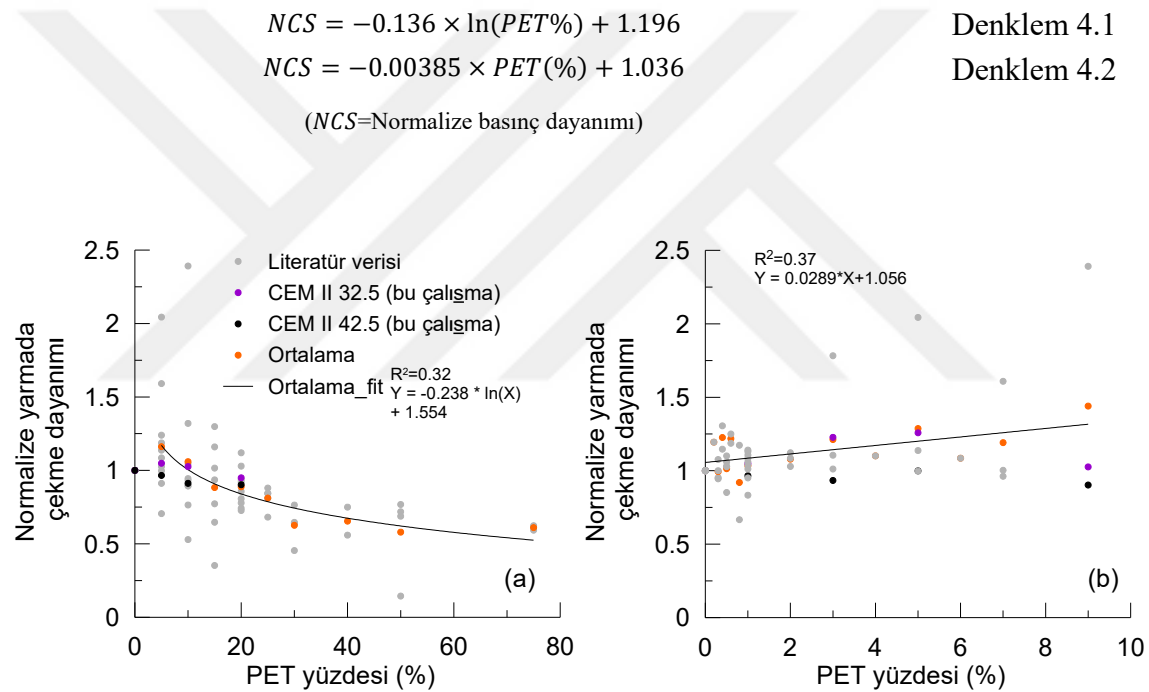
Bu çalışmada elde edilen sonuçların uygunluğunu gösterebilmek amacıyla, literatürde PET içeren betonların özelliklerini incelemiş önceki çalışmaların sonuçları derlenmiş ve bu bölümde sunulmuştur. Literatürden alınan veriler; basınç, çekme ve eğilme dayanımı değerlerini içermektedir. Farklı çalışmaların bulgularının makul biçimde karşılaştırılabilmesi amacıyla bu değerler, referans değerlere göre normalize edilmiştir (Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da görüldüğü gibi). Sunulan veriler şu çalışmalardan elde edilmiştir: Albano vd. (2009); Almeshal vd. (2020); Azhdarpour vd. (2016); Borg vd. (2016); Choi vd. (2009); Gupta vd. (2008); Hameed ve Ahmed (2019); Hameed ve Hamza (2018); Hanuseac vd. (2020); Islam vd. (2016); Jain vd. (2021); Meena vd. (2022); Mehvish vd. (2020); Mohammed ve Hama (2022); Ochi vd. (2007); (Pelisser vd., 2012); Ramadevi ve Manju (2012); Saikia ve De Brito (2014); Sambhaji (2016); Steyn vd. (2021); Tayeh vd. (2021); Thomas ve Moosvi (2020); Zebua (2017). Bazı çalışmaların beton numunelerinde yüksek oranlarda PET (%5, %10, %15, %20, %25, %30, %40, %50, %70, %75 ve %90) kullandığı görülürken; bazı çalışmalar ise oldukça düşük oranlarda PET (%0,25, %0,50, %1, %1,5, %2, %2,5, %3, %4, %5, %6, %6,5, %7, %8 ve %10) ile çalışmıştır. Bu nedenle, her bir dayanım grafiğinde veriler iki ayrı şekilde sunulmuştur (örneğin, Şekil 4.8a ve Şekil 4.8b).



Şekil 4.8. Bu çalışmanın sonuçlarıyla birlikte literatürden elde edilen normalleştirilmiş **basınç dayanımı** değerleri; (a) %5 ile %95 ve (b) %0 ile %10 arasındaki PET içerikleri için

Normalize edilmiş basınç dayanımı değerlerinde genel eğilim, betondaki PET içeriğinin artmasıyla birlikte azalma yönündedir (Şekil 4.8a). Önemli olarak, bazı çalışmalar PET ilavesi %45'e kadar çıktığında dahi normalize edilmiş değerlerin 0,8'in

üzerinde kaldığını göstermekte ve bu durum, basınç dayanımındaki azalmanın görece önemsiz olduğunu (hatta bazı durumlarda iyileşme sağlandığını) ortaya koymaktadır. Logaritmik olarak ilişkilendirilen bu veriler, korelasyon katsayısı (R^2) 0,66 olan Denklem 4.1 ile ifade edilebilmektedir. Göreceli olarak düşük miktarda plastik atık içeriğine sahip durumda (Şekil 4.8b) ise, normalize edilmiş verilerin neredeyse tamamı 0,8'in üzerindedir; bu da plastik atık ilavesinin betona olan olumsuz etkisinin sınırlı ya da olumlu yönde olduğunu göstermektedir. Bu durumda korelasyon daha çok doğrusal bir ilişki göstermekte olup, Denklem 4.2 ile ifade edilmektedir. Ayrıca, bu çalışmada elde edilen bulgular hem yüksek hem de düşük PET içeriği durumlarında literatürdeki verilerle iyi bir uyum göstermektedir (sırasıyla Şekil 4.8a ve Şekil 4.8b).



Şekil 4.9. Literatürden elde edilen normalize edilmiş yarmada çekme dayanımı değerleri ile bu çalışmanın sonuçları; (a) %5 ile %75 ve (b) %0 ile %9 aralığındaki PET içerikleri için

Normalize edilmiş çekme dayanımı verileri, yüksek PET oranlarında (Şekil 4.9a), normalize edilmiş basınç dayanımı verilerine (Şekil 4.8a) kıyasla daha dağınık bir eğilim göstermektedir. Bu durum, korelasyon katsayısının (R^2) 0,32 olmasıyla da yansıtılmaktadır. Bununla birlikte, PET ilavesindeki artışla birlikte bir azalma eğilimi, yarmada çekme dayanımı verilerinde de gözlenmiş ve bu eğilim Denklem 4.3'teki logaritmik ifade ile temsil edilmiştir. Buna karşılık, daha düşük PET oranlarında (Şekil 4.9b), normalize edilmiş çekme dayanımı değerleri doğrusal bir artış göstererek, %9 PET

katkısında referans değerin 1,25 katına kadar ulaşmıştır. Bu doğrusal ilişki, Denklem 4.4 ile temsil edilmektedir. Normalize edilmiş yarmada çekme dayanımı verileri, düşük PET içeriklerinde (Şekil 4.9b) yüksek PET içeriklerine (Şekil 4.9a) göre daha yüksek bir uyum göstermiştir; bu durum sırasıyla 0,37 ve 0,32 olan R^2 değerleriyle ifade edilmektedir. Bu çalışmada elde edilen normalize edilmiş değerlerin, literatür verileriyle yine iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir.

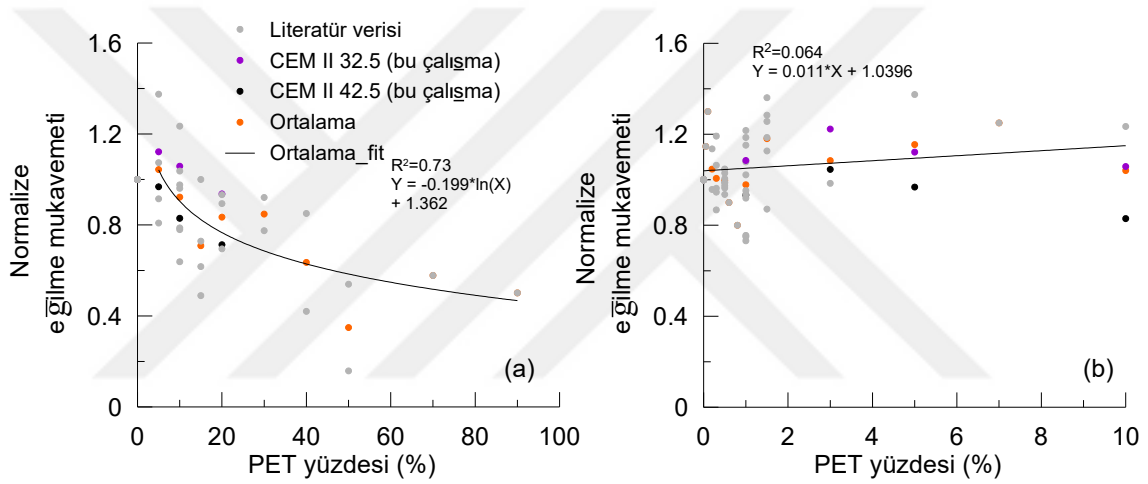
$$NSTS = -0.238 \times \ln(PET\%) + 1.554$$

Denklem 4.3

$$NSTS = 0.0289 \times PET(\%) + 1.056$$

Denklem 4.4

(NSTS= Normalize yarmada çekme dayanımı)



Şekil 4.10. Literatürden elde edilen eğilme dayanımı değerleri ile bu çalışmanın sonuçları, PET içerikleri için; (a) %5 ile %90 aralığında ve (b) %0 ile %10 aralığında

Son olarak, yüksek ve düşük oranlarda PET içeren beton kirişler için normalize edilmiş eğilme dayanımı değerleri, bu çalışmadan elde edilen verilerle birlikte Şekil 4.10a ve Şekil 4.10b'de sunulmuştur. Bu çalışmanın bulguları, önceki deneylerde olduğu gibi literatürdeki verilerle uyum içindedir. Ayrıca, PET oranının artmasıyla eğilme dayanımındaki azalma belirgindir (Şekil 4.10a) ve bu azalma Denklem 4.5 ile gösterilen logaritmik bir ifadeyi takip etmektedir. Sunulan veriler için korelasyon katsayısı (R^2) 0,73'tür. Düşük PET oranlarında normalize edilmiş eğilme dayanımı değerleri, PET ilavesi %10'a kadar artırıldıkça yükselmektedir. Bu eğilim doğrusal bir artış göstermekte olup, görece düşük düzeyde bir korelasyonla ilişkilendirilmiş (Şekil 4.10b) ve Denklem 4.6 ile temsil edilmiştir.

$$NFS = -0.199 \times \ln(PET\%) + 1.362$$

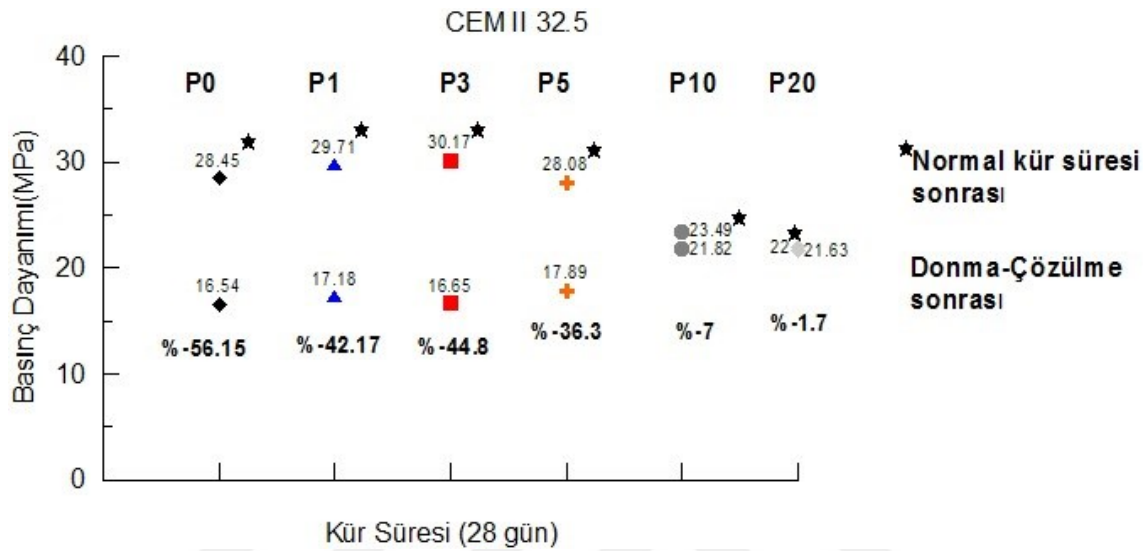
Denklem 4.5

$$NFS = 0.011 \times PET(\%) + 1.0396$$

Denklem 4.6

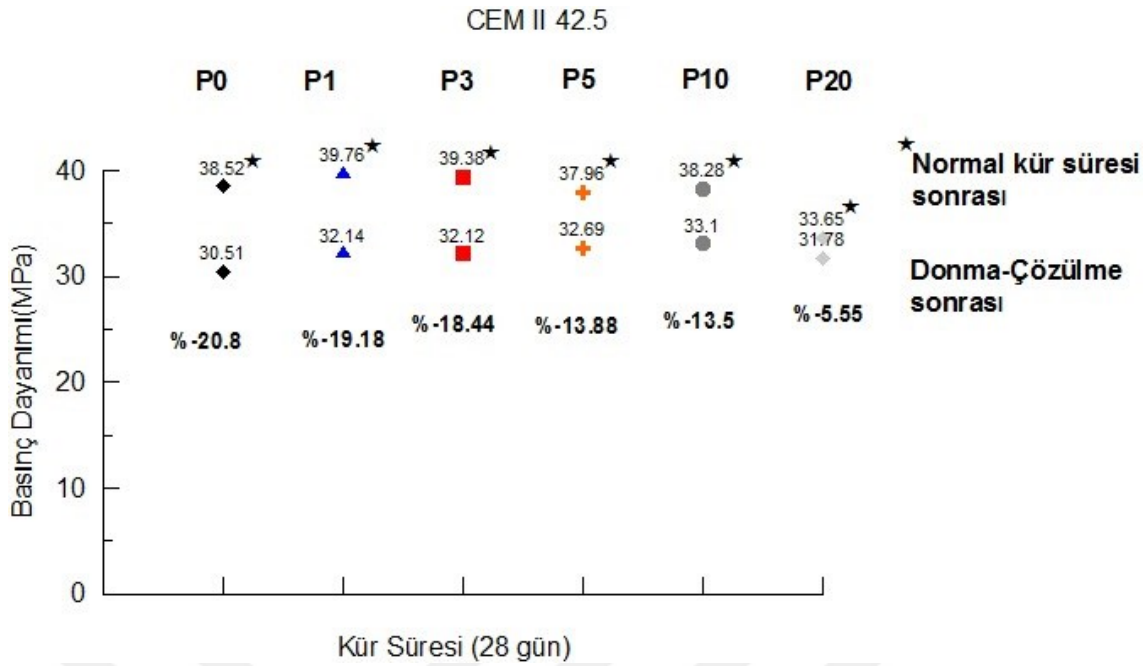
(NFS= Normalize Eğilme dayanımı)

4.1.6 Donma-çözülme testi sonuçları



Şekil 4.11. CEM II 32.5 çimentosu ile üretilen referans (P0) ve PET katkıları ile üretilen beton numunelerinin normal koşullardaki ve çözülme sonrası basınç dayanımı değerleri

CEM II 32.5 çimentosuyla üretilen, referans (P0) ve PET katkıları ile üretilen beton numuneler donma-çözülme testine tabi tutulduktan sonra edilecek basınç dayanımı değerleri ile donma-çözülmesiz referans numunelerinin basınç dayanımı değerleri Şekil 4.11'da sunulmuştur. Tüm numunelerin basınç dayanımı, donma-çözülme döngülerine maruz kalmaları sonrasında azalmıştır. Referans (P0) numunenin basınç dayanımı %56,15 oranında azalarak 28,45 MPa'dan 16,54 MPa'ya düşmüştür. %1, %3, %5, %10 ve %20 PET katkıları ile üretilen beton numunelerinde ise donma-çözülme sonrası sırasıyla %42,17, %44,8, %36,3, %7 ve %1,7 oranında basınç dayanımı kaybı gözlemlenmiştir. Donma-çözülme etkisiyle basınç dayanımındaki en büyük azalma, PET katkısız numunede meydana gelmiştir. Ancak, PET katkısıyla birlikte basınç dayanımındaki azalma oranı düşmektedir; özellikle %10 ve %20 PET katkıları ile üretilen beton numunelerinde bu düşüş oldukça sınırlı kalmıştır. Bu nedenle, numunedeki PET miktarının artması, betonun donma-çözülme döngülerine karşı direncini artırmıştır.



Şekil 4.12. CEM II 42.5 çimentosu ile üretilen beton numunelerin normal koşullardaki ve çözülme sonrası basınç dayanımı değerleri

CEM II 42.5 çimentosu ile üretilen beton numunelerin donma-çözülme deneyi sonrası basınç dayanımı değerleri ile donma-çözülmesiz referans numunelere ait basınç dayanımı değerleri Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Donma-çözülme sonrası basınç dayanımları, referans numunelere kıyasla daha düşük bulunmuştur. PET içermeyen referans (P0) numunenin basınç dayanımı, donma-çözülme döngülerinden sonra 38,51 MPa’dan 30,51 MPa’a düşmüştür. Donma-çözülmeye maruz bırakılan ve %1, %3, %5, %10 ve %20 oranlarında PET içeren beton numunelerin basınç dayanımı değerleri ise sırasıyla 32,14 MPa, 32,12 MPa, 32,69 MPa, 33,1 MPa ve 31,78 MPa olarak ölçülmüştür. Ancak, PET oranı arttıkça donma-çözülmeden kaynaklanan basınç dayanımı kaybının daha az belirgin hâle geldiği gözlemlenmiştir. Örneğin, PET içermeyen beton numunesinde basınç dayanımı %20,8 oranında azalırken; %1, %3, %5, %10 ve %20 PET içeren numunelerde bu azalma sırasıyla %19,18, %18,44, %13,88, %13,5 ve %5,55 olmuştur. Bu sonuçlar doğrultusunda, beton içerisindeki PET miktarının artmasının, numunelerin donma-çözülme döngülerine karşı direncini artırdığı söylenebilir.

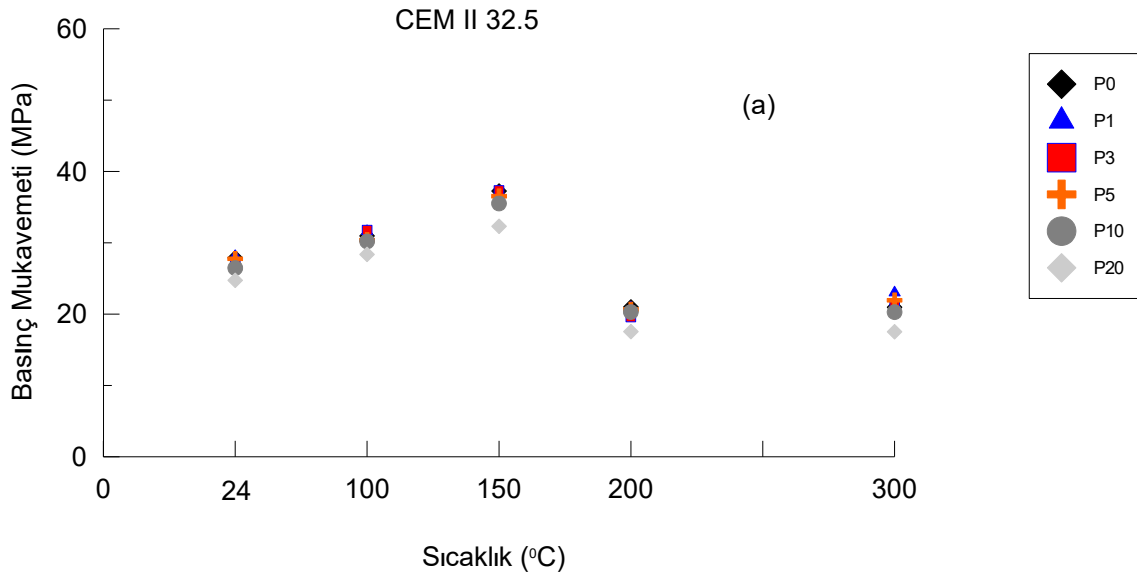
CEM II 32.5 ve CEM II 42.5 çimentoları ile üretilen, normal ve PET katkılı beton numunelerde donma-çözülme döngüleri sonucunda gözlemlenen basınç dayanımı azalma oranları arasında önemli farklılıklar görülmüştür. CEM II 32.5 çimentosu ile üretilen referans, %1, %3 ve %5 PET katkılı numunelerde basınç dayanımındaki azalma oranları %56 ile %36 arasında değişirken, aynı oranlarda PET içeren ve CEM II 42.5 çimentosu

ile üretilen numunelerde bu azalma oranları %20 ile %13,88 arasında gerçekleşmiştir. Donma-çözölmeye tabi tutulan, CEM II 32.5 çimentosu ile üretilmiş %10 ve %20 PET katkılı numunelerin basınç dayanımı azalma oranları sırasıyla %7 ve %1,7 olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, aynı PET oranlarına sahip ve CEM II 42.5 çimentosu ile hazırlanmış numunelerde bu oranlar sırasıyla %13,5 ve %5,55 olarak gözlemlenmiştir. Görüldüğü üzere, CEM II 32.5 çimentosu ile üretilen normal, P1, P3 ve P5 karışımları, donma-çözölme döngülerine karşı CEM II 42.5 çimentosu ile üretilen aynı içerikli numunelere kıyasla daha hassastır. Başka bir ifadeyle, %5 PET içeriğine kadar olan karışımlarda, CEM II 42.5 çimentosu ile üretilmiş beton numunelerinin donma-çözölme döngülerine karşı direnci, CEM II 32.5 çimentosu ile üretilmiş betonlara göre daha yüksektir.

Donma-çözölme döngüleri sonrasında basınç dayanımındaki azalma dikkate alındığında, %5'ten fazla PET içeren beton numunelerinde (P10 ve P20), CEM II 32.5 çimentosu ile üretilen numunelerin, CEM II 42.5 çimentosu ile üretilenlere kıyasla donma-çözölme döngülerine karşı daha yüksek direnç gösterdiği gözlemlenmiştir. Her iki şekil birlikte değerlendirildiğinde, çimento türünden bağımsız olarak PET içeriği arttıkça donma-çözölme döngülerinin neden olduğu basınç dayanımı kaybının azaldığı görülmüştür. Başka bir ifadeyle, donma-çözölme döngülerine karşı direnç, PET oranıyla doğru orantılıdır. Bu bağlamda, %5'e kadar PET katkılı beton numunelerde donma-çözölme döngülerine karşı gösterilen direncin büyük ölçüde çimento türüne bağlı olduğu söylenebilir. Ancak PET katkısı %5'in üzerine çıktığında, donma-çözölme kaynaklı basınç dayanımı azalmasında belirleyici olan unsurun PET miktarı olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, bu PET miktarı etkisinin CEM II 32.5 çimentosu ile üretilmiş P10 ve P20 numunelerinde daha belirgin olduğu ifade edilebilir.

4.1.7 Sıcaklık değişimi deney sonuçları

Farklı oranlarda PET içeren ve CEM II 32.5 ile CEM II 42.5 çimentoları kullanılarak üretilen beton numunelerin basınç dayanımındaki değişim, sıcaklık etkisi altında incelenmiştir. Bu amaçla numuneler, sırasıyla 100, 150, 200 ve 300°C sıcaklıklara 24 saat süreyle maruz bırakılmıştır. Ardından, numuneler 24 saat boyunca laboratuvar koşullarında bekletilmiş ve sonrasında basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur. Elde edilen basınç dayanımı değerleri, CEM II 32.5 çimentosu ile üretilen numuneler için Şekil 4.13'de, CEM II 42.5 çimentosu ile üretilen numuneler için ise Şekil 4.14'de sunulmuştur.



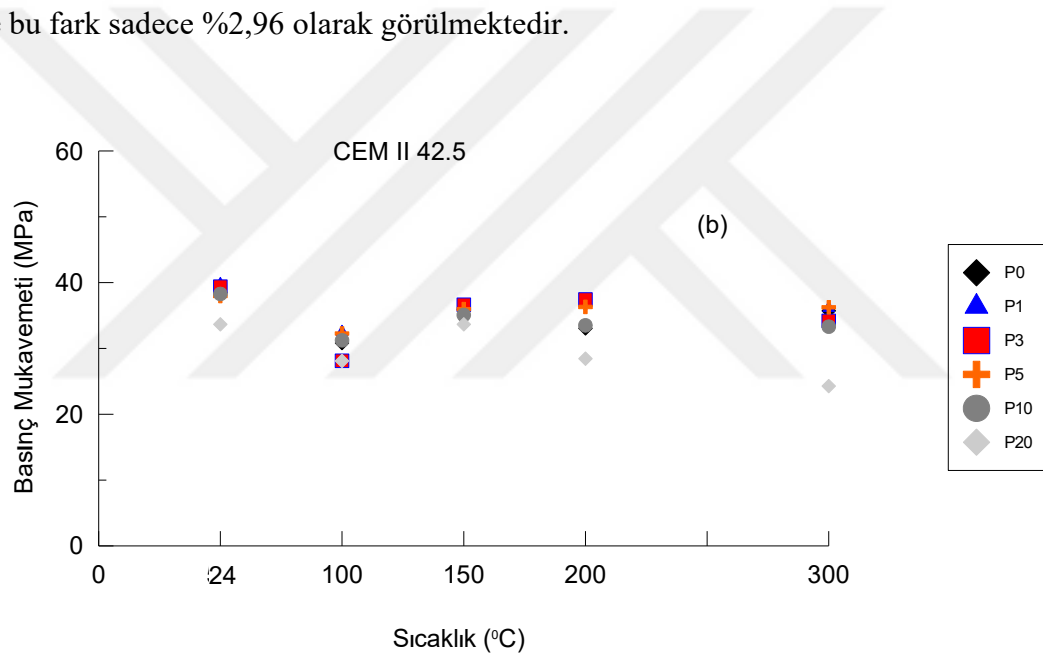
Şekil 4.13. CEM II 32.5 çimentolu beton numunelerin farklı sıcaklıklarda gösterdiği basınç dayanımı değişimi

Çizelge 4.5. CEM II 32.5 çimentolu PET katkı ve katkısız beton numunelerin, farklı sıcaklık seviyelerine maruz kaldıktan sonra basınç dayanımları ve referans dayanımına göre değişim yüzdeleri

Karışım	CEM II 32.5								
	Normal şartlarda	Sıcaklık (100 °C)	Değişim (%)	Sıcaklık (150 °C)	Değişim (%)	Sıcaklık (200 °C)	Değişim (%)	Sıcaklık (300 °C)	Değişim (%)
N(Ref.)	27,89	30,96	11,01	37,25	33,56	21	-24,70	20,97	-24,81
P1	28,13	31,62	12,41	37,09	31,85	20,89	-25,74	23,02	-18,17
P3	27,26	31,78	16,58	37,33	36,94	19,61	-28,06	21,21	-22,19
P5	27,76	30,38	9,44	36,53	31,59	20,65	-25,61	21,94	-20,97
P10	26,46	30,19	14,10	35,51	34,20	20,29	-23,32	20,28	-23,36
P20	24,74	28,37	14,67	32,31	30,60	17,56	-29,02	17,52	-29,18

Şekil 4.13 ve Çizelge 4.5'te görüldüğü üzere, CEM II 32.5 çimentosu ile üretilen tüm beton numunelerin basınç dayanımı, 100°C ve 150°C sıcaklıklarına maruz bırakıldıklarında artış göstermiştir. Bu artış, 100°C sıcaklıkta normal beton numunesi (N) için %11 olarak ölçülmüş; P1, P3, P5, P10 ve P20 karışımları için ise sırasıyla %12,41, %16,58, %9,44, %14,19 ve %14,67 olarak kaydedilmiştir. 100°C'de en yüksek basınç dayanımı artışı P3 numunesinde gözlemlenmiştir. 150°C sıcaklıkta ise tüm numunelerde basınç dayanımındaki artış %30'un üzerine çıkmıştır. Bu sıcaklıkta, N numunesinde %33,56; P3 numunesinde %36,94 ve P10 numunesinde %34,20 oranında artış elde edilmiştir. Ancak, 200°C'ye maruz bırakılan beton numunelerinde, P3 ve P20 dışındaki tüm numunelerde yaklaşık %25 oranında basınç dayanımı kaybı yaşanmıştır. P3 ve P20 numunelerinde ise bu azalma sırasıyla %28 ve %29 seviyelerine ulaşmıştır.

Beton numuneleri 300°C'ye maruz bırakıldığında, basınç dayanımında %18 ile %30 arasında değişen oranlarda azalma gözlemlenmiştir. Daha ayrıntılı olarak, N, P1, P3, P5, P10 ve P20 numunelerindeki basınç dayanımı kayıpları sırasıyla %24,81, %18,17, %22,19, %20,97, %23,36 ve %29,18 olarak belirlenmiştir. En yüksek düşüş, en fazla PET içeriğine sahip olan P20 numunesinde gözlenmiştir. Sonuç olarak, 100°C ve 150°C sıcaklıklara maruz bırakılan beton numunelerinde basınç dayanımında anlamlı bir artış olduğu görülmüştür. Ayrıca, 100°C ve 150°C gibi yüksek sıcaklıklarda beton içerisindeki PET içeriğinin basınç dayanımı üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Bu durum PET katkısız ve en yüksek PET içerikli beton numunelerinin 100°C ve 150°C'deki basınç dayanımları arasındaki farka bakılarak daha net anlaşılmaktadır. 100°C'de normal beton (N) ile P20 numunesi arasındaki basınç dayanımı artış farkı %3,66 iken 150°C'de ise bu fark sadece %2,96 olarak görülmektedir.



Şekil 4.14. Farklı sıcaklık seviyelerine maruz bırakılan CEM II 42.5 çimentolu numunelerin basınç dayanımı değerlerindeki değişim

Çizelge 4.6. CEM II 42.5 çimentolu PET katkılı ve katkısız beton numunelerinin, farklı sıcaklık seviyelerine maruz kaldıktan sonra basınç dayanımları ve referans dayanımına göre değişim yüzdeleri

Karışım	CEM II 42.5									
	Normal şartlarda	Sıcaklık (100 °C)	Değişim (%)	Sıcaklık (150 °C)	Değişim (%)	Sıcaklık (200 °C)	Değişim (%)	Sıcaklık (300 °C)	Değişim (%)	
N	38,52	30,82	-19,99	35,93	-6,72	33,05	-14,20	35,71	-7,29	
P1	39,76	32,49	-18,28	36,18	-9,00	37,12	-6,64	36,11	-9,18	
P3	39,38	28,12	-28,59	36,64	-6,96	37,43	-4,95	34,19	-13,18	
P5	37,96	32,26	-15,02	35,97	-5,24	36,31	-4,35	36,25	-4,50	
P10	38,28	31,23	-18,42	35,08	-8,36	33,51	-12,46	33,31	-12,98	
P20	33,65	28,11	-16,46	33,66	0,03	28,45	-15,45	24,29	-27,82	

CEM II 42.5 çimentosu kullanılarak üretilen normal ve farklı oranlarda PET içeren beton numunelerin, 100°C, 150°C, 200°C ve 300°C sıcaklıklara maruz bırakılmalarının ardından elde edilen basınç dayanımı değerleri Şekil 4.14 ve Çizelge 4.6'da sunulmuştur. Gözlemlendiği üzere, tüm sıcaklık seviyelerinde numunelerin basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir. Bu azalma, özellikle 100°C'ye maruz bırakılan numunelerde daha belirgin olmuştur. Daha ayrıntılı olarak, N, P1, P3, P5, P10 ve P20 numunelerinde basınç dayanımı azalma oranları sırasıyla %20, %18,28, %28,59, %15, %18,42 ve %16,46 olarak belirlenmiştir. Aynı numuneler 150°C'ye maruz bırakıldığında ise bu oranlar sırasıyla %6,72, %9, %6,96, %5,24, %8,36 ve %0,03 olarak ölçülmüştür. Diğer iki sıcaklık düzeyi olan 200°C ve 300°C'de, P20 haricindeki tüm numunelerde basınç dayanımı kaybı %5 ile %14 arasında değişmiştir. P20 numunesinde ise bu oranlar 200°C'de %15,45 ve 300°C'de %27,82 olarak elde edilmiştir. Bu bağlamda, CEM II 32.5 çimentosu ile üretilen numunelerde olduğu gibi, CEM II 42.5 çimentosu ile üretilen normal ve farklı PET içeriğine sahip beton numunelerin 100°C, 150°C veya 200°C'ye maruz kalmaları durumunda basınç dayanımı kayıplarının PET içeriğinden önemli ölçüde etkilenmediği söylenebilir. Ancak 300°C'de, beton içerisindeki yüksek PET içeriğinin (örneğin P20 numunesi) basınç dayanımı kaybı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Genel olarak, CEM II 32.5 ve CEM II 42.5 çimentoları kullanılarak üretilen normal ve PET katkılı beton numunelerinin farklı sıcaklık seviyelerine maruz kaldıktan sonraki basınç dayanımları incelendiğinde; CEM II 32.5 ile üretilen tüm beton numunelerde 100°C ve 150°C'de basınç dayanımında bir artış olduğu ve bu artışın iyileşme olarak değerlendirilebileceği gözlemlenmiştir. Özellikle 150°C'de tüm numunelerde %30'un üzerinde bir artış kaydedilmiştir. 200°C ve 300°C sıcaklıklarda ise tüm numunelerde %20 ile %30 arasında basınç dayanımı azalması meydana gelmiştir. CEM II 42.5 çimentosu ile üretilen numunelerde ise normal ve PET katkılı tüm betonlarda tüm sıcaklık düzeylerinde basınç dayanımı azalmış, ancak bu azalma oranları CEM II 32.5 ile üretilen numunelerdeki kadar yüksek olmamıştır (300°C'de P20 numunesindeki basınç dayanımı azalma oranı hariç).

Özellikle betonun sıcaklık etkisine bağlı özelliklerini anlamak için, CEM II 32.5 ve CEM II 42.5 çimentolarını oluşturan bileşenlerin detaylı incelenmesi gerekmektedir. CEM II 32.5 çimentosu %65-79 oranında klinker ve %21-35 oranında doğal puzolandan (volkanik tüf) oluşmaktadır. CEM II 42.5 çimentosu ise %80-94 klinker ve %6-20 doğal puzolandan meydana gelir. Klinkerde bulunan alit ve belit (sırasıyla C₃S ve C₂S), su ile

reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve portlandit (Ca(OH)_2) oluşturur (Khoury, 1992). Ayrıca, çimentodaki alüminyum bileşenleri (C_3A veya $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$), kalsiyum sülfat (CaSO_4) ve su ile reaksiyona girerek kalsiyum trisülfaloalüminat hidrat ya da sülfat ettringit (Aft, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}$) oluşturur (Bensted, 2002; Gartner vd., 2002). Sonraki aşamada, ettringit çevrede bulunan hidroalüminatlar varlığında kalsiyum monosülfaloalüminat hidrat ($\text{Ca}_4\text{Al}_2(\text{SO}_4)(\text{OH})_{12}$) ya da monosülfat ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{SO}_4)$) formuna dönüşür. Alit ve belit, klinkerin en yüksek dayanımlı mineralleridir ve kısa vadeli dayanımları diğer bileşenlere göre önemli ölçüde yüksektir (Odler, 1991). Daha açık olarak, alit ve belitin su ile reaksiyonu sonucunda oluşan C-S-H bağları yüksek dayanımın temel sebebidir. Bu nedenle, alit ve belitin su ile reaksiyonundan oluşan diğer bir ürün olan portlanditin aşırı miktarda bulunması istenmeyen bir durumdur (Hou vd., 2007).

Silika dumanı, cüruf ve öğütülmüş tuğla (homra) gibi puzolanik malzemelerin, çimento hamurunun mikro yapısını güçlendirmiş olup, çimento hamuru matrisini sıkılaştırarak ve ara yüzey bölgesini iyileştirerek dayanımı artırdığı gösterilmiştir (Heikal, 2000; Hossain, 2006). Doğal puzolan tarafından serbest Ca(OH)_2 'nin tüketilmesiyle oluşan C-S-H fazları gibi hidratlar, gözenekli beton bileşenlerinin içinde ve çevresinde birikir. Bu durum, betonun mikro yapısının daha sıkı ve yoğun bir hâle gelmesini sağlar ve böylece genel özelliklerinin iyileşmesine katkıda bulunur.

Sıcaklık 100°C 'yi aştığında, dehidrasyon başlar. Bu da serbest suyun salınması ve hidratların parçalanması anlamına gelir. 200°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise kimyasal bağlanmış su da açığa çıkar (Válek vd., 2016). $70-100^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında belli bir süreye maruz kalan çimento numunesinde ettringit dönüşümü gözlenirken, $80-100^\circ\text{C}$ arasında monosülfat, alüminat sülfat (C_3AH_6) formuna dönüşür (Famy vd., 2002). C_3AH_6 bileşeni, $200-300^\circ\text{C}$ 'ye kadar termodinamik yapısını korur (Phrompet vd., 2018; Phrompet vd., 2019). $300-400^\circ\text{C}$ 'nin üzerinde ise dehidrasyon C-S-H bileşenlerinin zayıflamasına yol açarak belirgin bir dayanım kaybına sebep olur. Ayrıca, $500-800^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında portlandit yapısı bozulur ve kristalin alit ile belit formuna dönüşür (Tantawy, 2017). Katı matrisin gözenek ağında suyun hareketinin kısıtlı olması nedeniyle, C-S-H, Aft/AFm ve portlanditin dehidrasyonu ile uzaklaştırılan su buharı olarak matris içinde tutulabilir. Bu durumda basınçlar yüksek seviyelere ulaşır ve çatlakların oluşması ile yüzeyde pul pul dökülmeler meydana gelir (Donatello vd., 2013).

Fehérvári (2022) tarafından yürütülen bir çalışmada, farklı w/c oranları kullanılarak üç farklı çimento türü ile üretilen beton numuneleri 50°C ile 900°C

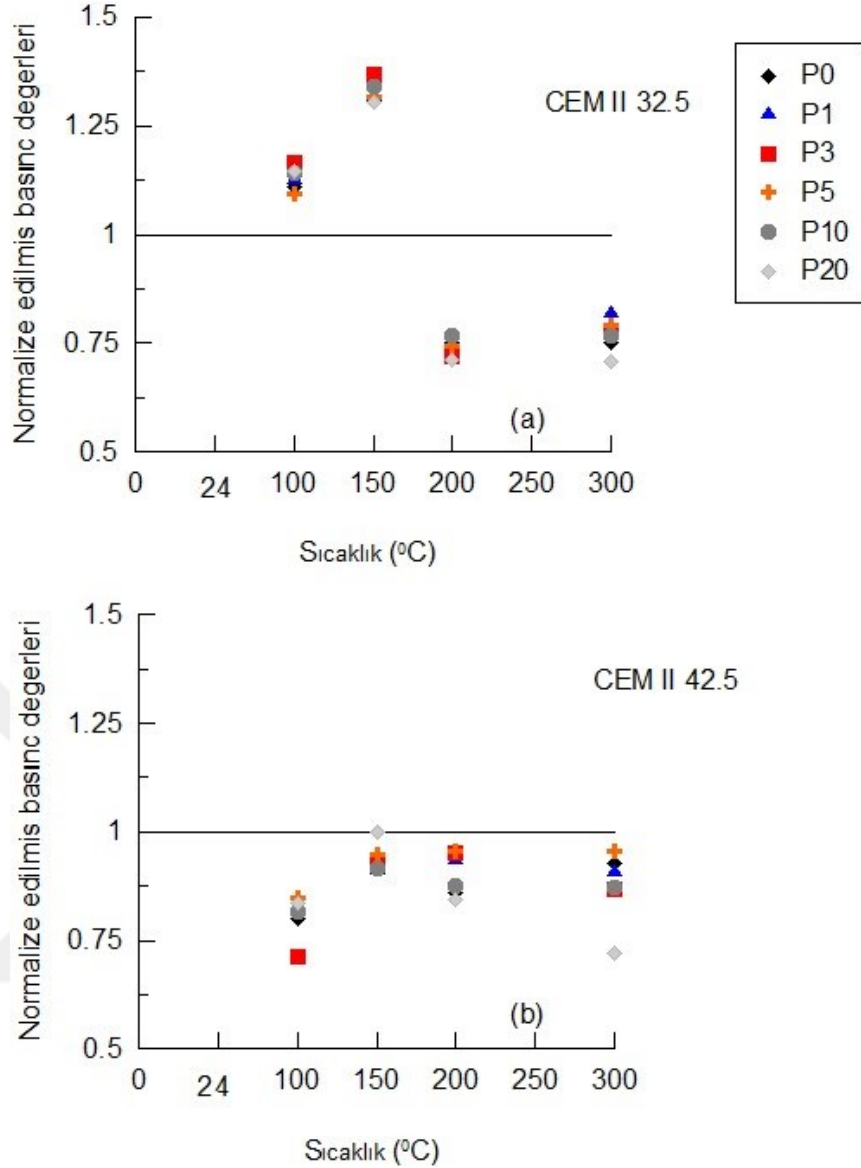
arasındaki sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Çeşitli w/c oranlarında (örneğin 0,24; 0,462 ve 0,545) 50°C'de basınç dayanımında azalma gözlemlenirken, diğer w/c oranlarında artış kaydedilmiştir. 100°C'de tüm beton karışımlarının basınç dayanımı azalmış, ancak 200°C'ye kadar artış göstermiştir. 200°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise dayanım değerlerinde belirgin bir düşüş meydana gelmiştir. Válek vd. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı çimento türleri ve w/c oranları kullanılarak üretilen beton numuneleri 200°C, 400°C, 660°C ve 800°C sıcaklıklarına maruz bırakılmıştır. Kullanılan çimento türüne bağlı olarak değişmekle birlikte, 200°C'de 0,5 w/c oranına sahip numunelerde basınç dayanımında artış görülürken, daha yüksek sıcaklıklarda azalma olmuştur. Buna karşılık, 0,33 w/c oranına sahip tüm beton numunelerinde tüm sıcaklıklarda basınç dayanımı azalmıştır. Donatello vd. (2014) tarafından yapılan bir çalışmada ise, yüksek uçucu kül içeren çimento ve CEM II/A-M portland çimentosu kullanılarak üretilen beton numuneleri 200°C, 400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C sıcaklıklarına maruz bırakılmıştır. Yüksek uçucu kül içeren beton numunelerinin basınç dayanımı 600°C'ye kadar önemli bir değişim göstermemiş, oysa CEM II esaslı beton numunelerinde sıcaklık arttıkça dayanımında kademeli bir azalma gözlenmiştir. Lubl6y vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada, farklı çimento türleri kullanılarak üretilen beton numuneleri 50°C ile 800°C arasında değişen sıcaklıklara maruz bırakılmış ve tüm beton numunelerinde tüm sıcaklıklarda basınç dayanımında azalma görülmüştür. Son olarak da Silva vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, normal dayanımlı beton numunelerinin 150°C'de dayanımlarında artış gösterdiği, ancak daha yüksek sıcaklıklarda dayanımın önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmalar değerlendirildiğinde, beton numunelerinin yüksek sıcaklıklardaki basınç dayanımının klinker içeriği, puzolan miktarı ve w/c oranından etkilendiği sonucuna varılmıştır. Özellikle 300°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda puzolan içeriği, Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek ortamda C-S-H bileşiğinin artmasını sağlar ve böylece betonun dayanımını olumlu yönde etkilemiştir. 300°C'ye kadar beton dayanımında belirgin bir azalma beklenmemektedir. Hatta, 100-150°C sıcaklık aralığında buharlaşan suyun C-S-H fazlarının güçlenmesine katkıda bulunarak dayanım artışına yol açtığı söylenebilir (Donatello vd., 2013; Khoury, 1992; Skv6rave Sevc6k, 1999). Bu çalışmada da, CEM II 32.5 ile üretilen numunelerin basınç dayanımının 100°C ve 150°C'de arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, normal numunelerde 300°C'de maksimum %24 oranında dayanım kaybı tespit edilmiştir.

Bu değerlendirmeler ışığında, farklı imento türleri içeren beton numunelerin basınç dayanımlarında aynı sıcaklık seviyesinde bir imento türü artış eğilimi gösterirken, diğer türlerde azalma eğilimi gözlenebilir. Buna alternatif olarak, tüm numuneler eř zamanlı olarak artış veya azalma sergilese bile, değişim oranları kullanılan imento türüne bağlı olarak farklılık gösterebilir. Bu bulgular, Fehrvri (2022) tarafından yapılan çalışmada elde edilen sonuçlarla uyumludur. Fehrvri (2022), CEM I 32.5, CEM I 42.5 ve CEM I 52.5 olmak üzere üç farklı imento türü ve dokuz farklı w/c oranı kullanarak beton numuneleri üretmiştir. Bu numunelerin farklı sıcaklık seviyelerine maruz bırakıldıktan sonraki basınç dayanımlarını ölçmüştür. Sonuç olarak, basınç dayanımının hem kullanılan imento türüne hem de uygulanan sıcaklığa bağlı olarak artış ya da azalma gösterdiği belirtilmiştir.

4.1.8 Normalize edilmiş sıcaklık değerleri

şekil 4.15(a) farklı sıcaklıklara maruz kalmış CEM II 32.5 imentosu ile hazırlanan beton numunelerinden elde edilen basınç dayanımı sonuçlarının, normal şartlardaki beton numunelerin sonuçlarına göre normalize edilmiş halini göstermektedir. CEM II 32.5 ile üretilmiş bütün beton numunelerin basınç dayanımı, 100°C ve 150°C'lik sıcaklık seviyelerinde artış göstermiştir. Bunun aksine 200°C ve 300°C sıcaklıklarında ise azalma gözlenmiştir. Benzer şekilde, şekil 4.15(b)'de farklı sıcaklıklara maruz kalmış CEM II 42.5 imentosu ile üretilmiş, PET içermeyen ve farklı oranlarda PET ilave edilmiş numunelere ait normalize edilmiş basınç dayanımı değerleri sunulmuştur. Tüm sıcaklık değerlerinde CEM II 42.5 imento tipiyle hazırlan beton numunelerin basınç dayanımı değerlerinde düşüş olduğu gözlenmiştir.



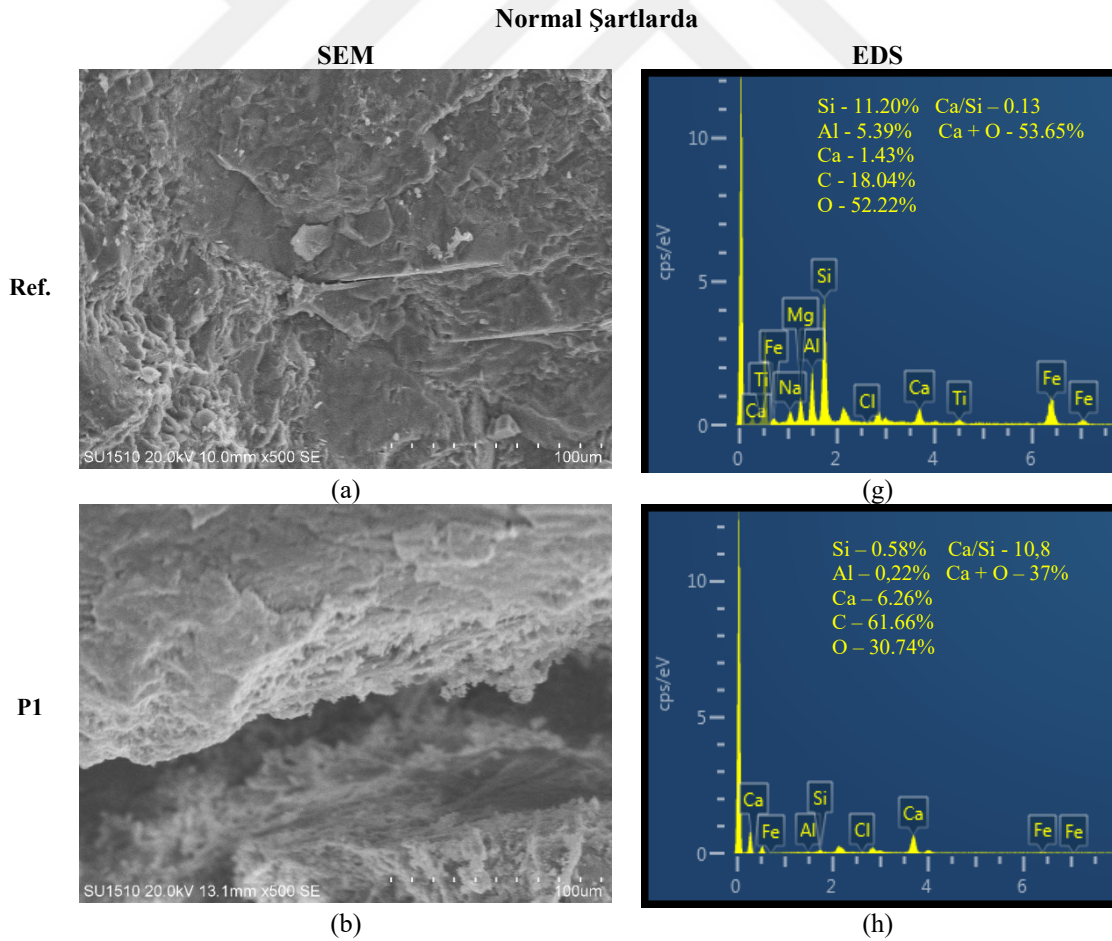
Şekil 4.15. (a) CEM II 32.5 ve (b) CEM II 42.5 çimentosu ile elde edilen numunelerin farklı sıcaklık seviyelerinde gösterdiği basınç değerlerinin, normal şartlardaki beton numunelerinin sonuçlarına göre normalize edilmiş durumu

4.1.9 Mikroyapısal analiz sonuçları (SEM ve EDS)

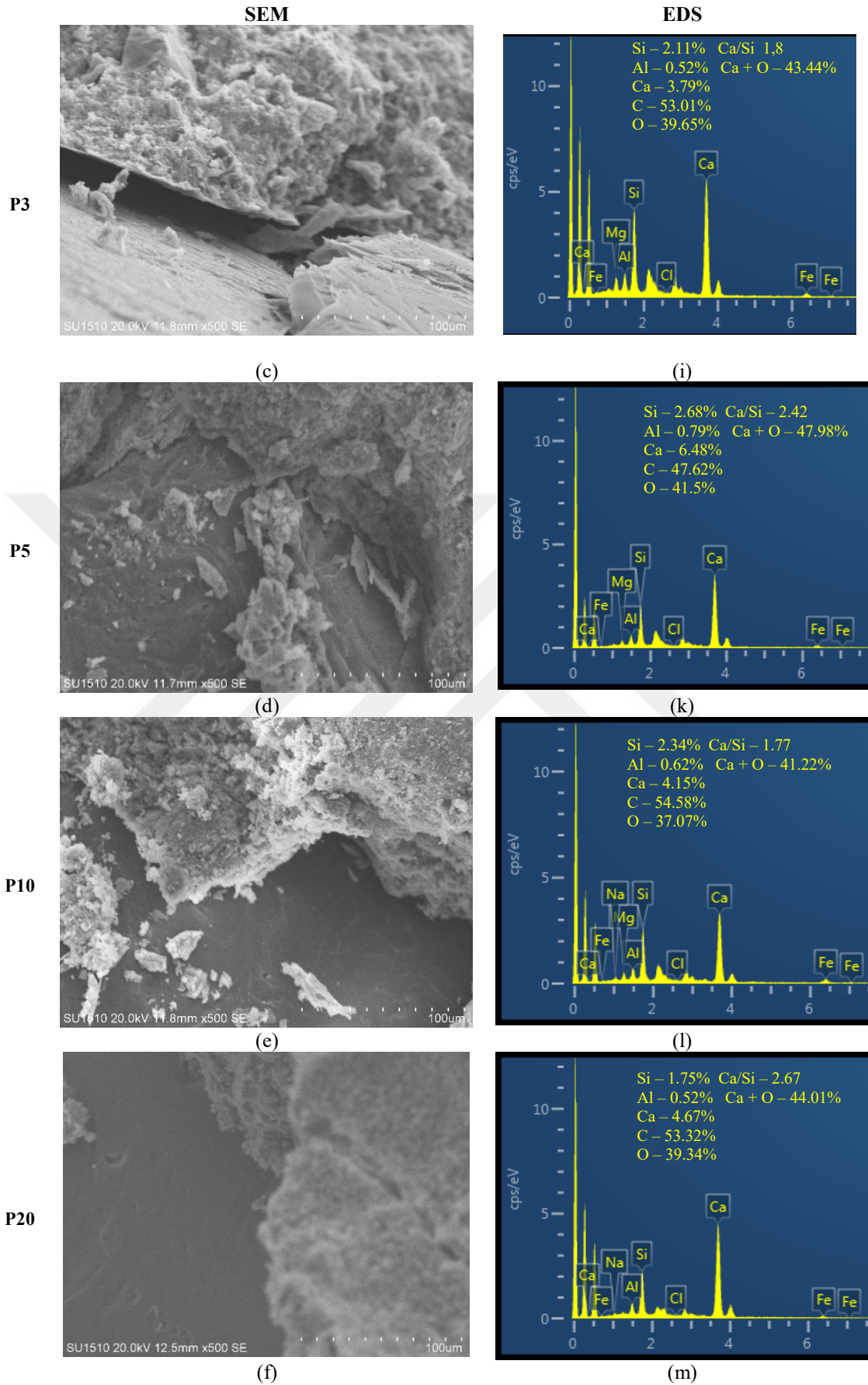
Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri, referans ve PET ile modifiye edilmiş numunelerin mikroyapısını incelemek ve PET'in betonun iç yapısı üzerindeki etkisini değerlendirmek için yapılmıştır. Ayrıca, numunelerin element yapılarını veya kimyasal özelliklerini belirlemek için Enerji Dağılımlı Spektroskopi (EDS) analizi yöntemi kullanılmıştır. 28 günlük kütleme ardından, seçilen numuneler üzerinde standart koşullar altında ve donma-çözülme döngüleri sonrasında SEM analizleri yapılmıştır. Elde edilen mikroyapısal görüntüler referans, P1, P3, P5, P10 ve P20 beton karışımları için sırasıyla normal koşullarda ve donma-çözülme döngülerinden sonra Şekil 4.16(a-f) ve

Şekil 4.16(a-f)'de sunulmuştur. Aynı beton karışımları için EDS sonuçları da Şekil 4.16(g-m) ve Şekil 4.17 (g-m)'de sırasıyla normal koşullarda ve donma-çözülme döngülerinden sonra sunulmuştur.

SEM analizlerinden, beton numunelerinin mikroyapılarının PET katılım miktarına göre değiştiği açıkça görülmektedir. PET içermeyen referans beton karışımı, çimento bağlayıcı hamurun mukavemetinden sorumlu bal peteği benzeri morfolojiye sahip iyi yapılandırılmış kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jeli sergilemektedir (Yan vd., 2023). Beton karışımlarına PET eklendiğinde, C-S-H jelinin gelişimi küçüldüğü düşünülmektedir. Özellikle, P10 ve P20 karışımlarının SEM analizleri, bu karışımların basınç dayanımları referans betondan daha düşük olduğu için nispeten daha az C-S-H jeli içerdiği gözlenmiştir. Karışımlar donma ve çözülmeye maruz kaldığında, C-S-H bağları azaldığından referans beton numunesi mikroyapılarını koruyamamıştır. Buna karşılık, beton karışımına ne kadar çok PET dahil edilirse, karışımın donma çözülmeye karşı orijinal yapılarını koruma olasılığı o kadar arttığı elde edilen sonuçlara göre söylenebilir.



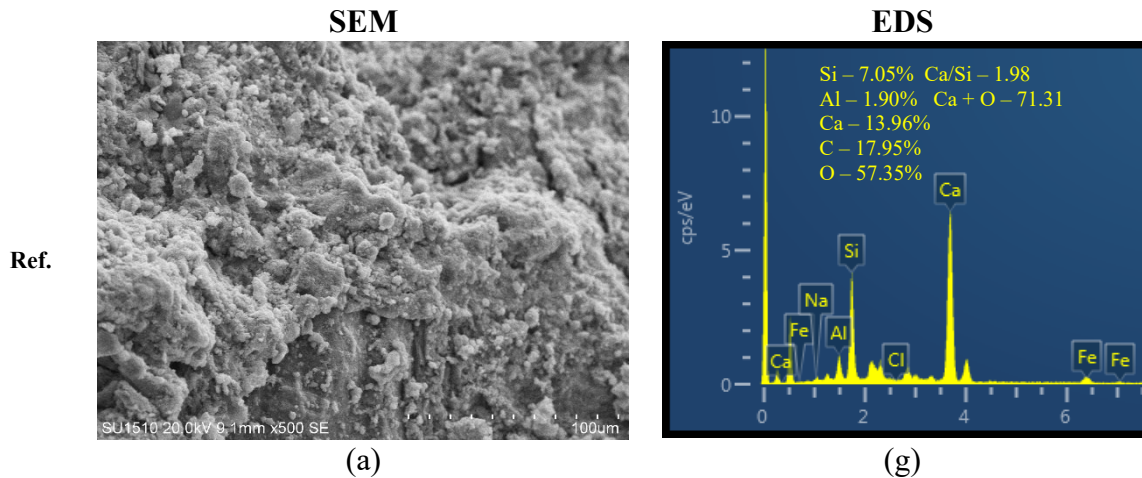
Şekil 4.16. Normal şartlarda PET katılı ve katısız karışımlar için SEM ve EDS analiz sonuçları



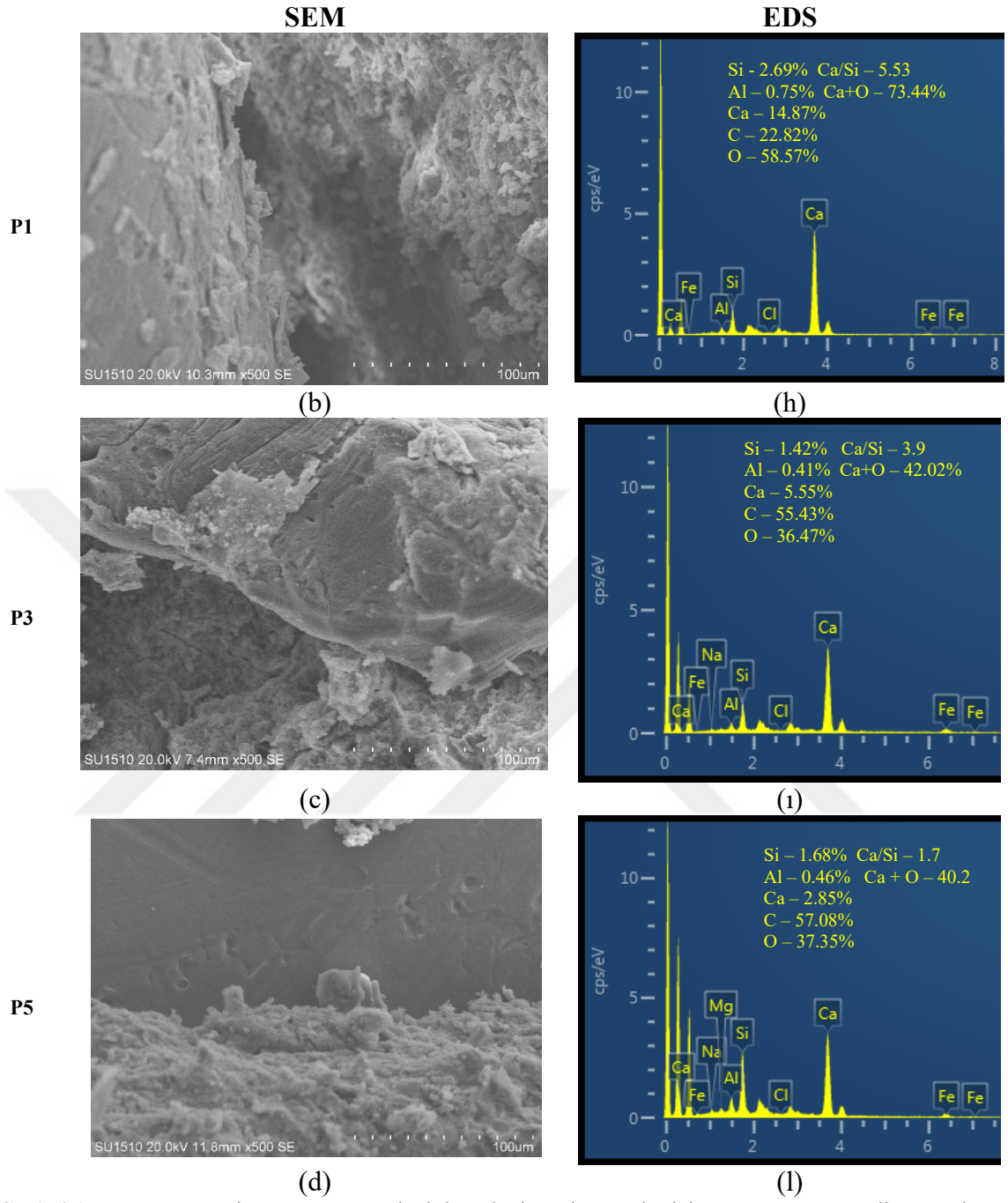
Şekil 4.16. Normal şartlarda PET katlı ve katkısız karışımlar için SEM ve EDS analiz sonuçları

Karışımlar için matris elemanları enerji dağılımlı spektroskopi kullanılarak tanımlanmıştır. Ca/Si oranları da belirlenmiştir. Normal kürlenmiş beton karışımlarında, PET içeriği arttıkça Ca ve Si miktarları azalmaktadır. Aksine, Sua-iam ve Jamnam (2023) çalışmasında da gözlemlendiği gibi, Ca/Si oranları daha fazla PET ilavesiyle artmakta ve betonun basınç dayanımında azalmaya neden olmaktadır. Ayrıca, normal şartlardaki beton karışımlarındaki PET içeriğinin artmasına paralel olarak Karbon (C) elementi miktarı da artmaktadır. Örneğin, referans betonda C içeriği yaklaşık %18,04 iken, P1, P3, P5, P10 ve P20 karışımlarında C içeriği yaklaşık olarak %47 ile %61 değer aralığında ölçülmüştür. Oksijen(O) elementi yüzdesi ise referans betonunda %52 civarında iken, PET ilaveli karışımlarda yaklaşık olarak %30 ile %41,5 aralığında elde edilmiştir. Benzer şekilde, donma-çözülme koşuluna maruz kalan tüm beton karışımlarındaki C ve O elementleri benzer oranlarda kalmaktadır. Buna karşılık, referans betondaki Ca elementi miktarı önemli ölçüde artarken Si elementi azalmış, bu da Ca/Si oranının 0,13'ten 1,98'e yükselmesine ve dolayısıyla basınç dayanımı kayıplarına yol açmıştır. Diğer karışımlar için de bu oran yükselme eğilimindedir ancak referans betonla karşılaştırıldığında nispeten önemsizdir. Sonuç olarak, P1, P3, P5, P10 ve P20 beton karışımlarındaki dayanım kayıpları referans betondan daha az olmuştur. Bu nedenle, PET'in donma-çözülme döngülerine maruz kalan beton karışımlarına dahil edilmesinin, betonun orijinal mikro yapısını korumasına yardımcı olduğu ve sonuçları en aza indirdiği şeklinde yorumlanabilir.

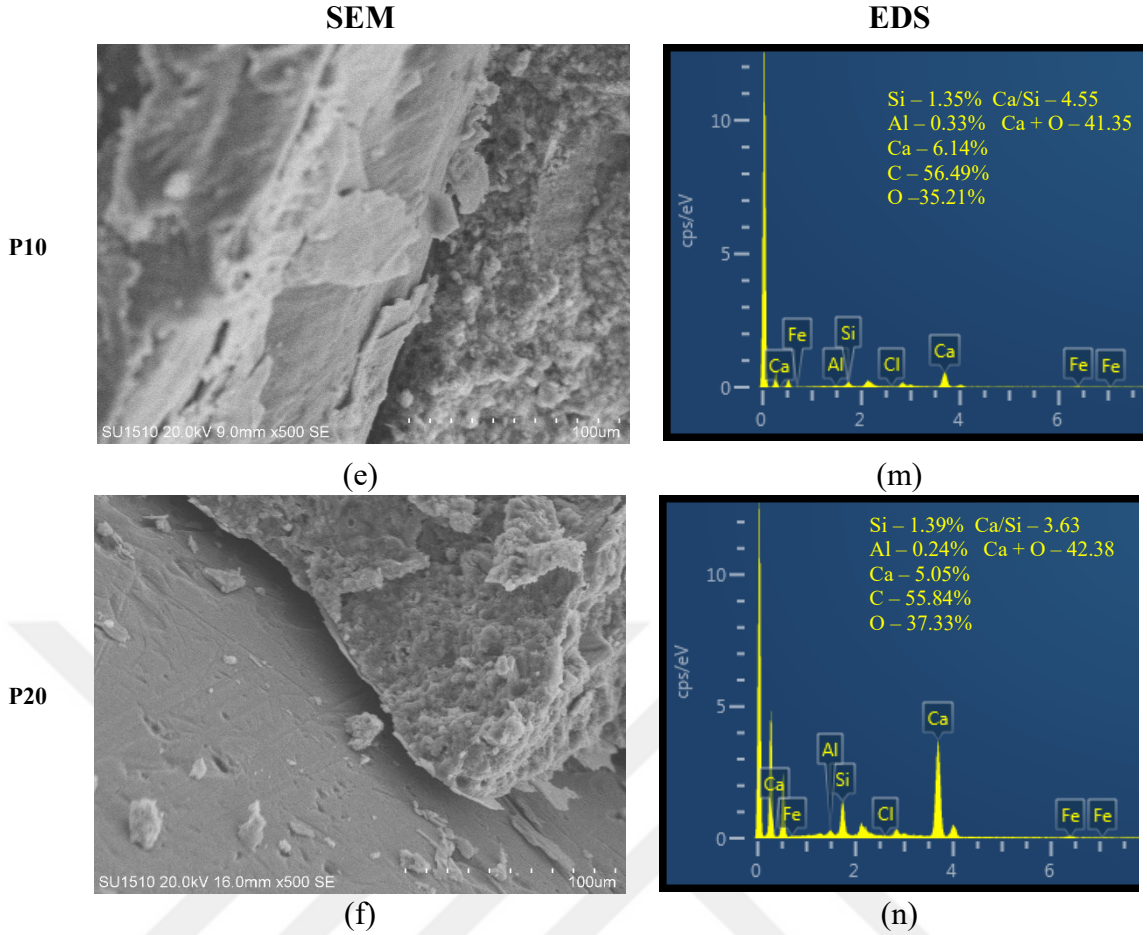
Donma-Çözülme Döngüleri Sonrası



Şekil 4.17. Donma çözülme sonrası PET katkılı ve katkısız karışımlar için SEM ve EDS analiz sonuçları



Şekil 4.17. Donma çözülme sonrası PET katkılı ve katkısız karışımlar için SEM ve EDS analiz sonuçları



Şekil 4.17. Donma çözülme sonrası PET katkılı ve katkısız karışımlar için SEM ve EDS analiz sonuçları

4.2 Betonarme Kiriş Deney Sonuçları

4.2.1 Beton karışımı çökme deneyi sonuçları

Beton karışımlarındaki polietilen tereftalat (PET) miktarının işlenebilirlik üzerindeki etkisini gösteren çökme ve akma değerleri Çizelge 4.7'de sunulmuştur. Referans (P0) beton karışımı 18 cm çökme ve 28 cm akma değerine sahiptir. Beton karışımındaki PET miktarı arttıkça bu değerler kademeli olarak azalmıştır. Örneğin, P1 ve P3 beton karışımlarında çökme değerleri sırasıyla 15 cm ve 12 cm'ye düşerken, akma değerleri 27 cm ve 24 cm'ye gerilemiştir. P5 ve P10 beton karışımları için çökme ve akma değerleri sırasıyla yaklaşık 13 cm ve 24 cm'de sabit kalmıştır. Bununla birlikte, beton karışımına %20 PET eklendiğinde, çökme değeri önemli ölçüde 3,5 cm'ye düşmüş ve akma 22 cm'ye eşit olmuştur. Bu sonuçlar, PET ilavesinin betonun işlenebilirliğini büyük ölçüde azalttığını göstermektedir.

Çizelge 4.7. Referans ve PET ile Modifiye Edilmiş Betonun Çökme ve Akma Sonuçları

Karışım	Çökme (cm)	Akma (cm)
P0 (referans)	18	28
P1	15	27
P3	12	24
P5	13	24
P10	13	25
P20	3.5	22

4.2.2 Beton karışımının mekanik özellikleri

Referans betonun (P0) ve %1, %3, %5, %10 ve %20 polietilen tereftalat (PET) içeren beton numunelerin basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı (STS) ve eğilme dayanımı Çizelge 4.8'de sunulmaktadır. Çizelgede ayrıca referans beton sonuçlarına kıyasla bu dayanımlardaki yüzdelerdeki artış da gösterilmektedir. Referans (P0) betonun 28 günlük basınç dayanımı 15,1 MPa'ya eşitken, P1 ve P3 beton numuneleri basınç dayanımları sırasıyla 13,68 MPa ve 13,58 MPa olmuştur. Referans betonla karşılaştırıldığında, P3 betonunun basınç dayanımı yaklaşık %10'luk bir düşüş göstermiştir. Basınç dayanımı 14,89 MPa olan P5 betonu için dayanım düşüşü yaklaşık %1,4 olarak hesaplanmıştır. P10 ve P20 beton numuneleri için basınç dayanımı değerleri sırasıyla 13,25 MPa ve 12,40 MPa olarak elde edilmiştir. Basınç dayanımındaki en büyük düşüş P20 betonunda gözlenmiş ve bu düşüş yaklaşık %18 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.8. Betonun mekanik özellikleri

Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)	Artış Oranı (%)	Yarmada Çekme Dayanımı		Eğilme Dayanımı	
			(MPa)	Artış Oranı (%)	(MPa)	Artış Oranı (%)
P0(Referans)	15,10	0,00	2,16	0,00	3,34	0,00
P1	13,68	-9,39	2,41	11,66	3,81	14,06
P3	13,58	-10,04	2,39	10,73	3,83	14,56
P5	14,89	-1,40	2,13	-1,56	3,34	-0,10
P10	13,25	-12,23	2,43	12,60	3,60	7,68
P20	12,40	-17,88	2,15	-0,37	2,31	-31,01

Sonuç olarak, beton karışımına eklenen PET'in hacimsel oranı arttıkça referans betonun basınç dayanımı önemli ölçüde azalmıştır.

Çizelge 4.8'de 28 günlük yarmada çekme dayanımı değerleri de yer almaktadır. Referans betonun (P0) STS değeri 2,16 MPa olarak ölçülmüştür. %1 PET eklendiğinde, STS değeri yaklaşık %12 artarak 2,41 MPa'ya yükselmiştir. Bu artışı, yaklaşık %11'lik bir iyileşme gösteren P3 beton karışımı izlemiştir. P3 betonunun STS değeri 2,39 MPa olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, %5 PET içeren karışımın STS sonucu referans beton karışımına kıyasla %1,56 oranında düşerek 2,13 MPa dayanıma ulaşmıştır. P10 beton karışımında STS değeri yaklaşık %13 artarak 2,43 MPa'ya ulaşmıştır. Ancak, P20 beton karışımı STS değeri düşüş göstermiş ve 2,15 MPa olarak ölçülmüştür. Buna göre, PET ile modifiye edilmiş betonların sonuçları incelendiğinde, P1, P3 ve P10 betonlarının STS'leri referans betonun STS'sini aşarak daha yüksek dayanım elde etmiştir. Referans betona kıyasla P5 ve P20 numuneri değerlerinde hafif bir düşüş gözlenmiştir. Dolayısıyla, beton karışımlarına PET ilavesi yarmada çekme dayanımını önemli ölçüde etkilememiştir.

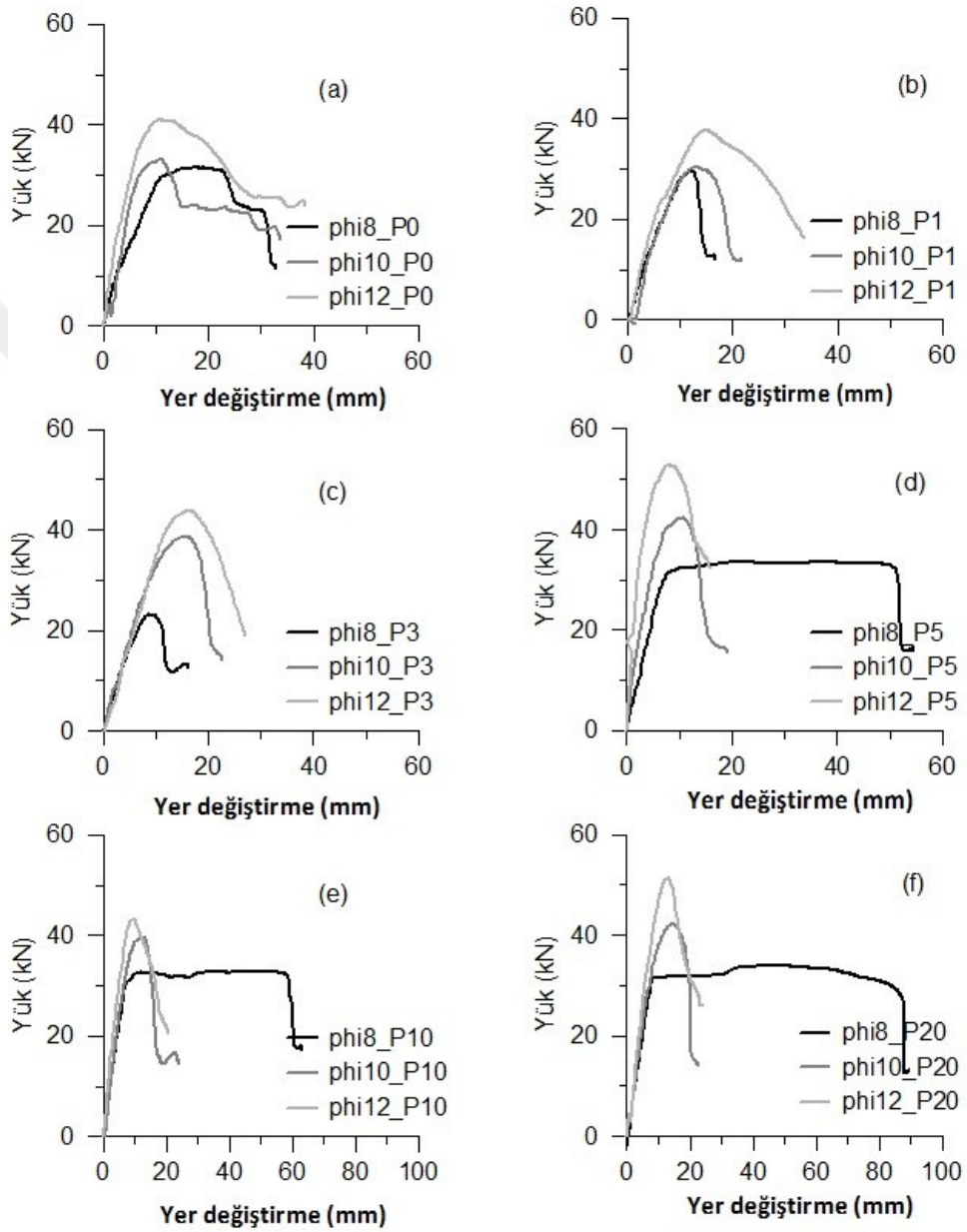
Beton numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları Çizelge 4.8'de verilmiştir. Referans betonun eğilme dayanımı 3,34 MPa olarak belirlenmiştir. P1 ve P3 beton numunelerinin eğilme dayanımları sırasıyla 3,81 MPa ve 3,83 MPa olarak elde edilmiş ve referans betona kıyasla eğilme dayanımında yaklaşık %14'lük bir artış gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, P5 betonunun eğilme dayanımı incelendiğinde, referans betonunki ile aynı olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, P10 beton karışımının eğilme dayanımı yaklaşık %8'lik bir artış kaydederek 3,60 MPa'ya ulaşmıştır. P20 karışımı eğilme dayanımında önemli bir dayanım kaybı gözlenmiştir ve %31'lik bir azalma ile 2,31 MPa'ya düşmüştür. Özetle, P3 beton karışımına kadar eğilme dayanımında kısmi bir artış gözlemlense de, daha yüksek oranlarda PET ilavesi dayanımda bir düşüşe neden olmuştur.

4.2.3 Betonarme kiriş test sonuçları

4.2.3.1 Çekme çubuğu çapının betonarme kirişlerin davranışı üzerinde etkisi

Çekme çubuğu çaplarının kirişlerin yük taşıma kapasitesine etkisini belirlemek için 8 mm, 10 mm ve 12 mm çapında çekme çubukları kullanılmıştır. Etriyeler için 8 mm çapı seçilmiş ve aralıkları 10 cm'de sabit tutulmuştur. Referans (P0) ve PET ile modifiye edilmiş beton karışımlarına (P1, P3, P5, P10, P20) sahip betonarme kirişler dört noktalı yükleme düzeneği kullanılarak ayrı ayrı test edilmiştir. Toplamda 18 betonarme kiriş

numunesi test edilmiştir. Kırılma yüklerine kadar elde edilen yük-deplasman eğrileri Şekil 4.18'de sunulmuştur. Ayrıca Çizelge 4.9'da akma noktalarındaki yük ve yer değiştirme değerleri, maksimum yükler ve bunlara karşılık gelen yer değiştirmeler, süneklik katsayıları, nihai yer değiştirme değeri (Pmax'ın %80'inde ölçülen) ve göçme anındaki yer değiştirmeler ayrıntılı olarak sunulmaktadır.



Şekil 4.18. 8 mm, 10 mm ve 12 mm çapında çekme donatısı ile 10 cm sabit etriye aralığına sahip, referans ve PET katkılı betonarme kiriş numunelerine ait yük-deplasman eğrileri

Çizelge 4.9. Referans ve PET katkılı olarak üretilen, 10 cm aralıklı 8 mm çapında etriyeli ve farklı çapta çekme donatılı betonarme kiriş numuneleri test sonuçları

	Akma anındaki yerdeğiştirme	Akma anındaki kuvvet	Akma rijitliği	Maksimum kuvveteeki yerdeğiştirme	Maksimum kuvvet	Maximum yük rijitliği	Dayanımın tamamını kaybetmeden önceki yer değiştirme	Süneklik katsayısı	Göçme durumundaki yerdeğiştirme
Çekme Donatısı ve PET oranı	δ_y (mm)	P_y (kN)	S_y (kN/mm)	$\delta_{P_{max}}$ (mm)	P_{max} (kN)	$S_{P_{max}}$ (kN/mm)	δ_u (mm)	η (δ_u/δ_y)	δ_f (mm)
Phi8_P0	9,49	26,76	2,82	17,32	31,48	1,82	24,44	2,58	32,94
Phi10_P0	6,20	28,15	4,54	10,92	33,11	3,03	13,60	2,19	33,59
Phi12_P0	6,53	34,85	5,34	10,60	41,00	3,87	20,86	3,19	38,33
Phi8_P1	8,80	25,19	2,86	12,25	29,64	2,42	13,52	1,54	16,77
Phi10_P1	9,00	25,85	2,87	13,04	30,41	2,33	17,40	1,93	21,84
Phi12_P1	10,65	32,05	3,01	14,93	37,70	2,53	23,00	2,16	33,26
Phi8_P3	6,45	19,65	3,05	8,57	23,12	2,70	11,27	1,75	16,26
Phi10_P3	10,12	32,84	3,25	15,53	38,64	2,49	18,60	1,84	22,76
Phi12_P3	10,85	37,12	3,42	16,17	43,67	2,70	21,10	1,94	27,00
Phi8_P5	6,44	28,48	4,42	20,09	33,50	1,67	51,80	8,04	54,54
Phi10_P5	5,95	35,92	6,04	10,60	42,26	3,99	13,20	2,22	19,21
Phi12_P5	4,40	44,81	10,18	7,88	52,71	6,69	11,87	2,70	15,80
Phi8_P10	6,10	27,83	4,56	51,14	32,74	0,64	59,30	9,72	62,93
Phi10_P10	7,55	33,58	4,45	12,44	39,50	3,18	15,11	2,00	23,96
Phi12_P10	6,60	36,75	5,57	9,63	43,23	4,49	13,96	2,12	21,00
Phi8_P20	7,39	28,80	3,90	44,41	33,88	0,76	85,65	11,59	89,51
Phi10_P20	9,05	35,82	3,96	14,33	42,14	2,94	18,93	2,09	22,66
Phi12_P20	9,10	43,58	4,79	12,90	51,27	3,97	15,94	1,75	23,40

Farklı çekme donatılarına sahip referans beton (P0) ve PET katkılı kirişlerin test sonuçları Şekil 4.18'de sunulmuştur. Çekme çubuğunun çapı 8 mm'den 12 mm'ye yükseldiğinde, referans kirişlerin yük taşıma kapasitesi belirgin şekilde artmıştır. Çizelge 4.9'da görüldüğü gibi, 8 mm çekme çubuğuna sahip referans betonarme kirişin akma yükü (P_y) 26,76 kN iken, 10 mm ve 12 mm çekme donatılı kirişler için sırasıyla 28,15 kN ve 34,85 kN'ye yükselmektedir. Benzer bir artış eğilimi maksimum yük taşıma kapasitesinde (P_{max}) de gözlenmiştir. Spesifik olarak, 8 mm donatılı kiriş 31,48 kN maksimum yük kapasitesine sahipken, 12 mm donatılı kiriş 41 kN'a ulaşarak en yüksek mukavemeti göstermiştir. Benzer şekilde, 8 mm ve 12 mm donatılı kirişler için akma rijitliği (S_y) sırasıyla 2,82 kN/mm ile 5,34 kN/mm'ye ulaşmıştır. Maksimum yük rijitliği ($S_{P_{max}}$) de çekme çubuğu çapının artmasıyla birlikte artmıştır. Ayrıca, 12 mm donatılı kiriş hem yüksek nihai yer değiştirme ($\delta_u = 20,86$ mm) hem de yüksek süneklik faktörü ($\eta = 3.19$) ile en sünek davranışı sergilemiştir. Daha düşük yük taşıma kapasitesine rağmen 8 mm donatılı kiriş, yüksek nihai yer değiştirme (24,44 mm) ve süneklik faktörü ($\eta = 2,58$) ile

yine de iyi süneklik performansı göstermiştir. Öte yandan, 10 mm donatılı kiriş hem süneklik faktörü ($\eta = 2.19$) hem de yük taşıma kapasitesi açısından daha zayıf bir performans göstermiştir. Ayrıca, çekme donatısının çapı arttıkça göçme anındaki yer değiştirmede gözle görülür bir artış gözlenmiştir. Bu değerler 8 mm'lik kiriş için 32,94 mm, 10 mm'lik kiriş için 33,59 mm ve 12 mm'lik kiriş için 38,33 mm olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, referans betonarme kirişin test verilerine dayanarak, donatı çapının artırılması kirişin yük taşıma kapasitesini ve rijitliğini artırırken süneklik kapasitesini belirli bir ölçüde korumuştur.

%1 PET (P1) içerikli betonarme kirişlerin sonuçlarına bakıldığında, çekme donatısının çapı 8 mm'den 12 mm'ye çıktıkça kirişin akma yükü de belirli bir ölçüde artmıştır. Akma yükü 8 mm donatı için 25,19 kN, 10 mm için 25,85 kN ve 12 mm için 32,05 kN olarak kaydedilmiştir. Ayrıca, P1 PET ile modifiye edilmiş betonarme kirişin akma rijitliği de çekme çubuğu çapındaki artışla orantılı olarak yükselmiştir. Bu değerler 8 mm için 2,86 kN/mm, 10 mm için 2,87 kN/mm ve 12 mm için 3,01 kN/mm olmuştur. Benzer şekilde, maksimum yük taşıma kapasitesinde de bir artış olmuştur. Örneğin, 8 mm donatı için maksimum yük değeri 29,64 kN iken 12 mm donatı için bu değer 37,7 kN'ye ulaşmıştır. Maksimum yük rijitliği açısından, 8 mm çekme çubuğu çapı ile 2,42 kN/mm'den 12 mm çekme çubuğu çapı ile 2,53 kN/mm'ye yükselmiştir. Her ne kadar 10 mm donatı çubuğuna sahip kiriş daha yüksek bir yük taşıma kapasitesi sergilemiş olsa da, maksimum yük rijitliği biraz azalmıştır. Ayrıca, 12 mm çekme donatılı kiriş, süneklik faktörü ($\eta = 2.16$) ve en yüksek nihai yer değiştirme ($\delta_u = 23$ mm) ile en sünek davranışı sergilemiştir. 8 mm ve 10 mm donatı çubukları için süneklik faktörleri sırasıyla 1.54 ve 1.93 olarak ölçülmüştür. Ek olarak, çekme çubuğunun çapı arttıkça göçme anındaki yer değiştirmede önemli bir artış gözlenmiştir. Bu değer 8 mm'lik kiriş için 16,77 mm'ye 12 mm'lik kiriş için 33,26 mm'ye ulaşmıştır. Bu sonuçlara göre, betona %1 PET eklendiğinde, çekme çubuğu çapının artırılması betonarme kirişlerin akma ve maksimum yük kapasitesi ile rijitlik ve süneklik kapasitesi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olmuştur.

%3 PET (P3) içeren betonarme kirişlerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, hem akma yükü ve maksimum yüklerde hem de bunlara karşılık gelen rijitlik değerlerinde bir artış olmuştur. Akma yükü 8 mm çekme donatılı kiriş için 19,65 kN, 10 mm kiriş için 32,84 kN ve 12 mm kiriş için 37,12 kN olarak kaydedilmiştir. Ek olarak, akma rijitliği 3,05 kN/mm (Phi8_P3) ile 3,42 kN/mm (Phi12_P3) arasında değişen değerlerde hafif bir iyileşme göstermiştir. Ayrıca, donatı çapı arttıkça maksimum yük ve buna karşılık gelen yer değiştirme de artmıştır. Maksimum yük 8 mm donatılı

kirişte 23,12 kN iken, 12 mm donatılı kirişte 43,67 kN'ye ulaşmıştır. Maksimum yük artmasına rağmen, maksimum yük rijitlik değerleri sabit kalmıştır. 10 mm donatılı kiriş (Phi10_P3) 2,49 kN/mm ile en düşük sertlik değerini göstermiştir. Diğer iki kiriş 2,7 kN/mm maksimum yük rijitliğine sahiptir. Bu durum, maksimum yük taşıma kapasitesi arttığında deformasyonun da arttığını ve bunun da sınırlı rijitlikle sonuçlandığını göstermektedir. En yüksek nihai yer değiştirme (δ_u) 21,10 mm ile 12 mm donatılı kirişte görülmüştür. Nihai yer değiştirme değerleri 8 mm ve 10 mm donatılı kirişler için sırasıyla 11,27 mm ve 18,6 mm olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, artan çekme çubuğu çapı ile süneklik faktöründeki artışın çok az olduğu görülmüştür. Bu faktör 8 mm donatılı kiriş için 1,75, 10 mm donatılı kiriş için 1,84 ve 12 mm donatılı kiriş için 1,94 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde, göçme anındaki deformasyon da donatı çapıyla birlikte artmış ve 8 mm donatılı kirişte bu değer 16,26 mm'den 12 mm donatılı kirişteki 27,00 mm değerine yükselmiştir. Farklı çekme çubuğu çapları %3 PET içerikli betonarme kirişlerde kullanıldığında, donatı çapının artması daha yüksek yük taşıma kapasitesi, nihai deformasyon ve göçme anı yer değiştirmesine neden olmuştur. Ancak, sertlik ve süneklik gibi parametrelerde bu artış ya sınırlı kalmış ya da doğrusal olmayan bir davranış sergilemiştir. Bu PET içeriği seviyesi altında, 12 mm donatıya sahip kiriş daha iyi performans göstermiştir.

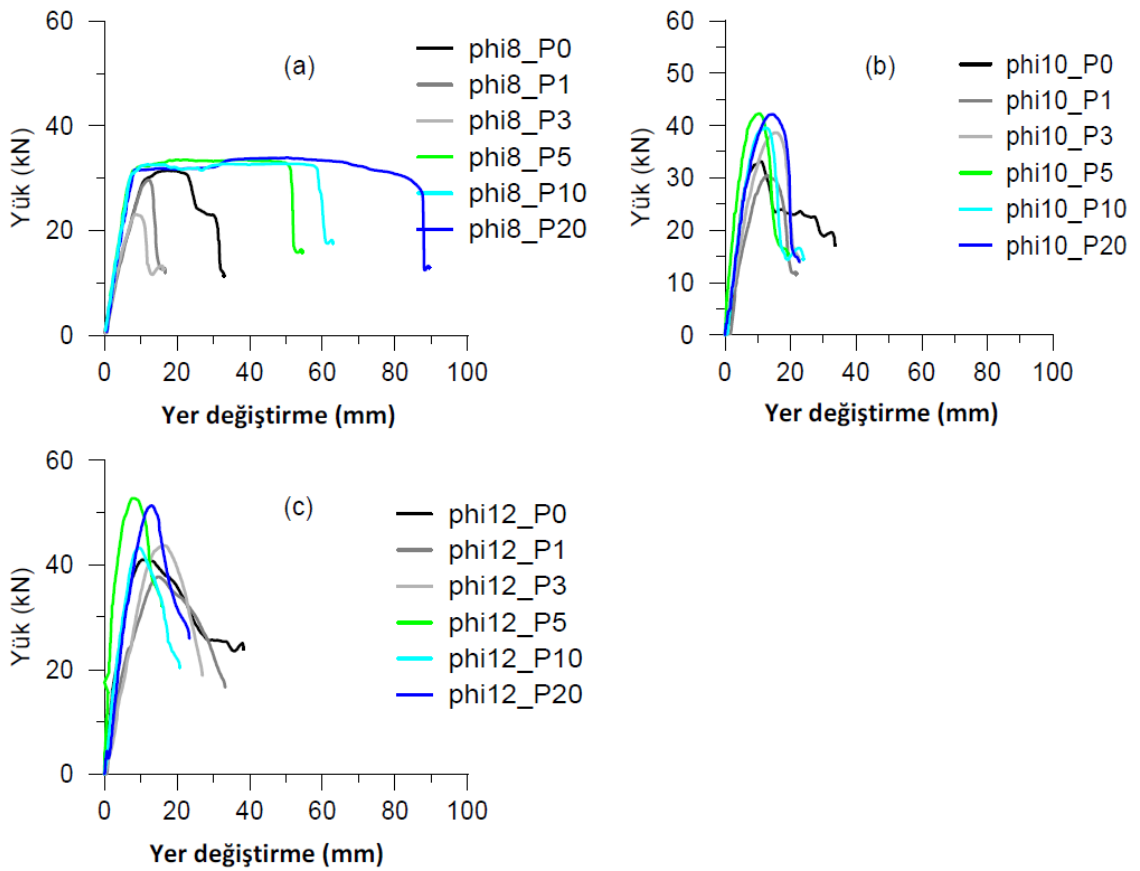
%5 PET (P5) içeren deney numunelerinde, 8 mm, 10 mm ve 12 mm çaplarında çekme donatıları kullanılarak üretilen betonarme kirişlerin yapısal davranışı değerlendirilmiştir. Akma yükü, çekme çubuğu çapındaki artışla birlikte önemli ölçüde artmıştır. Phi8_P5 numunesi 28,48 kN akma yüküne ulaşırken, Phi12_P5 numunesi 44,81 kN ile en yüksek değeri göstermiştir (Phi10_P5 için bu değer 35,92 kN'dur). Benzer şekilde, akma rijitliği (S_y) artan çekme çapı ile iki kattan fazla artmıştır. Bu rijitlik 8 mm donatılı kiriş için 4,42 kN/mm iken, 12 mm donatılı kirişte 10,18 kN/mm'ye yükselmiştir. Maksimum yük taşıma kapasitesi (P_{max}) açısından da benzer bir eğilim gözlenmiştir. 8 mm donatılı kiriş 33,50 kN taşıyabilirken, 12 mm çekme donatılı kiriş kapasitesi 52,71 kN'ye kadar ulaşmıştır (10 mm donatılı kiriş için 42,26 kN). Bu eğilim, 8 mm kirişte 1,67 kN/mm'den 12 mm kirişte 6,69 kN/mm'ye yükselen maksimum yük sertliği (S_{Pmax}) değeri ile de desteklenmiştir. 10 mm çaplı kiriş için bu değer 3,99 kN/mm olarak ölçülmüştür. 8 mm donatılı kiriş, nihai yer değiştirme (δ_u) ve süneklik faktörüne (η) göre daha sünek davranış göstermiştir. Phi8_P5 numunesi 51,80 mm nihai yer değiştirmeye ve 8,04 süneklik faktörüne, dolayısı ile iyi bir süneklik performansına işaret etmiştir. Betonarme kirişin 8 mm çekme çubuğu ile elde ettiği bu değerler, 10 mm ve 12 mm çekme çubukları

ile elde edilen değerlerden daha büyüktür. Donatı çapı arttıkça göçme anındaki deformasyon (δ_f) da azalmıştır. Bu değer 8 mm donatılı kirişte 54,54 mm'den 10 mm ve 12 mm donatılı kirişlerde sırasıyla 19,21 mm ve 15,80 mm'ye inmiştir. PET içeriği %5 olan betonarme kirişlere ait veriler, çekme çubuğu çapının artırılmasının test edilen betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesini ve rijitliğini artırdığını açıkça göstermiştir. Aynı zamanda süneklik ve deformasyon kapasitesinde bir azalmaya yol açmıştır.

%10 PET içeren betonarme kirişler üzerinde yapılan deneysel çalışma sonucunda, farklı çekme donatısı çaplarının (8 mm, 10 mm ve 12 mm) kiriş davranışı üzerindeki etkisi detaylı olarak gözlemlenmiştir. Akma yükü (P_y) açısından, donatı çapı arttıkça yük taşıma kapasitesi de artmıştır. Phi8_P10 kirişi 27,83 kN akma yüküne ulaşırken, bu değer Phi12_P10 kirişi için 36,75 kN'a, Phi10_P10 kirişi için ise 33,58 kN'a yükselmiştir. Benzer şekilde, akma sertliği (S_y) genel olarak çapla birlikte artan bir eğilim göstermiş ve 8 mm donatılı kiriş için 4,56 kN/mm'den, 12 mm donatılı kiriş için 5,57 kN/mm'ye yükselmiştir. Benzer bir durum maksimum yük (P_{max}) için de geçerlidir. En düşük kapasite Phi8_P10'da 32,74 kN olarak belirlenirken, en yüksek kapasite Phi12_P10'da 43,23 kN olarak ölçülmüştür. Maksimum yük sertliği (S_{Pmax}) de en küçük çekme donatılı (Phi8_P10) için 0,64 kN/mm'den en büyük donatılı (Phi12_P10) için 4,49 kN/mm'ye yükselmiştir. Ancak sünek davranış değerlendirilirken, donatı çapı arttıkça deformasyon kapasitesinin azaldığı gözlenmiştir. Özellikle nihai yer değiştirme (δ_u) ve süneklik faktörü (η) açısından, 8 mm donatılı kiriş 59,30 mm nihai yer değiştirme ve 9,72 süneklik faktörü ile en sünek davranışı göstererek üstün performans sergilemiştir. Buna karşılık, 12 mm donatılı betonarme kiriş 13,96 mm'lik sınırlı bir nihai yer değiştirme ve 2,12'lik bir süneklik faktörü göstermiştir. Kırılma anındaki yer değiştirme (δ_f) 8 mm donatılı kirişte 62,93 mm'den, 12 mm donatılı kirişte 21,00 mm'ye düşmüştür. Bu bulgular ışığında, %10 PET içeren betonarme kirişlerde donatı çapının artırılması genel olarak yük taşıma kapasitesi ve rijitlik üzerinde olumlu bir etkiye sahipken süneklik üzerinde sınırlayıcı bir etki yaratmıştır. Bu PET içeriği seviyesinde, plastik deformasyon kapasitesinin daha küçük çaplı donatılar kullanımında arttığı görülmüştür.

%20 PET katkılı betonarme kirişlerin sonuçları değerlendirildiğinde, 8 mm donatılı kiriş 28,80 kN akma yükü sergilemişken, bu değer 10 mm ve 12 mm donatılı kirişler için sırasıyla 35,82 kN ve 43,58 kN'a yükselmiştir. Akma rijitliği (S_y) daha büyük çaplı donatılı kirişlerde sınırlı bir artış göstermiştir. Örneğin, 8 mm donatılı kiriş için 3,90 kN/mm'den 12 mm donatılı kiriş için 4,79 kN/mm'ye yükselmiştir. Maksimum yük kapasitesinde (P_{max}) de benzer bir artış eğilimi gözlenmiş, Phi8_P20 numunesinde 33,88

kN'a, Phi12_P20 numunesinde ise 51,27 kN'a ulaşmıştır. Maksimum yük sertliği (S_{Pmax}) 8 mm donatılı kiriş için 0,76 kN/mm'den 12 mm donatılı kiriş için 3,97 kN/mm'ye yükselmiştir. 8 mm donatılı betonarme kiriş, 85,65 mm nihai yer değiştirme ve 11,59 süneklik faktörü ile daha sünek bir davranış göstermiştir. Bu değerler 12 mm donatılı betonarme kiriş için sırasıyla 15,94 mm'ye ve 1,75'e düşmüştür. Göçme anındaki deformasyon (δ_f) Phi8_P20 kirişinde 89,51 mm'den Phi12_P20 kirişinde 23,40 mm'ye düşmüştür. %20 PET içerikli numuneler için daha büyük çaplı donatı kullanımı, kirişlerin akma ve maksimum yük kapasiteleri ile rijitliklerini önemli ölçüde artırmış olsa da süneklik ve deformasyon kapasitelerini büyük ölçüde azaltmıştır.



Şekil 4.19. 8 mm, 10 mm ve 12 mm çaplarında çekme donatısı ile 10 cm sabit etriye aralığına sahip, referans ve PET katkılı betonarme kiriş numunelerine ait test sonuçları

Genel olarak, deneysel çalışmalar farklı PET içeriklerinin (%1, %3, %5, %10 ve %20) betonarme kirişlerin yapısal performansı üzerindeki etkisini değerlendirilmiş ve bulguları referans numunelerle (P0) karşılaştırılmıştır (Şekil 4.19). Her karışımda, çekme çubuğu çapı 8 mm'den 12 mm'ye yükseltildiğinde, akma ve nihai yükler önemli ölçüde artmıştır. En yüksek akma ve nihai yükler %5 PET ve 12 mm çekme çubuğu içeren kirişte

elde edilmiş ve sırasıyla 44,81 kN ve 52,71 kN'a ulaşmıştır. P20 kirişi için de benzer değerlere ulaşılmıştır (sırasıyla 43,58 kN ve 51,27 kN). Hem referans hem de tüm PET karışımlarında çekme çubuğu çapı arttıkça akma-yük rijitliği de yukarı doğru bir eğilim izlemiştir. Maksimum değer olan 10,18 kN/mm, Phi12_P5 numunesinde kaydedilmiştir. Nihai yük sertliği de aynı şekilde davranmış ve 12 mm çubuklu ve %5 PET içerikli kirişte 6,69 kN/mm ile zirve yapmıştır. Buna karşılık, kırılma yer değiştirmesi (δ_u) ve süneklik faktörü (η) referans, P1 ve P3 kirişlerinde çubuk çapı ile artmış, ancak %5 PET seviyesinden sonra çubuk çapı ile ters ilişkili hale gelmiştir. En büyük değerler 8 mm donatıya sahip kirişlerden elde edilmiştir. %5'ten fazla PET içeriğinde, çubuk çapı arttıkça kırılma anındaki deformasyon azalarak aynı davranışı göstermiştir. En büyük nihai yer değiştirme, süneklik faktörü ve göçme yer değiştirmesi sırasıyla 85,65 mm, 11,59 ve 89,51 mm ile %20 PET ilaveli kirişte kaydedilmiştir. Özetle, akma yükü, nihai yük ve bunların rijitlikleri artan PET içeriği ve artan donatı çapı ile artarken, %5 ve daha fazla PET içeriği için, donatı çapı azaldıkça süneklik faktörü iyileşmektedir. Böylece, PET ilavesinin betonun sünek davranışını artırdığı gözlenmiştir. Kirişlerde 12 mm donatı kullanımını yaklaşık %5 PET'e kadar uygun olsa da, bu seviyenin ötesinde 8 mm çaplı donatının kullanılmasının kiriş sünekliğini korumak için önemli hale geldiği söylenebilir.

Şekil 4.20 referans (P0) ve PET ilaveli betonarme kirişlerin deney sonunda elde edilen kırılma biçimlerini göstermektedir. 8 mm çaplı çekme donatısına sahip P0 (referans) betonu ile PET katkılı tüm karışımların testleri sonunda genel olarak eğilme çatlaması gözlenmiştir. 10 mm çaplı çekme donatısıyla üretilen kirişlerde ise çoğunlukla kesme çatlakları hakimdir. Öte yandan, 12 mm çaplı çekme donatısına sahip numunelerde de yine kesme çatlaması mevcuttur.

Phi8_P0



Phi10_P0



Phi12_P0



Phi8_P1



Phi10_P1



Şekil 4.20. $\phi 8$, $\phi 10$ ve $\phi 12$ çekme donatılı, referans ve PET katkılı betonarme kirişlerin kırılma biçimleri

Phi12_P1



Phi8_P3



Phi10_P3



Phi12_P3



Şekil 4.20. $\phi 8$, $\phi 10$ ve $\phi 12$ çekme donatılı, referans ve PET katkıli betonarme kirişlerin kırılma biçimleri

Phi8_P5



Phi10_P5



Phi12_P5



Phi8_P10



Phi10_P10



Şekil 4.20. $\phi 8$, $\phi 10$ ve $\phi 12$ çekme donatılı, referans ve PET katkıli betonarme kirişlerin kırılma biçimleri

Phi12_P10



Phi8_P20



Phi10_P20



Phi12_P20

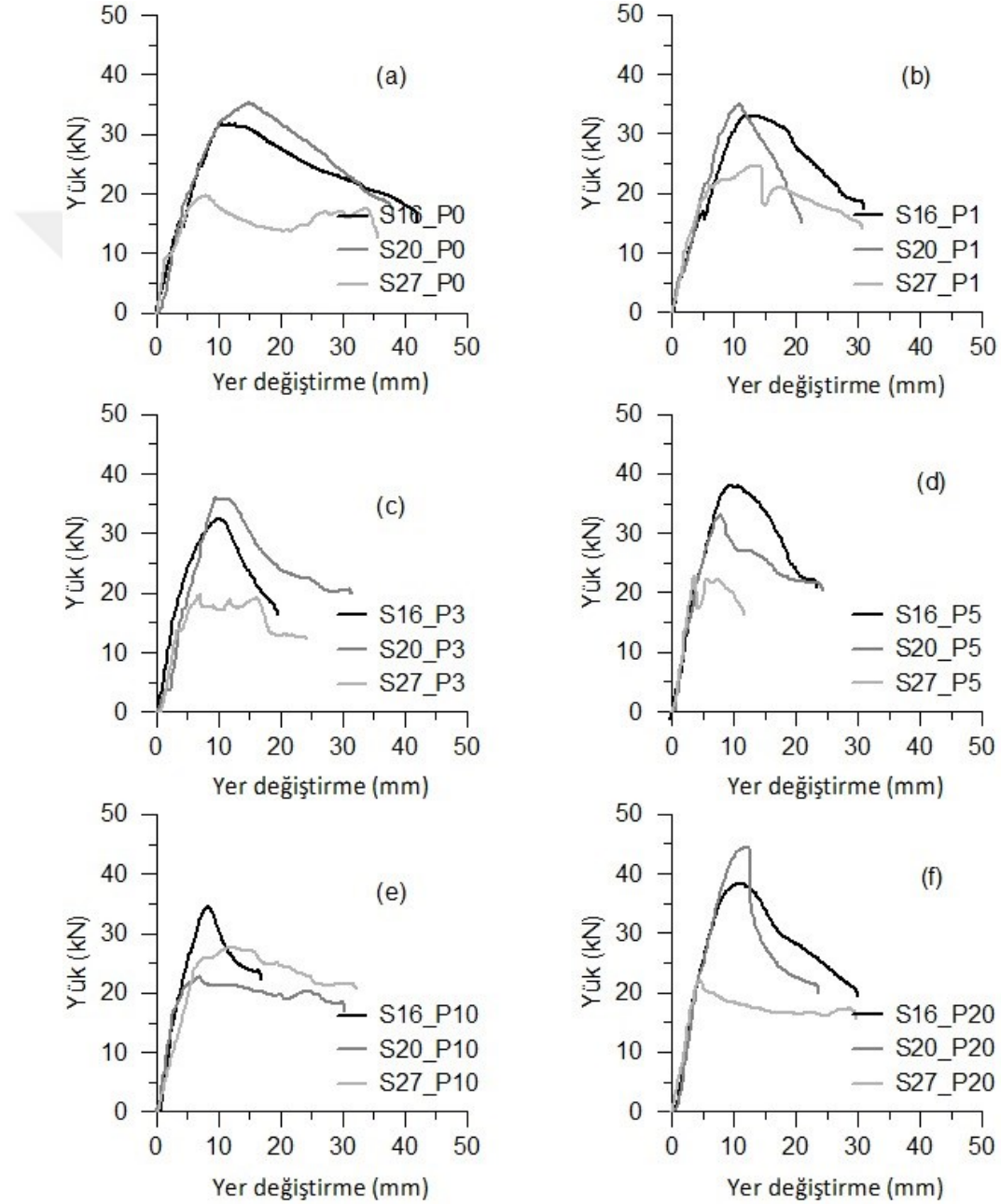


Şekil 4.20. $\phi 8$, $\phi 10$ ve $\phi 12$ çekme donatılı, referans ve PET katkıli betonarme kirişlerin kırılma biçimleri

4.2.3.2 Etriye aralığının betonarme kirişlerin davranışına etkisi

Betonarme kirişlerin kapasitesi üzerinde etriye aralığının etkisini belirlemek için, çekme donatısı çapı 12 mm olarak sabit tutulurken üç farklı etriye aralığı incelenmiştir. 8 mm çapında sırasıyla 8, 7 ve 6 adet etriye kullanılmasına karşılık gelen 16, 20 ve 27 cm etriye aralıkları seçilmiştir. Bu düzenleme hem referans (P0) hem de PET ilaveli beton

karışımlarına (P1, P3, P5, P10, P20) uygulanmıştır. Toplamda 18 adet betonarme kiriş numunesi dört noktalı yükleme mekanizması kullanılarak test edilmiştir. Yükleme işleminin başından sonuna kadar elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 4.21'de sunulmuştur. Akma yükü, akma yer değiştirme, akma rijitliği, maksimum yük kapasitesi, maksimum yük altında yer değiştirme, maksimum yük rijitliği, süneklik faktörü, nihai yer değiştirme (maksimum yükün %80'ine karşılık gelen değer) ve kırılma anındaki yer değiştirme sonuçları Çizelge 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.21. 16, 20 ve 27 cm etriye aralıklarına sahip, referans ve PET ilaveli betonarme kirişlerden elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri

Çizelge 4.10. Referans ve PET ilaveli karışımlar kullanılarak 16, 20 ve 27 cm etriye aralıklarına sahip betonarme kirişlerden elde edilen deneysel sonuçlar

	Akma anındaki yerdeğiştirme	Akma anındaki kuvvet	Akma rijitliği	Maksimum kuvveteeki yerdeğiştirme	Maksimum kuvvet	Maximum yük rijitliği	Dayanımın tamamını kaybetmeden önceki yer değiştirme	Süneklik katsayısı	Göçme durumundaki yerdeğiştirme
Etriye Aralığı ve PET Oranı	δ_y (mm)	P_y (kN)	S_y (kN/mm)	$\delta_{P_{max}}$ (mm)	P_{max} (kN)	$S_{P_{max}}$ (kN/mm)	δ_u (mm)	η (δ_u/δ_y)	δ_f (mm)
S16_P0	9,20	26,95	2,93	31,62	31,71	1,00	16,96	1,84	42,06
S20_P0	9,15	29,89	3,27	14,97	35,16	2,35	22,45	2,45	38,15
S27_P0	4,85	16,69	3,44	7,88	19,63	2,49	11,52	2,38	35,75
S16_P1	8,92	28,08	3,15	11,75	33,03	2,81	19,70	2,21	30,82
S20_P1	7,63	29,65	3,89	10,60	34,88	3,29	14,45	1,89	20,87
S27_P1	5,82	20,89	3,59	13,68	24,58	1,80	17,72	3,04	30,54
S16_P3	6,53	27,64	4,23	10,27	32,52	3,17	13,05	2,00	19,63
S20_P3	7,90	30,71	3,89	9,72	36,13	3,72	15,35	1,94	31,47
S27_P3	5,18	25,33	4,89	7,10	29,80	4,20	17,10	3,30	24,19
S16_P5	6,68	32,29	4,83	9,17	37,99	4,14	15,35	2,30	23,36
S20_P5	5,67	28,05	4,95	7,79	33,00	4,24	9,85	1,74	24,28
S27_P5	4,94	19,54	3,96	3,55	22,99	6,48	10,05	2,03	11,60
S16_P10	6,32	29,33	4,64	8,34	34,50	4,14	10,55	1,67	17,00
S20_P10	3,84	19,26	5,02	6,96	22,66	3,26	20,52	5,34	30,36
S27_P10	5,95	23,45	3,94	11,93	27,59	2,31	22,63	3,80	31,97
S16_P20	6,96	32,57	4,68	11,10	38,32	3,45	15,73	2,26	29,95
S20_P20	8,00	37,70	4,71	11,75	44,35	3,77	12,65	1,58	23,68
S27_P20	3,45	18,76	5,44	4,60	22,07	4,80	8,50	2,46	29,72

Çizelge 4.10'da sunulan deneysel sonuçlara dayanarak, etriye aralığının (16 cm, 20 cm ve 27 cm) betonarme kirişlerin davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Referans (P0) kirişlerden S16_P0 numunesi, 9,20 mm akma yer değiştirmesine (δ_y), 26,95 kN akma yüküne (P_y) ve 2,93 kN/mm akma rijitliğine (S_y) sahiptir. S20_P0 numunesinde, δ_y değeri 9,15 mm olarak S16_P0'daki değere yakinken, P_y ve S_y değerleri sırasıyla 29,89 kN ve 3,27 kN/mm'ye yükselmiştir. En geniş etriye aralığına sahip olan S27_P0 numunesinden 4,85 mm'lik bir akma yer değiştirmesi (δ_y) ve 16,69 kN'lik bir akma yükü (P_y) elde edilmiştir. Buna karşın, akma rijitliği (S_y) 3,44 kN/mm'ye yükselmiştir. Benzer şekilde, 16 cm etriye aralığına sahip kirişte maksimum yük kapasitesi 31,71 kN'den, 20 cm aralıklı kirişte 35,16 kN'ye yükselmiş, daha sonra 27 cm aralıklı kirişte 19,63 kN'ye düşmüştür. 27 cm etriye aralığı için maksimum yük azalmasına rağmen, maksimum yük rijitliği ($S_{P_{max}}$) aralık 16 cm'den 27 cm'ye genişledikçe artmıştır. $S_{P_{max}}$ değerleri 16 cm, 20 cm ve 27 cm etriye aralıkları için sırasıyla 1,00, 2,35 ve 2,49 kN/mm olarak

belirlenmiştir. 16 cm etriye aralığına sahip kirişin nihai yer değiştirmesi (δ_u) 16,96 mm ve süneklik faktörü (η) 1,84 iken, kırılma anındaki yer değiştirmesi 42,06 mm olmuştur. Aralık 20 cm'ye çıkarıldığında, δ_u değeri 22,45 mm'ye ve η değeri 2,45'e yükselmiştir. 27 cm aralıklı numune için δ_u ve η sırasıyla 11,52 mm ve 2,38'e düşmüştür. Kırılma deplasmanı da S16_P0'da 42,06 mm'den S27_P0'da 35,75 mm'ye kademeli olarak azalmıştır. Bu referans sonuçları, etriye aralığının süneklik, yük taşıma kapasitesi ve deplasman davranışı üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermiştir. Test edilen numuneler arasında, 20 cm etriye aralığına sahip betonarme kiriş en iyi genel performansı sergilemiştir.

%1 PET içeriğine ve farklı etriye aralıklarına (16 cm, 20 cm ve 27 cm) sahip betonarme kirişlerin yapısal davranışı yorumlanacak olursa, öncelikle S16_P1 numunesi referans kirişe (S16_P0) kıyasla yük taşıma kapasitesinde bir artış göstermiştir. Bu numunenin akma yer değiştirmesi (δ_y) 8,92 mm ve akma yükü (P_y) 28,08 kN olarak ölçülmüştür. Maksimum yük 33,03 kN olarak kaydedilmiştir. Bu numune, 2,81 kN/mm maksimum yük rijitliği, 19,70 mm nihai yer değiştirme (δ_u) ve 2,21 artan süneklik faktörü (η) sağlamıştır. Kırılma anındaki yer değiştirme 30,82 mm olarak kaydedilmiştir. S20_P1 numunesinin S16_P1'e nazaran akma deplasmanı düşüş kaydetmiş ve 14,45 mm değerine gelmiştir, ancak maksimum kuvvet 34,88 kN ile daha yüksek bir değere ulaşmıştır. Bu numune, 3,29 kN/mm'lik maksimum yük rijitliği, 14,45 mm δ_u ve 1,89 süneklik faktörü sağlamıştır. En geniş etriye aralığına sahip olan S27_P1 numunesinde δ_y 5,82 mm'ye düşerken, P_y 20,89 kN olmuştur. Bununla birlikte, bu numunesinin δ_u değeri 17,72 mm'ye yükselirken, test edilen kirişler arasında en yüksek süneklik faktörü (η) 3,04 olarak ölçülmüş ve 24,58 kN' yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Sonuç olarak, %1 PET ilavesi altında, en yüksek maksimum yük kapasitesi 20 cm etriye aralığına sahip kirişte elde edilirken, en yüksek süneklik faktörü 27 cm aralığa sahip kirişte gözlemlenmiştir.

%3 PET içeriğine sahip betonarme kirişlerin davranışı, 16 cm, 20 cm ve 27 cm'lik etriye aralıkları temel alınarak değerlendirilmiştir. S16_P3 numunesinin sonuçları, 6,53 mm'lik akma yer değiştirme (δ_y) ve 27,64 kN'lik akma yükü (P_y) değerlerini göstermiştir. Maksimum yük kapasitesi ve rijitliği sırasıyla 32,52 kN ve 3,17 kN/mm olarak elde edilmiştir. Nihai yer değiştirme (δ_u) 13,05 mm olarak ölçülmüş ve süneklik faktörü (η) 2,00 olarak hesaplanmıştır. 20 cm'lik etriye aralığına sahip S20_P3 numunesinde, δ_y 7,90 mm olarak kaydedilmiş ve P_y , referans kirişe kıyasla 30,71 kN'ye yükselmiştir. Maksimum yük kapasitesi 36,13 kN'ye ulaşmış ve rijitlik 3,72 kN/mm olarak belirlenmiştir. 15,35 mm'lik nihai yer değiştirme ile süneklik faktörü 1,94 olarak

belirlenmiştir. En geniş demir aralığına sahip S27_P3 numunesinde, 5,18 mm'lik daha düşük bir δ_y ile erken deformasyon görülse de 25,33 kN'lik akma yükü ve 29,80 kN'lik maksimum yük kapasitesi sergilemiştir. En dikkat çekici nokta, 17,10 mm'lik nihai yer değiştirme ve 3,30'luk yüksek süneklik faktörünün elde edilmesidir. %3 PET ile modifiye edilmiş betonarme kirişlerin sonuçlarına göre, en yüksek maksimum yük kapasitesi S20_P3 numunesinde elde edilirken, en yüksek süneklik faktörü S27_P3 numunesinde gözlemlenmiştir.

%5 PET içeriğine ve farklı etriye aralıklarına sahip betonarme kirişlerin davranışı değerlendirildiğinde, 16 cm etriye aralığına sahip S16_P5 numunesinin akma yer değiştirmesi (δ_y) ve yükü (P_y) sırasıyla 6,68 mm ve 32,29 kN olarak ölçülmüştür. Maksimum yük kapasitesi 37,99 kN olarak elde edilmiştir. Bu numune, diğerlerine kıyasla mukavemet ve süneklik arasında daha iyi performans göstermiş, nihai yer değiştirme (δ_u) 15,35 mm ve süneklik faktörü (η) 2,30 değerleri elde edilmiştir. 20 cm etriye aralığına sahip S20_P5 numunesi, 5,67 mm'lik nispeten daha düşük bir δ_y ile 28,05 kN'lik akma yüküne ulaşmıştır. Maksimum yük kapasitesi 33,00 kN olmuştur. Ayrıca, nihai yer değiştirme ve süneklik faktörü sırasıyla 9,85 mm ve 1,74 olarak elde edilmiştir. S27_P5 numunesinde mukavemet değerleri daha da küçülmüştür. Bu numune 4,94 mm akma yer değiştirmesine ve 19,54 kN akma yüküne ulaşırken, maksimum yük kapasitesi 22,99 kN ile sınırlı kalmıştır. Ancak bu numunenin $S_{P_{max}}$ değeri ise 6,48 kN/mm ile en yüksek sertlik değerini temsil etmiştir. Nihai yer değiştirme ve süneklik faktörü sırasıyla 10,05 mm ve 2,03 olarak hesaplanmıştır. %5 PET içeriği, özellikle aralıkları dar olan demirlerin bulunduğu kirişlerde olumlu performans sağlarken, demir sıklığının azalması hem mukavemet hem de süneklik performansını düşürme eğiliminde olmuştur.

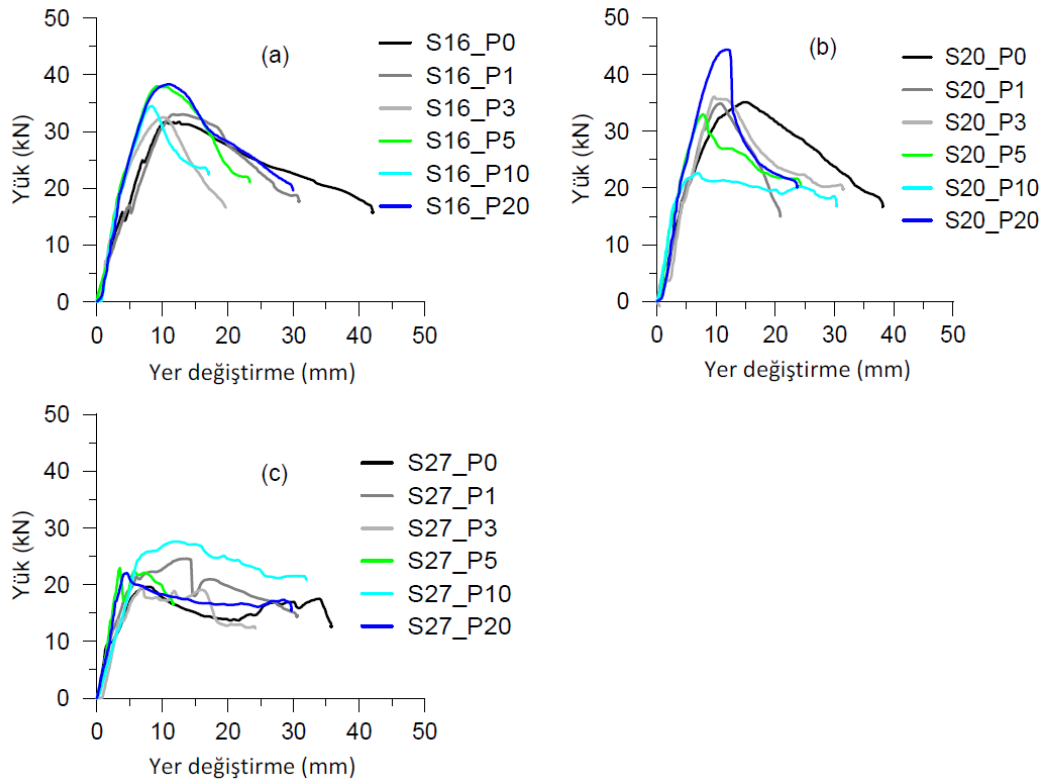
Farklı etriye aralıklarında %10 PET içeriğine sahip betonarme kirişlerin performansını değerlendirirken, 16 cm etriye aralığına sahip S16_P10 numunesi 6,32 mm akma yer değiştirme (δ_y), 29,33 kN akma yükü (P_y), 34,50 kN maksimum yük kapasitesi ve 4,14 kN/mm maksimum yük rijitliği ($S_{P_{max}}$) sağlamıştır. Bu aralıkta, nihai yer değiştirme (δ_u) ve süneklik faktörü (η) sırasıyla 10,55 mm ve 1,67 olarak kaydedilmiştir. Etriye aralığı 20 cm'ye çıktığında, S20_P10 numunesinde süneklik önemli ölçüde artarken, yük taşıma kapasitesi azalmıştır. Akma yer değiştirmesi 3,84 mm'ye düşmüş ve akma yükü 19,26 kN'ye gerilerken, nihai yer değiştirmesi 20,52 mm'ye çıkmıştır. Bu, 5,34 gibi oldukça yüksek bir süneklik faktörü ile sonuçlanmıştır. Maksimum yük kapasitesi 22,66 kN olarak ölçülmüştür. 5,95 mm yer değiştirmede, S27_P10 numunesi 23,45 kN akma yüküne ulaşmış ve daha tutarlı bir mukavemet tepkisi göstermiştir. Ayrıca, 27,59

kN maksimum yük ve 3,80 süneklik faktörü ile 22,63 mm'lik en yüksek nihai yer değiştirme elde edilmiştir. Yük taşıma kapasitesini araştırmak için %10 PET ilaveli betonarme kirişler değerlendirilirken, 16 cm etriye aralığına sahip numune en yüksek kapasiteyi gösterirken, 20 cm aralığa sahip numune en düşük değerleri göstermiştir. 27 cm aralığa sahip numune ise orta düzeyde bir performans sergilemiştir. Sünme açısından ise S20_P10 numune en iyi performansı göstermiştir.

%20 PET ile modifiye edilmiş betonarme kirişlerin performansı, etriye aralığına göre incelenirken, S16_P20 numunesi 6,96 mm'lik akma yer değiştirme (δ_y), 32,57 kN'lik akma yükü (P_y) ve 38,32 kN'lik maksimum yük kapasitesi göstermiştir. Bu numune ayrıca 2,26'lık süneklik faktörü (η) ve 15,73 mm'lik nihai yer değiştirme (δ_u) değerleri sergilemiştir. 20 cm'lik etriye aralığına sahip kiriş numunesi, sırasıyla 37,70 kN ve 44,35 kN'lik akma ve maksimum yüklerle en yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olmuştur. Bu numunenin süneklik faktörü nispeten daha düşük olmuş ve sadece 1,58 dir. Etriye aralığı 27 cm'ye çıktığında (yani S27_P20 numunesi), 18,76 kN akma yükü ve 22,07 kN maksimum yük kapasitesi ile en düşük yük performansı elde edilmiştir. Bununla birlikte, 2,46 faktörü ile iyi bir süneklik göstermiştir. Bu sonuçlara göre, %20 PET ilaveli betonarme kirişler için S20_P20 numunesi üstün yük taşıma kapasitesi sergilemiştir. Süneklik açısından, S16_P20 ve S27_P20 numunelerinin süneklik faktörleri birbirine benzemektedir ve S20_P20 kiriş numunesinin süneklik faktöründen daha yüksek olmuştur.

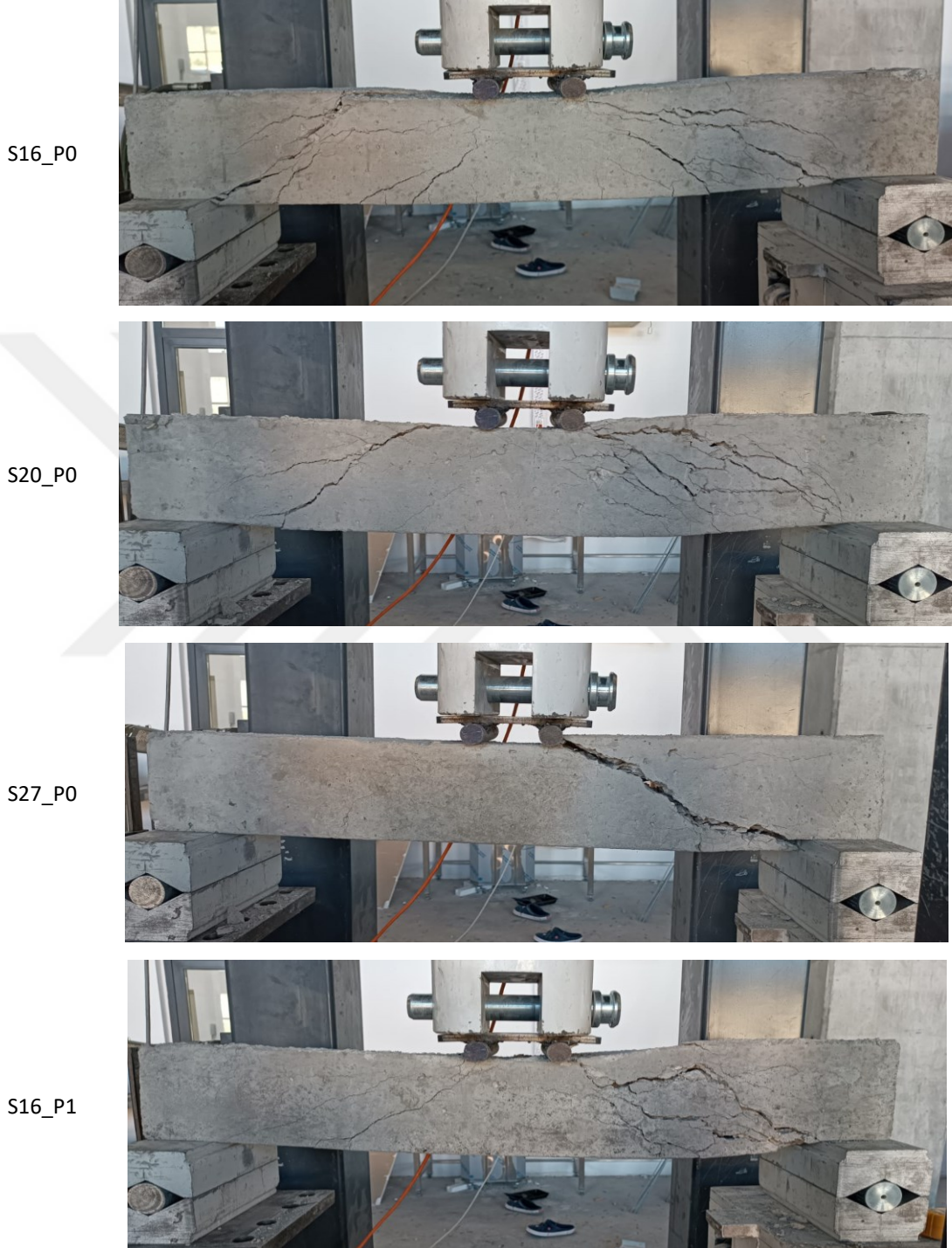
16 cm, 20 cm ve 27 cm etriye aralıklarına ve %1, %3, %5, %10 ve %20 PET ekleme oranlarına sahip referans (P0) ve PET katkılı betonarme kiriş numunelerinin genel bir değerlendirmesi Şekil 4.22'deki sonuçlara göre yapılmıştır. Hem PET içeriğinin hem de etriye aralığının yük taşıma kapasitesi ve süneklik açısından yapısal performansı önemli ölçüde etkilediğini ortaya koyulmuştur. Referans numuneler arasında en yüksek akma yükü (29,89 kN) ve maksimum yük (35,16 kN) S20_P0 numunesinde elde edilmiştir. Ancak, S27_P0 en düşük dayanıma (16,69 kN (P_y), 19,63 kN (P_{max})) sahip numune olmuştur. %1 PET ilavesi genel olarak referansa (P0) benzer bir dayanıma sahip olup, S20_P1 29,65 kN (P_y) ve 34,88 kN (P_{max}) göstermiş ve S27_P1 yüksek süneklik faktörüyle ($\eta = 3,04$) öne çıkmıştır. %3 PET numunelerinde yük kapasitesi iyileşmiş ve özellikle S27_P3, 29,80 kN'lik maksimum yüke ulaşmıştır. Süneklik, %3 PET katkısıyla olumlu yönde etkilenmiş, bu da S27_P3 ve S16_P3'te sırasıyla 3,30 ve 2,00'lük süneklik faktörü değerleriyle görülmüştür. %5 PET katkılı betonarme kiriş, yük taşıma kapasitesinde önemli artışlar elde etmiştir (örneğin, S16_P5 32,29 kN (P_y) ve 37,99 kN (P_{max}) elde ederken, S20_P5 yüksek sertlik (rijitlik) ve dayanım göstermiştir). Ancak,

%10 PET'de yük kapasitesi genel olarak azalmıştır - örneğin, S20_P10 19,26 kN'ye (P_y) düşmüş- ancak süneklik belirgin şekilde 5,34'e yükselmiş ve bu da gelişmiş deformasyon kapasitesini göstermiştir. %20 PET kirişler karmaşık bir davranış göstermiş olup, S20_P20 genel olarak en yüksek dayanıma (37,70 kN (P_y), 44,35 kN (P_{max})) ancak aynı zamanda düşük sünekliğe ($\eta = 1,58$) sahip olmuştur. Buna karşın S27_P20 en düşük dayanım değerlerini ($P_y = 18,76$ kN, $P_{max} = 22,07$ kN) ve iyi sünekliğe ($\eta = 2,46$) sahip olmuştur. Süneklik PET içeriğiyle artma eğilimindeyken, yük kapasitesi %5 PET ilavesinin ötesinde azalmıştır. Yapısal uygulamalar için optimum PET içeriğinin %3 ile %5 arasında olduğu söylenebilir. Daha yüksek katkı yüzdeleri, deformasyon kapasitesini artırırken yük kapasitesini azaltabilir. Buna ilave olarak, daha dar etriye aralıkları hem daha yüksek yük kapasitesini hem de sünekliği destekleyerek toplam performansı genel olarak iyileştirmiştir. Tüm konfigürasyonlar arasında, 16 cm etriye aralığı, PET içeriğinden bağımsız bir biçimde, sürekli olarak en kararlı ve dengeli performansı sağlamıştır.



Şekil 4.22. Referans ve PET ile modifiye edilmiş betonarme kiriş numunelerinden elde edilen deneysel sonuçlar (Burada çekme donatı çapı 12 mm sabit tutulmuş ve kirişlerde 16 cm, 20 cm ve 27 cm'lik etriye aralıkları kullanılmıştır.)

Şekil 4.23 farklı etriye aralıklarına sahip (16, 20 ve 27 cm), referans (P0) ve farklı oranlarda PET ilaveli betonarme kirişlerin deney sonunda elde edilen kırılma biçimlerini göstermektedir. Test sırasında oluşan çatlakların genellikle kesme çatlakları olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.23. $\phi 8/16$, $\phi 8/20$ ve $\phi 8/27$ etriyeli referans ve PET katkılı kirişlerin kırılma biçimleri

S20_P1



S27_P1



S16_P3



S20_P3



S27_P3



Şekil 4.23. $\phi 8/16$, $\phi 8/20$ ve $\phi 8/27$ etriyeli referans ve PET katkılı kirişlerin kırılma biçimleri

S16_P5



S20_P5



S27_P5



S16_P10



S20_P10



Şekil 4.23. $\phi 8/16$, $\phi 8/20$ ve $\phi 8/27$ etriyeli referans ve PET katkılı kirişlerin kırılma biçimleri

S27_P10



S16_P20



S20_P20



S27_P20



Şekil 4.23. $\phi 8/16$, $\phi 8/20$ ve $\phi 8/27$ etriyeli referans ve PET katkıli kirişlerin kırılma biçimleri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Beton Numunelerin Test Sonuçları

Deneysel çalışmaların birinci aşamasında, beton üretiminde polietilen tereftalat (PET) ilavesinin betonun mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, referans (P0) betonun yanı sıra, beton karışımlarına hacimsel oranlarda %1 (P1), %3 (P3), %5 (P5), %10 (P10) ve %20 (P20) oranlarında PET ilave edilmiştir. Ayrıca, beton karışımları hem CEM II 32.5 hem de CEM II 42.5 çimento türleri ile hazırlanmıştır. Beton numuneler üzerinde çökme, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, donma-çözülme ve sıcaklık testleri ile SEM analizleri gerçekleştirilmiştir.

Deneylemlerin sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- CEM II 32.5 ve CEM II 42.5 için PET yüzdesi arttıkça çökme testi sonucu elde edilen çökme değeri azalmış ve en büyük azalma oranı (%50) P20 PET ilavesinde görülmüştür.
- CEM II 42.5 çimento, tüm kür sürelerinde (3, 7 ve 28 gün) CEM II 32.5'e kıyasla daha yüksek basınç dayanımı sergilemiştir. Basınç dayanımındaki kürlenme süresi ile yükselen yüzde artış, CEM II 42.5 karışımlarında daha belirgindir.
- Çekme mukavemeti testleri, kür süresiyle birlikte artış eğilimi göstermiş ve CEM II 42.5 karışımları yine CEM II 32.5'ten daha iyi performans göstermiştir. Çekme mukavemetindeki en yüksek yüzde artış CEM II 32.5 için P5 ve CEM II 42.5 için P20 karışımlarında gözlemlenmiş olup, bu bileşimlerin çimentonun çekme performansına olumlu katkı sağladığını göstermiştir. Her iki çimento tipinde de %5 PET katkısı yarmada çekme dayanımı değerini en yüksek değerine ulaştırmıştır.
- Eğilme mukavemeti sonuçları da benzer bir eğilim izlemiş ve CEM II 42.5 karışımları diğer çimento tipine göre daha iyi performans göstermiştir. Referans (P0) karışım en yüksek artış oranını kaydetmiş, PET katkılı karışımlar, özellikle P1 ve P3, da önemli iyileşmeler göstermiştir. Her iki çimento tipinin kullanımıyla elde edilen karışımlar arasında en yüksek eğilme dayanımı, %3 PET katkısıyla elde edilmiştir. CEM II 32.5 çimento tipi için %10'a kadar, CEM II 42.5 için ise %5'e kadar olan PET ilavesi betonun eğilme dayanımını artırmıştır. Bu sonuçlar, optimize edilmiş

karışımların çimentonun mekanik özelliklerini geliştirme potansiyelini vurgulamaktadır.

- CEM II 42.5 çimento bazlı beton karışımlar, CEM II 32.5 çimento ile üretilenlere kıyaslandığında, %5'e kadar (%5 dahil) PET içeren CEM II 42.5 çimentolu karışımlar, donma-çözülme döngülerine karşı daha yüksek direnç göstermiştir. Donma-çözülme döngüsüne maruz kalan ve kalmayan %10 ve %20 PET içerikli beton karışımların basınç dayanımları arasındaki farklar minimum düzeyde kalmış olduğundan, %10 ve %20 PET içerikli beton karışımların donma-çözülme döngülerinden önemli ölçüde etkilenmediği söylenebilir.
- CEM II 32.5 çimento ile üretilen tüm referans ve PET katkılı beton numuneler, 100°C ve 150°C sıcaklıklara maruz kaldıklarında basınç dayanımı değerleri açısından daha iyi performans göstermiştir. Bununla birlikte, 200°C ve 300°C sıcaklıklarda tüm numunelerin basınç dayanımı değerleri azalmıştır. Buna karşın, CEM II 42.5 çimento içeren beton karışımları, normal sıcaklık koşullarındaki değerlerle karşılaştırıldığında, dikkate alınan tüm yüksek sıcaklıklarda nispeten daha düşük basınç dayanımı değerleri ile karakterize edilmiştir. Gözlemlenen düşüşler, 300°C'de basınç dayanımında önemli bir düşüş göstermiş olan P20 beton numunesi hariç, CEM II 32.5 içeren karışımlardaki düşüslere nazaran daha az belirgindir.
- SEM ve EDS analizleri, betona PET ilavesinin betonun iç yapısını ve kimyasal özelliklerini değiştirdiğini göstermiştir. Daha yüksek miktarda PET, normal koşullar altında C-S-H jel oluşumunu azaltmış ve daha düşük basınç dayanımına neden olmuştur. Ancak PET katkılı karışımlar donma-çözülme döngülerinden sonra daha iyi performans göstermiştir. PET, donma çözülme ortamında betonun yapısını korumasına yardımcı olarak betonun mukavemet kaybını en aza indirmiştir.

Genel olarak, çalışmanın beton numuneler üzerinde gerçekleştirilen testlere dair bu kısmının bulguları, polietilen tereftalatın (PET) beton üretiminde kullanılma potansiyeli olduğunu göstermektedir. PET'in betona dahil edilmesi sayesinde, mevcut PET atık miktarının azaltılmasına ve geleneksel beton malzemeleriyle ilişkili doğal kaynakların aşırı tüketiminin sınırlandırılmasına yardımcı olabilecektir.

5.2 Betonarme Kiriş Numunelerin Test Sonuçları

Deneysel çalışmaların ikinci aşamasında, polietilen tereftalat (PET) ilavesinin betonarme kirişlerin davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla CEM IV 32,5 çimento kullanılarak PET katkısız (P0), ve PET katkılı (%1, %3, %5, %10 ve %20) beton karışımları hazırlanmıştır. Bu karışımlarla üretilen betonarme kirişlerin, çekme donatısı miktarının kiriş davranışına etkisini ve etriye aralığının kiriş davranışına etkisini incelemek üzere iki farklı donatı konfigürasyon grubu oluşturulmuştur. Birinci grupta etriye çapı ve aralığı sabit tutulup ($\phi 8$ mm/10 cm) çekme donatısı çapı değiştirilerek ($\phi 8$ mm, $\phi 10$ mm ve $\phi 12$ mm) 18 adet betonarme kiriş numunesi imal edilmiştir. İkinci grupta ise çekme donatısı çapı 12 mm olarak sabit tutulup, 8 mm çapındaki etriyeler 16 cm, 20 cm ve 27 cm aralıklarla yerleştirilerek yine 18 adet betonarme kiriş numunesi imal edilmiştir. Betonarme kirişlerin deney sonuçları şu şekilde özetlenmiştir:

- PET katkısı, betonarme kirişlerin yapısal davranışını etkilemiş ve PET katkı oranı ve çekme donatı çapına bağlı olarak mukavemet ve süneklik değerleri değişmiştir. Çekme donatısı çapının (örneğin 12 mm) %5'e kadar PET oranıyla birlikte artması, taşıma kapasitesini ve rijitliği arttırmıştır. Daha yüksek PET katkısı oranlarında, sünekliği korumak için daha küçük çaplı çekme donatısı kullanılması tavsiye edilmiştir.
- PET içeriği ve etriye aralığının betonarme kirişlerin yapısal performansı üzerindeki etkisi incelendiğinde, %3 ile %5 arasındaki PET içeriği, taşıma kapasitesi ve süneklik arasında en dengeli iyileşmeyi sağlamıştır. Daha yüksek PET içeriği (%10 ve %20) mukavemeti düşürürken, deformasyon kapasitesini artırma eğiliminde olmuştur. Ayrıca, özellikle 16 cm gibi dar etriye aralığına sahip numuneler, PET içeriğinden bağımsız olarak tutarlı bir şekilde oldukça iyi yapısal davranış sergilemiş ve bu durum, optimum performans elde etmek için dar etriye aralığının önemini ortaya koymuştur.

Genel olarak, bu kısmın sonuçları, polietilen tereftalatın (PET) betonarme kirişlerde katkı maddesi olarak kullanılabilmesini açıkça göstermiştir. PET atıkların beton karışımlarına eklenmesi, bu atıkların doğadaki miktarının en aza indirilmesine katkıda bulunurken, aynı zamanda geleneksel beton bileşenlerinde tipik olarak kullanılan doğal malzemelere olan bağımlılığı da azaltabilecektir.

5.3 Öneriler ve Gelecek Çalışmalar

PET içerikli beton ve betonarme kirişin karakteristik özellikleri üzerine yoğunlaşan bu tez çalışması PET atığının beton üretiminde kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Basınç, yarmada çekme, eğilme, betonarme kiriş deneylerine göre beton hacminin %5'ine kadar (%5 dahil) PET kullanımı mümkün görülmektedir. Hatta donma çözülmeye maruz kalma durumu olan beton elemanlarda %20'ye kadar PET kullanımının mümkün olduğunu bu çalışma ortaya koymuştur.

Bu çalışmada elde edilen bulgular aşağıda belirtilen gelecek çalışmalar ile daha da güçlendirilebilir:

- PET katkısı yanında, bağlayıcı özelliği bulunan başka bir endüstriyel atık türünün de karışıma dahil edildiği beton numuneler üretilip davranışa etkisi ve kullanılabilirliği araştırılabilir.
- Bu çalışmada PET içeriğinin artmasıyla betonarme kirişlerin daha sünek bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Gelecek çalışmalarda, PET katkılı beton kullanılan betonarme çerçeve sistemlerin tekrarlı yükleme altındaki dinamik davranışı incelenebilir.
- Farklı oranlarda PET katkılı, eksenel yük ve momente maruz betonarme kolonların davranışı bir inceleme konusu olabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abbas, S. N., Qureshi, M. I., Alkharisi, M. K., Alturki, M., ve Ahmad, Z. (2024). Combined effect of silica fume and various fibers on fresh and hardened properties of concrete incorporating HDPE aggregates. *Construction and Building Materials*, 445. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137940>
- Abdolkhani, H., Kazeminezhad, E., ve Safakhah, S. (2024). Evaluating the effect of polyethylene terephthalate (PET) on the structural performance of reinforced concrete beams: experimental and numerical. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(3), 71. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01380-1>
- Adrados, A., de Marco, I., Caballero, B. M., López, A., Laresgoiti, M. F., ve Torres, A. (2012). Pyrolysis of plastic packaging waste: A comparison of plastic residuals from material recovery facilities with simulated plastic waste. *Waste Management*, 32(5), 826-832. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.016>
- Ahmed, A., Ahmad, S., Musaa, A. E. S., ve Al-Osta, M. A. (2024). Properties of concrete incorporating recycled coarse aggregates and recycled plastic fine aggregates. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(5). <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01470-0>
- Ahmed, H. U., Mohammed, A. S., ve Mohammed, A. A. (2023). Engineering properties of geopolymer concrete composites incorporated recycled plastic aggregates modified with nano-silica. *Journal of Building Engineering*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106942>
- Akçaözöğlü, S., Atış, C. D., ve Akçaözöğlü, K. (2010). An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Management*, 30(2), 285-290. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.033>
- Akinyele, J. O., Salim, R. W., ve Oyeti, G. (2015). Use of recycled polypropylene grains as partial replacement of fine aggregate in reinforced concrete beams. *Engineering Structures and Technologies*, 6(4), 184-190. <https://doi.org/10.3846/2029882X.2015.1070697>
- Al-Hadithi, A. I., ve Abbas, M. A. (2018). The effects of adding waste plastic fibers on the mechanical properties and shear strength of reinforced concrete beams. *Iraqi Journal of Civil Engineering*, 12(1), 110-124. <https://doi.org/10.37650/ijce.2018.142480>
- Alani, A. H., Bunnori, N. M., Noaman, A. T., ve Majid, T. A. (2019). Durability performance of a novel ultra-high-performance PET green concrete (UHPPGC). *Construction and Building Materials*, 209, 395-405. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.088>
- Albano, C., Camacho, N., Hernández, M., Matheus, A., ve Gutiérrez, A. (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>

- Almeshal, I., Tayeh, B. A., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., ve 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>
- Assaad, J. J., Khatib, J. M., ve Ghanem, R. (2022). Bond to bar reinforcement of PET-modified concrete containing natural or recycled coarse aggregates. *Environments*, 9(1), 8. <https://doi.org/10.3390/environments9010008>
- ASTM (2017) *C666 Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*. West Conshohocken, PA, ASTM International.
- Azhdarpour, A. M., Nikoudel, M. R., ve 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>
- Babu, D. S., Ganesh Babu, K., ve Wee, T. H. (2005). Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1218-1223. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.015>
- Bandelt, M. J., ve Billington, S. L. (2016). Impact of Reinforcement Ratio and Loading Type on the Deformation Capacity of High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites Reinforced with Mild Steel. *Journal of Structural Engineering (United States)*, 142(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001562](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001562)
- Batayneh, M., Marie, I., ve Asi, I. (2007). Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste Management*, 27(12), 1870-1876. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.026>
- Bensted, J., 2002, in Bensted, J., and Barnes, P., eds., *Structure and Performance of Cement*: London, Newyork, Spon Press.
- Borg, R. P., Baldacchino, O., ve Ferrara, L. (2016). Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 108, 29-47. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.029>
- Chen, B., ve Liu, J. (2004). Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1259-1263. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.014>
- Chen, S. J., Liu, R. A., Huang, X. Y., Chen, Z. B., ve Lin, J. X. (2024). Eco-friendly strain-hardening cementitious composites with recycled PET fine aggregate: Mechanical behavior and environmental benefits. *Journal of Building Engineering*, 96. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110621>
- Choi, Y. W., Moon, D. J., Chung, J. S., ve 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., ve 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>
- da Silva, J. B., Pepe, M., ve Toledo, R. D. (2020). High temperatures effect on mechanical and physical performance of normal and high strength recycled aggregate concrete. *Fire Safety Journal*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103222>
- De Schepper, M., Van den Heede, P., Van Driessche, I., ve De Belie, N. (2014). Life Cycle Assessment of Completely Recyclable Concrete. *Materials*, 7(8), 6010-6027. <https://doi.org/10.3390/ma7086010>
- Donatello, S., Fernández-Jimenez, A., ve Palomo, A. (2013). Very High Volume Fly Ash Cements. Early Age Hydration Study Using Na₂SO₄ as an Activator. *Journal of the American Ceramic Society*, 96(3), 900-906. <https://doi.org/10.1111/jace.12178>
- Donatello, S., Kuenzel, C., Palomo, A., ve Fernández-Jiménez, A. (2014). High temperature resistance of a very high volume fly ash cement paste. *Cement & Concrete Composites*, 45, 234-242. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.010>
- Duraiswamy, S., Neelamegam, P., VishnuPriyan, M., ve Alaneme, G. U. (2024). Impact of plastic waste fiber and treated construction demolition waste on the durability and sustainability of concrete. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78107-w>
- Falih, R. S., Dawood, A. O., ve Al-Khazraji, H. (2020). *Structural behaviour of concrete beams reinforced with polyethylene terephthalate (PET) bottles wastes bars*. In Proceedings IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 928.
- Famy, C., Scrivener, K. L., ve Taylor, H. F. W., 2002, in Bensted, J., and Barnes, P., eds., *Structure and Performance of Cement*: London, Newyork, Spon Press.
- Fehérvári, S. (2022). The Effect of Elevated Temperature on Ordinary Portland Cements. *Periodica Polytechnica-Civil Engineering*. <https://doi.org/10.3311/PPci.20519>
- Ferreira, L., De Brito, J., ve Saikia, N. (2012). Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate. *Construction and Building Materials*, 36, 196-204. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.098>
- Foti, D. (2011). Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1906-1915. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.066>
- 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>
- Gartner, E. M., Young, J. F., Damidot, D. A., ve Jawed, I., 2002, in Bensted, J., and Barnes, P., eds., *Structure and Performance of Cement*: London, Newyork, Spon Press.

- Gayake, S. B., ve Desai, A. K. (2024). Innovative solutions for potential use of waste polyethylene terephthalate bottle cap as aggregates in concrete. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(8). <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01623-1>
- Ghaemi-Fard, M., Eskandari-Naddaf, H., ve Ebrahimi, G. R. (2018). Genetic prediction of cement mortar mechanical properties with different cement strength class after freezing and thawing cycles. *Structural Concrete*, 19(5), 1341-1352. <https://doi.org/10.1002/suco.201700196>
- Gravina, R. J., Xie, T., Bennett, B., ve Visintin, P. (2021). HDPE and PET as Aggregate Replacement in Concrete: Life-cycle assessment, Material Development and a case study. *Journal of Building Engineering*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103329>
- Gupta, S., Rao, V. K., ve Sengupta, J. (2008). Evaluation of polyester fiber reinforced concrete for use in cement concrete pavement works. *Road Materials and Pavement Design*, 9(3), 441-461. <https://doi.org/10.1080/14680629.2008.9690127>
- Hameed, A. M., ve 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>
- Hameed, A. M., ve Hamza, M. T. (2018). *Characteristics of polymer concrete produced from wasted construction materials*. In Proceedings International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability (TMREES), Athens, GREECE, 157, Elsevier Science Bv, AMSTERDAM, 43-50.
- Hanuseac, L., Dumitrescu, L., Barbuta, M., Baran, I., ve Bejan, G. (2020). Eco-Mechanical Index of Lightweight Concrete Mixtures with Recycled Materials. *Procedia Manufacturing*, 46, 667-674. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.095>
- Haque, M. R., Hossain, M. B., Roknuzzaman, M., Emu, N.-A.-A., ve Jahan, F. T. (2021). Performance of partially replaced plastic bottles (PET) as coarse aggregate in producing green concrete. *Journal of Brilliant Engineering*, 4, 15-19. <https://doi.org/https://doi.org/10.36937/ben.2021.004.00X>
- Hawileh, R. A., Mhanna, H. H., Al Rashed, A., Abdalla, J. A., ve Naser, M. (2022). Flexural behavior of RC beams externally bonded with polyethylene terephthalate (PET) fiber reinforced polymer (FRP) laminates. *Engineering Structures*, 256, 114036. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114036>
- Heikal, M. (2000). Effect of temperature on the physico-mechanical and mineralogical properties of Homra pozzolanic cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 30(11), 1835-1839. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00403-8](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00403-8)
- Hossain, K. M. A. (2006). High strength blended cement concrete incorporating volcanic ash: Performance at high temperatures. *Cement & Concrete Composites*, 28(6), 535-545. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.01.013>
- Hou, G. H., Shen, X. D., ve Xu, Z. Z. (2007). Composition design for high C3S cement clinker and its mineral formation. *Journal of Wuhan University of Technology-*

Materials Science Edition, 22(1), 56-60. <https://doi.org/10.1007/s11595-005-1056-8>

- Islam, J., Shahjalal, M., ve Haque, N. M. A. (2022). Mechanical and durability properties of concrete with recycled polypropylene waste plastic as a partial replacement of coarse aggregate. *Journal of Building Engineering*, 54, 19. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104597>
- Islam, M. J., Meherier, M. S., ve Islam, A. K. M. R. (2016). Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and harden properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 125, 946-951. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.128>
- Islam, M. J., ve Shahjalal, M. (2021). Effect of polypropylene plastic on concrete properties as a partial replacement of stone and brick aggregate. *Case Studies in Construction Materials*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00627>
- Ismail, Z. Z., ve 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>
- Jain, A., Siddique, S., Gupta, T., Jain, S., Sharma, R. K., ve Chaudhary, S. (2021). Evaluation of concrete containing waste plastic shredded fibers: Ductility properties. *Structural concrete*, 22(1), 566-575. <https://doi.org/10.1002/suco.201900512>
- Jouyandeh, R. T., Hemmati, A., ve Mortezaei, A. (2023). Using woven recycled plastic fibers in reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 404. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133262>
- Juki, M. I., Awang, M., Annas, M. M. K., vd (2013). 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>
- Kermeli, K., Edelenbosch, O. Y., Crijns-Graus, W., van Ruijven, B. J., Mima, S., van Vuuren, D. P., ve Worrell, E. (2019). The scope for better industry representation in long-term energy models: Modeling the cement industry. *Applied Energy*, 240, 964-985. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.252>
- Keshavarz, Z., ve Mostofinejad, D. (2019). Porcelain and red ceramic wastes used as replacements for coarse aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 195, 218-230. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.033>
- Khalid Ali, O., Ismail Al-Hadithi, A., ve Tareq Noaman, A. (2022). Flexural performance of layered PET fiber reinforced concrete beams. *Structures*, 35, 55-67. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.11.007>
- Khalid, H., Yasin, Y., Farooq, M. U., Munir, U., Qaisrani, M. A., ve Shahani, S. (2025). An experimental investigation of mechanical properties of concrete composites reinforced with PET fibers as per ASTM standard. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2025.100241>

- Khoury, G. A. (1992). Compressive strength of concrete at high-temperatures: a reassessment. *Magazine of Concrete Research*, 44(161), 291-309. <https://doi.org/10.1680/mac.1992.44.161.291>
- Kim, S. B., Yi, N. H., Kim, H. Y., Kim, J. H. J., ve Song, Y. C. (2010). Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 32(3), 232-240. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.002>
- Kirthika, S., Singh, S., ve Chourasia, A. (2020). Alternative fine aggregates in production of sustainable concrete-A review. *Journal of cleaner production*, 268, 122089.
- Kishore, K., ve Gupta, N. (2020). Application of domestic & industrial waste materials in concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2926-2931. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.604>
- Koo, B.-M., Kim, J.-H. J., Kim, S.-B., ve Mun, S. (2014). Material and structural performance evaluations of Hwangtoh admixtures and recycled PET fiber-added eco-friendly concrete for CO2 emission reduction. *Materials*, 7(8), 5959-5981. <https://doi.org/10.3390/ma7085959>
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., ve Panarese, W. C., 2003. *Design and control of concrete mixtures*.
- Li, H., Liebscher, M., Yang, J., vd (2022). Electrochemical oxidation of recycled carbon fibers for an improved interaction toward alkali-activated composites. *Journal of Cleaner Production*, 368. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133093>
- Lima, P. R. L., Leite, M. B., ve Santiago, E. Q. R. (2010). Recycled lightweight concrete made from footwear industry waste and CDW. *Waste Management*, 30(6), 1107-1113. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.02.007>
- Lublóy, É., Kopecskó, K., Balázs, G. L., Restás, A., ve Szilágyi, I. M. (2017). Improved fire resistance by using Portland-pozzolana or Portland-fly ash cements. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 129(2), 925-936. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6245-0>
- Meena, A., Surendranath, A., ve Ramana, P. (2022). Assessment of mechanical properties and workability for polyethylene terephthalate fiber reinforced concrete. *Materials Today: Proceedings*, 50, 2307-2314. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.054>
- Mehvish, F., Ahmed, A., Saleem, M. M., ve Saleem, M. A. (2020). Characterization of concrete incorporating waste polythene bags fibers. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences-Basel*.
- Mohamed, O. A., Al Hawat, W., ve Kewalramani, M. (2017). The correlation between splitting tensile strength and flexural strength of self consolidating concrete. *Key Engineering Materials*, 753, 326-330. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.753.326>
- Mohammed, T. K., ve Hama, S. M. (2022). Mechanical properties, impact resistance and bond strength of green concrete incorporating waste glass powder and waste fine

- plastic aggregate. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00652-4>
- Ochi, T., Okubo, S., ve Fukui, K. (2007). Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement and Concrete Composites*, 29(6), 448-455. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.02.002>
- Odler, I., 1991. *Strength of cement*, 1359-5997.
- Osiak, M., Pregowska, A., Wilczewski, S., Urbanska, W., ve Giersig, M. (2022). Waste Management for Green Concrete Solutions: A Concise Critical Review. *Recycling*, 7(3), 23. <https://doi.org/10.3390/recycling7030037>
- Özaşık, N., ve Eren, Ö. (2022). Influence of recycled polyethylene terephthalate fibres on plastic shrinkage and mechanical properties of concrete. *Frontiers of Structural and Civil Engineering Journal*, 16(6), 792-802. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11709-022-0849-6>
- Ozbakkaloglu, T., Gu, L., ve Gholampour, A. (2017). Short-term mechanical properties of concrete containing recycled polypropylene coarse aggregates under ambient and elevated temperature. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002046](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002046)
- Patil, D. M., ve Sangle, D. (2019). Experimental study of waste glass powder as partial replacement of cement in concrete. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering Technology*.
- Paulay, T., ve Priestley, M. J. N. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*.
- Pelisser, F., Montedo, O. R. K., Gleize, P. J. P., ve Roman, H. R. (2012). Mechanical Properties of Recycled PET Fibers in Concrete. *Materials Research-Ibero-American Journal of Materials*, 15(4), 679-686. <https://doi.org/10.1590/s1516-14392012005000088>
- Phrompet, C., Sriwong, C., Maensiri, S., Chindapasirt, P., ve Ruttanapun, C. (2018). Optical and dielectric properties of nano-sized tricalcium aluminate hexahydrate (C3AH6) cement. *Construction and Building Materials*, 179, 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.180>
- Phrompet, C., Sriwong, C., ve Ruttanapun, C. (2019). Mechanical, dielectric, thermal and antibacterial properties of reduced graphene oxide (rGO)-nanosized C3AH6 cement nanocomposites for smart cement-based materials. *Composites Part B-Engineering*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107128>
- Prakhash, N., Sakthivel, P., Karthick, M. D., Swaminathan, P., ve Rahman, D. Z. (2020). Mechanical properties of RCC column with kevlar and banana fibre wrapping. *Materials Today: Proceedings*, 37, 2986-2990. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.714>
- Priyan, M. V., Annadurai, R., Onyelowe, K. C., Alaneme, G. U., ve Giri, N. C. (2023). Recycling and sustainable applications of waste printed circuit board in concrete

- application and validation using response surface methodology. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43919-9>
- Qaidi, S., Al-Kamaki, Y. S. S., Al-Mahaidi, R., vd (2022). Investigation of the effectiveness of CFRP strengthening of concrete made with recycled waste PET fine plastic aggregate. *PLoS ONE*, 17(7 July). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0269664>
- Ramadevi, K., ve Manju, R. (2012). Experimental investigation on the properties of concrete with plastic PET (bottle) fibres as fine aggregates. *International journal of emerging technology and advanced engineering*, 2(6), 42-46.
- Ridwan, F. F., Subari, S., ve Yulius, E. (2014). Pengaruh Penggunaan Cacahan Gelas Plastik Polypropylene (PP) terhadap Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton. *Jurnal Bentang*, 2(1), 24-37.
- Sabaa, B., ve Ravindrarajah, R. S. (1997). *Engineering properties of lightweight concrete containing crushed expanded polystyrene waste*. In Proceedings Proceedings of the symposium MM: advances in materials for cementitious composites, Boston, MA, USA, 1-3.
- Saikia, N., ve De Brito, J. (2013). Waste polyethylene terephthalate as an aggregate in concrete. *Materials Research*, 16(2), 341-350. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000017>
- Saikia, N., ve 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>
- Samadi, M., Baghban, M. H., Kubba, Z., vd (2022). Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams under Instantaneous Loading: Effects of Recycled Ceramic as Cement and Aggregates Replacement. *Buildings*, 12(4), 19. <https://doi.org/10.3390/buildings12040439>
- Sambhaji, P. P. (2016). Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *International Journal of Advance Engineering Research and Science*, 3(12), 115-118. <https://doi.org/10.22161/ijaers/3.12.23>
- Santamouris, M., ve Vasilakopoulou, K. (2021). Present and future energy consumption of buildings: challenges and opportunities towards decarbonisation. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics Energy*, 1, 100002. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2021.100002>
- Shibayama, A., ve Nishiyama, M. (2023). Shear strength of reinforced fly-ash-based geopolymer concrete beams with and without shear reinforcement. *Structures*, 50, 603-614. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.060>
- Silva, R. V., De Brito, J., ve Saikia, N. (2013). Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.017>

- Sjah, J., Chandra, J., Rastandi, J. I., ve Arijoeni, E. (2018). The effect of usage of crushed polypropylene plastic waste in mechanical properties of concrete. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(7), 1495-1505.
- Skripkiūnas, G., Nagrockienė, D., Girskas, G., Vaičienė, M., ve Baranauskaitė, E. (2013). The cement type effect on freeze–thaw and deicing salt resistance of concrete. *Procedia engineering*, 57, 1045-1051. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.132>
- Skvára, F., ve Sevcík, V. (1999). Influence of high temperature on gypsum-free Portland cement materials. *Cement and Concrete Research*, 29(5), 713-717.
- Sri Ravindrarajah, R., ve Tam, C. T. (1984). Flexural strength of steel fibre reinforced concrete beams. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 6(4), 273-278. [https://doi.org/10.1016/0262-5075\(84\)90022-8](https://doi.org/10.1016/0262-5075(84)90022-8)
- Sri Ravindrarajah, R., ve Tuck, A. J. (1994). Properties of hardened concrete containing treated expanded polystyrene beads. *Cement and Concrete Composites*, 16(4), 273-277. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(94\)90039-6](https://doi.org/10.1016/0958-9465(94)90039-6)
- Steyn, Z., Babafemi, A., Fataar, H., ve Combrinck, R. (2021). Concrete containing waste recycled glass, plastic and rubber as sand replacement. *Construction and Building Materials*, 269, 121242. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121242>
- Sua-iam, G., ve Jamnam, S. (2023). Influence of calcium carbonate on green self-compacting concrete incorporating porcelain tile waste as coarse aggregate replacement. *Case Studies in Construction Materials*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02366>
- Supit, S. W. (2022). Utilization of recycled PET plastic waste as replacement of coarse aggregate in pervious concrete. *Materials Today: Proceedings*, 66, 2990-2995. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.573>
- Tantawy, M. (2017). Effect of high temperatures on the microstructure of cement paste. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 5(11), 33. <https://doi.org/10.4236/msce.2017.511004>
- Tayeh, B. A., Almeshal, I., Magbool, H. M., Alabduljabbar, H., ve 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>
- Thomas, L. M., ve Moosvi, S. A. (2020). Hardened properties of binary cement concrete with recycled PET bottle fiber: An experimental study. *Materials Today: Proceedings*, 32, 632-637. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.025>
- TS 706 EN 12620 (2003) *Beton Agregaları*. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-5 (2002) *Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 3: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini*. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

- Tursunov, O., Karimov, I., Śpiewak, K., vd (2024). Comprehensive study on social, compositional and thermal aspects of household solid waste for waste-to-energy potential estimation in Tashkent city. *Energy Reports*, 12, 430-441. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.06.035>
- Ullah Khan, S., ve Ayub, T. (2020). Flexure and shear behaviour of self-compacting reinforced concrete beams with polyethylene terephthalate fibres and strips. *Structures*, 25, 200-211. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.02.023>
- Válek, J., Bodnárová, L., ve Novosad, P. (2016). *Failure of Concrete at High Temperatures-The Influence of the Type of Cement*. In Proceedings Materials Science Forum, 865, Trans Tech Publ, 190-195.
- Watari, T., Cao, Z., Serrenho, A. C., ve Cullen, J. (2023). Growing role of concrete in sand and climate crises. *iScience*, 26(5). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106782>
- Wattanavichien, P., ve Iwanami, M. (2024). Investigation of the mechanical, microstructure, and durability properties of concrete with fine uniform and non-uniform polyethylene terephthalate (PET) aggregates. *Cleaner Materials*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100267>
- Whiteley, K. S., Heggs, T. G., Koch, H., Mawer, R. L., ve Immel, W. (2005). *Polyolefins in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA., Weinheim.
- Yan, Y., Tang, J., ve Geng, G. (2023). Exploring microstructure development of C-S-H gel in cement blends with starch-based polysaccharide additives. *Case Studies in Construction Materials*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02589>
- Yang, S., Yue, X., Liu, X., ve Tong, Y. (2015). Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles. *Construction and Building Materials*, 84, 444-453. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.038>
- Zebua, W. S. B. (2017). The influence of PET plastic waste gradations as coarse aggregate towards compressive strength of light concrete. *Procedia Engineering*, 171, 614-619. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.394>
- Zeybek, Ö., Basaran, B., Aksoylu, C., vd (2024). Shear Performance in Reinforced Concrete Beams with Partial Aggregate Substitution Using Waste Glass: A Comparative Analysis via Digital Imaging Processing and a Theoretical Approach. *Acs Omega*, 9(40), 41662-41675. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c05655>