

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

PLASTİK ATIKLARIN BETONUN MEKANİK VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Mükremin Berk KESİMCİ

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmet ULUSU

TEZ JÜRİ ÜYELERİ
Prof. Dr. Ahmet BİLGİL
Dr. Öğr. Üyesi İsmet ULUSU
Dr. Öğr. Üyesi Ufuk KANDİL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ERZİNCAN, 2025

© 2025 [Mükremin Berk KESİMCİ]. Tüm hakları saklıdır.

ÖZET

PLASTİK ATIKLARIN BETONUN MEKANİK VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Mükremin Berk KESİMCİ

**Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmet ULUSU
2025, 65 sayfa**

Bu tez çalışmasında, atık plastik katkıların beton imalat sürecinde katkı malzemesi olarak kullanılmasının mekanik ve fiziksel özellikler üzerindeki etkileri deneysel yöntemlerle araştırılmıştır. Çalışmada, geri dönüşüm malzemesi olarak PET (polietilen tereftalat), PP (polipropilen) ve PE (polietilen) türündeki plastik atıklar, %0.5, %1.0 ve %1.5 oranlarında beton karışımlarına eklenmiş ve elde edilen numuneler üzerinde basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, darbe dayanımı, birim hacim ağırlık ve ısı iletkenliği özellikleri incelenmiştir. Deneysel sonuçlarına göre, plastik katkılarla betonun basınç dayanımında %1.5 katkı oranında yaklaşık %13'e varan azalma meydana gelmiştir. Buna karşın, yarmada ve eğilmede çekme dayanımlarında ise %1.5 PET katkısı ile yaklaşık %12'ye varan dayanım artışı artış gözlenmiştir. Ayrıca, %1.5 PP katkısı ile darbe dayanımı yaklaşık %55 artmıştır. Birim hacim ağırlık açısından, plastik katkılarla betonun birim hacim ağırlığında %5-6 arası azalma meydana gelmiştir. Isı iletkenliği bakımından ise %1.5 PE katkı oranında yaklaşık %11'lik bir düşüş elde edilmiştir. Bu da plastik katkıların betonun termal yalıtım özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir. Bu çalışma, plastik atık katkılarının beton üretiminde mekanik ve fiziksel olarak uygulanabilirliğini ortaya koymakta ve çevresel sürdürülebilirlik açısından potansiyel katkılarını değerlendirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Plastik atıklar, beton katkı malzemesi, mekanik özellikler, fiziksel özellikler, geri dönüşüm

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF PLASTIC WASTE ON THE MECHANICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF CONCRETE

Mükremin Berk KESİMCİ

**Master's Thesis, Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and
Technology,**

Department of Civil Engineering

Advisor: Asst. Prof. Dr. İsmet ULUSU

2025, 65 pages

In this thesis, the effects of using waste plastic additives as additives in the concrete manufacturing process on mechanical and physical properties were investigated using experimental methods. In the study, PET (polyethylene terephthalate), PP (polypropylene), and PE (polyethylene) plastic waste was added to concrete mixtures at ratios of 0.5%, 1.0%, and 1.5%, and the compressive strength, tensile strength in flexural testing, tensile strength in bending, impact resistance, unit volume weight, and thermal conductivity properties of the resulting samples were examined. According to the experimental results, the compressive strength of concrete with plastic additives decreased by approximately 13% at a 1.5% additive ratio. In contrast, tensile strength in flexural and bending tests increased by approximately 12% with a 1.5% PET additive. Additionally, the impact strength increased by approximately 55% with a 1.5% PP additive. In terms of unit volume weight, the unit volume weight of concrete with plastic additives decreased by 5-6%. In terms of thermal conductivity, a decrease of approximately 11% was achieved with a 1.5% PE additive ratio. This demonstrates that plastic additives improve the thermal insulation properties of concrete. This study demonstrates the mechanical and physical applicability of plastic waste additives in concrete production and evaluates their potential contributions in terms of environmental sustainability.

Keywords: Plastic waste, concrete admixture, mechanical properties, physical properties, recycling

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında, bilgi birikimi, deneyimi ve akademik rehberliği ile sürecin her aşamasında destek veren danıőmanım Dr. Öğr. Üyesi İsmet ULUSU'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin bilimsel katkıları ve yönlendirici yaklaşımı, çalışmanın başarıyla tamamlanmasında önemli rol oynamıştır. Ayrıca, akademik birikimi ve yol gösterici tavsiyeleri ile çalıőmaya katkıda bulunan Doç. Dr. Hüseyin Yıldırım DALKILIÇ'a teşekkürlerimi iletirim.

Araştırmanın deneysel aőamalarında malzeme temini ve donanım desteği sağlayarak çalışmaların verimli şekilde tamamlanmasına katkıda bulunan tüm laboratuvar personeline gönülden teşekkür ederim. Son olarak, eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen, sabır ve anlayıőlarıyla her zaman yanımda olan aileme őükranlarımı arz ederim.

Mükremin Berk KESİMCİ

Haziran, 2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLOLAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Araştırmaya Genel Bakış.....	1
1.2. Araştırmanın Amacı ve Önemi.....	2
1.3. Plastiklerin Sınıflandırılması	4
1.4. Küresel Plastik Atık Sorunu ve İstatistiksel Veriler	5
1.5. Geri Dönüşüm Süreçleri ve Uygulama Alanları.....	6
1.6. Türkiye’de Atık Yönetimi ve Mevzuat Durumu	9
1.7. Beklenen Sonuçlar ve Etki Değerlendirmesi.....	10
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	12
2.1. Plastik Atık Kavramı, Türleri ve İşlenme Süreci	12
2.2. Betonun Yapısı ve Katkı Maddeleri	13
2.3. Literatür Taraması	15
3. YÖNTEM.....	25
3.1. Araştırma Modeli.....	25
3.2. Kullanılan Malzemeler	26
3.3. Karışım Tasarımı	32
3.4. Numune Hazırlama Süreci.....	35
3.5. Deneysel Testler ve Uygulama Protokolleri.....	37
3.5.1. Basınç dayanım deneyi.....	37
3.5.2. Eğilmede çekme dayanım deneyi.....	38
3.5.3. Yarmada çekme dayanımı deneyi.....	39
3.5.4. Darbe dayanım deneyi	40
3.5.5. Birim hacim ağırlık deneyi	41
3.5.6. Su emme deneyi	42
3.5.7. Isı iletkenliği deneyi	43

3.6. Deneysel Güvenirlik ve İç Doğruluk Önlemleri.....	45
4. BULGULAR	47
4.1.Basınç Dayanımı Bulguları	47
4.2. Yarmada Çekme ve Eğilmede Çekme Dayanımı Bulguları.....	47
4.3. Darbe Dayanımı Bulguları.....	48
4.4. Birim Hacim Ağırlık Bulguları	49
4.5. Su Emme Bulguları	50
4.6. Isı İletkenliği Bulguları.....	51
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	53
5.1 Tartışma.....	53
5.1.1. Basınç dayanımı sonuçları üzerine tartışma	53
5.1.2. Yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımı sonuçları üzerine tartışma	54
5.1.3. Darbe dayanımı sonuçları üzerine tartışma	58
5.1.4. Birim hacim ağırlık sonuçları üzerine tartışma	59
5.1.5. Su emme sonuçları üzerine tartışma	60
5.1.6. Isı iletkenliği sonuçları üzerine tartışma	62
5.2 Sonuç	63
5.3 Öneriler.....	64
KAYNAKÇA	66

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Karışım da atık plastik türlerinin beton üzerine etkileri.....	5
Tablo 2. Muhtemel teknik, çevresel ve ekonomik kazanımlar	11
Tablo 3. Plastik türleri ve temel özellikleri	13
Tablo 4. İnce ve iri agregaların fiziksel ve kimyasal özellikleri	27
Tablo 5. Elek analizi tablosu	28
Tablo 6. Polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcının özellikleri.....	31
Tablo 7. Kullanılan malzeme tedarikçileri ve özellikleri	31
Tablo 8. Plastik katkı türü ve oranlarına göre karışım içerikleri(kg/m ³).....	34
Tablo 9. Basınç dayanım testi sonuçları (MPa).....	47
Tablo 10. Çekme dayanımları (MPa)	48
Tablo 11. Darbe dayanım test sonuçları	48
Tablo 12. Taze ve sertleşmiş beton birim hacim ağırlıkları(kg/m ³)	49
Tablo 13. Su Emme Oranları(%).....	50
Tablo 14. Isı iletkenliği katsayısı (W/m*K)	51

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Plastik atıkların bertaraf yöntemlerine göre dağılımı	6
Şekil 2. Plastik atıkların ayrıştırılması ve atık grubuna göre parçalanması.....	7
Şekil 3. Votorantim CEM I 42,5 R tip Portland çimentosu fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	26
Şekil 4. Karışım agregası granülometri eğrisi	28
Şekil 5. Lif ve Granül formunda atık plastik beton katkıları.....	30
Şekil 6. Numune kalıpları.....	35
Şekil 7. Deneylerde kullanılmak üzere hazırlanmış kürleme işlemleri bitmiş beton numuneleri.....	36
Şekil 8. Basınç dayanımı test cihazı.	38
Şekil 9. Katkı türü ve oranına göre basınç dayanımı değerleri (MPa)	54
Şekil 10. Katkı türü ve oranına bağlı olarak çekme dayanımı değerleri (MPa)	55
Şekil 11. Yarmada çekme dayanımı test cihazı ve deney numunesi.....	56
Şekil 12. Katkı türü ve oranına göre 28 günlük eğilmede çekme dayanımı değerleri (MPa).....	57
Şekil 13. Eğilmede çekme dayanım deneyi.....	57
Şekil 14. Katkı türü ve oranına göre darbe dayanımı değerleri.....	58
Şekil 15. Sertleşmiş beton numunesinin tartım işlemi	59
Şekil 16. Katkı türü ve oranına göre ortalama birim hacim ağırlık değerleri (kg/m ³).....	60
Şekil 17. Katkı türü ve oranına göre su emme oranları (%).....	61
Şekil 18. Katkı türü ve oranına göre ısı iletkenlik değerleri (W/m*K).....	62

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Yüzey Alanı (mm ²)
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASTM C150	Portland Çimentosu Standardı
b	Genişlik (mm)
d	Yükseklik (mm)
D	Çap (mm)
EN	European Norm
EIA	Environmental Impact Assessment
EPD	Environmental Product Declaration
GWP	Gobal Warning Potential
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
LDPE	Düşük yoğunluklu Polietilen
J	Joule
KJ	Kilojoule
KN	Kilonewton
KG	Kilogram
L	Destek Açıklığı (mm)
LCA	Life Cycle Assessment
m	Numunenin Kütlesi (kg)
MPa	Megapascal
N	Newton
P	Maksimum Yük (N)
PE	Polietilen
PET	Polietilen Tereftalat
PP	Polipropilen
PS	Polistiren
PVC	Polivinil Klorür
PH	Asitlik Bazlık Derecesi
RH	Bağıl Nem
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Ss	Standart sapma
TS EN 206	Beton Standardı

TSE	Türk Standartları Enstitüsü
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UNEP	United Nations Environment Programme
V	Hacim (m ³)
W/m*K	Watt/Metre-Kelvin (Isı İletkenliği Birimi)
W _d	Kuru Ağırlık
W _s	Doygun Ağırlık
g/cm ³	Gram/Santimetreküp (Yoğunluk Birimi)
kg/m ³	Kilogram/Metreküp (Yoğunluk Birimi)
mPa·s	Milipascal-Saniye (Viskozite Birimi)
t/m ³	Ton/Metreküp (Birim Ağırlık)
w/c	Su/Çimento Oranı
μ	Mikro
μm	Mikrometre
f _c	Basınç dayanımı (MPa)
f _r	Eğilme dayanımı (MPa)
f _{ct}	Bölünme Çekme Dayanımı (MPa)
γ beton	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)
ΔT	Sıcaklık Farkı (K)
Q	Isı Akışı (W)
W _{iri}	İri agregaya ağırlığı
W _{ince}	İnce agregaya ağırlığı
V _{iri}	İri agregaya hacmi
V _{ince}	İnce agregaya hacmi
λ	Isı İletkenlik Katsayısı

1. GİRİŞ

1.1. Araştırmaya Genel Bakış

İnşaat sektörü, günümüz modern toplumlarının altyapısını şekillendiren ve ekonomik kalkınmada temel rol üstlenen kilit sektörlerden biridir. Konut, ticaret, ulaşım ve endüstri gibi birçok alandaki yatırımların büyük bölümü, inşaat faaliyetleri aracılığıyla hayata geçirilmektedir. Ancak sektör yalnızca ekonomik gelişmelerin lokomotifi olmakla kalmayıp, aynı zamanda yüksek oranda doğal kaynakların tüketimi, enerji kullanımı ve atık üretimi ile de önemli çevresel etkiler yaratmaktadır. Nitekim dünya genelinde üretilen toplam atığın yaklaşık %30'unun inşaat faaliyetlerinden kaynaklandığı bilinmektedir (Alotaibi vd., 2023). Bu durum, inşaat sektörünün çevresel etkiler açısından ne denli büyük bir sorun oluşturduğunu net bir şekilde göstermektedir.

Bu bağlamda, günümüzde sürdürülebilirlik kavramı inşaat sektörü için kaçınılmaz bir geri dönüşüm gerekliliği haline gelmiştir. Sürdürülebilir inşaat uygulamaları; enerji verimliliğini artırmayı, malzeme geri dönüşümünü teşvik etmeyi, karbon salınımını azaltmayı ve yaşam döngüsü maliyetlerine dayalı planlama süreçlerini kapsamaktadır. Özellikle yapı malzemelerinin üretim süreçlerinde atmosfere salınan zararlı gazların azaltılması, çevreyi koruma açısından olduğu kadar ekonomik sürdürülebilirlik açısından da büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle, atıkların geri kazanımı ve çevre dostu alternatif yapı malzemelerinin geliştirilmesi, günümüz inşaat mühendisliği çalışmalarının temel odak noktalarından biri haline gelmiştir. Plastik atıklar, dünya çapında çevre kirliliği ve geri dönüşüm potansiyeli açısından kritik bir konu olarak öne çıkmaktadır. Doğaya terk edilen plastiklerin uzun yıllar çözünmeden kalabilmeleri ve toksik etkileri nedeni ile atık plastikler ciddi bir çevre tehdidi oluşturmaktadır (EPA, 2021). Bu nedenle, plastik atıkların doğrudan doğaya bırakılması yerine çeşitli sektörlerde ikincil malzeme olarak değerlendirilmesi, çevresel yükün azaltılmasına katkı sağlarken aynı zamanda ekonomik kazanç imkânı da sunmaktadır.

Plastik atıkların beton üretiminde değerlendirilmesi hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik verimlilik açısından dikkate değer bir çözüm olarak gündeme gelmektedir. Geri dönüştürülmüş plastiklerin beton karışımlarına eklenmesi; atık miktarını azaltmakta, doğal kaynakların tüketimini düşürmekte ve yapıların toplam maliyetlerinde tasarruf sağlamaktadır.

Öte yandan, plastiklerin beton içerisindeki davranışları; mekanik ve fiziksel özellikleri bilimsel yönden araştırılmaya değer konulardan biridir.

1.2. Araştırmanın Amacı ve Önemi

Bu tez çalışmasının temel amacı, plastik atıkların belirli oranlarda beton karışımlarına katılmasının taze ve sertleşmiş betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde inceleyerek, plastik atıkların beton üzerindeki çok yönlü etkilerini analiz etmek, böylece literatüre katkı sağlamak ve çevre dostu malzeme uygulamalarına bilimsel bir temel oluşturmaktır. Çalışma kapsamında, laboratuvar ortamında gerçekleştirilecek deneysel uygulamalarla elde edilen veriler akademik literatür ile karşılaştırılarak değerlendirilecektir. Böylece hem gelecekteki çalışmalara bilimsel katkı sunulması hem de uygulama potansiyeli taşıyan verilerin elde edilmesi hedeflenmektedir.

Bu araştırma;

- Saha Uygulamalı mühendislik çözümlerine katkı sunmayı,
- Plastik atıkların yeni yapı malzemesi olarak değerlendirilmesini teşvik etmeyi hedeflemektedir.

Aynı zamanda;

- Çevreye zarar veren plastik atıklara katma değer kazandırılması,
- Geri dönüşüm sistemindeki zayıflıkların giderilerek sistemin güçlendirilmesi,
- Çevre bilinci ve toplumsal duyarlılığın artırılması gibi toplumsal sonuçlar da beklenmektedir.

Araştırmanın alt amaçları ise aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Polietilen Tereftalat(PET), polipropilen(PP) ve polietilen(PE) türündeki plastik atıkların farklı oranlarda beton karışımlarına eklenerek, basınç, eğilme ve çekme dayanımı üzerindeki etkilerinin ölçülmesi,
- Plastik katkıların betonun birim hacim ağırlık, su emme gibi fiziksel özelliklerine olan etkilerinin belirlenmesi,
- Plastik atıkların yapı malzemesi olarak sürdürülebilirlik açısından potansiyel katkılarının değerlendirilmesi,
- Elde edilen deneysel verilerin inşaat sektörü için uygulanabilirlik yönünden analiz edilmesi.
- Beton, günümüz inşaat sektörünün temel yapı taşlarından bir tanesi olarak öne çıkmaktadır. Buna ek olarak, barajlardan otoyollara, konutlardan yüksek katlı yapılara

kadar çok geniş bir alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu genel kullanım şekli ise betonun bileşenlerine olan talebi büyük ölçüde artırmıştır. Beton üretimi için gerekli olan çimento, agrega (kum ve çakıl) ve su gibi temel maddeler doğadan büyük miktarlarda temin edilmektedir. Özellikle çimento üretimi sırasında ortaya çıkan yoğun karbon salınımı ve yüksek enerji tüketimi ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır (CimentoKlinker, 2023). Nitekim küresel karbon salınımının yaklaşık %7'sinin çimento üretimi kaynaklı olduğu bilinmektedir (Global Cement and Concrete Association [GCCA], 2021). Ayrıca agrega temini amacıyla yapılan taş ocakçılığı ve dere yataklarından malzeme çıkarılması, doğal oluşumların tahribatına ve toprak erozyonuna neden olmaktadır. Bu nedenlerle beton üretim süreci, sürdürülebilirlik çerçevesinde yeniden gözden geçirilmesi gereken kritik bir alandır.

Diğer taraftan, plastik atıklar da çevre kirliliği açısından büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Her yıl yaklaşık 400 milyon ton plastik üretilmekte ve bu plastiklerin büyük bir bölümü atıl bir şekilde doğaya bırakılmakta ve bu plastik atıkların doğada çözünmesi yüzyıllar sürmekte, mikro plastiklere dönüşerek hem kara hem de deniz ekosistemlerinde kalıcı kirlilik yaratmaktadır (UNEP, 2021). Geri dönüşüm oranlarının düşük seviyelerde olması, bu sorunu son derece derinleştirmektedir. Dolayısıyla plastik atıkların alternatif kullanım alanlarında değerlendirilmesi, çevresel sürdürülebilirlik açısından stratejik bir öneme sahiptir.

Bu çalışma, beton üretiminde plastik atıkların katkı malzemesi olarak değerlendirilmesini ele alarak, iki önemli çevresel problemi aynı noktada çözümlenmeyi amaçlamaktadır. Hem plastik atıkların geri dönüşümü sağlanacak hem de beton üretiminde doğal kaynakların kullanılması azaltılmış olacaktır. Bu yaklaşım, karbon salınımının düşürülmesine ve doğal kaynakların daha verimli kullanılmasına katkı sağlayacaktır.

Son yıllarda, plastik atıkların beton içerisinde katkı olarak kullanılmasına yönelik pek çok akademik çalışma gerçekleştirilmiştir. Ancak bu akademik çalışmaların büyük bir bölümü, yalnızca belirli plastik türlerinin belli oranlarda kullanımıyla sınırlı kalmakta ve genellikle yalnızca basınç dayanımı gibi tek bir mekanik özelliğin incelenmesiyle yetinmektedir. Bu durum, betonun çok yönlü yapısı göz önüne alındığında önemli bir darboğaz oluşturmaktadır. Oysa betonun performansı yalnızca mekanik değil, aynı zamanda fiziksel ve durabilite özellikleriyle birlikte bütüncül şekilde değerlendirilmelidir. Sonuç olarak bu çalışma, PET, PP ve PE plastik atıklarının agrega yerine ağırlıkça %0.5, %1.0 ve %1.5 oranlarında beton

karışımlarına katılmasıyla alternatif karışım tasarımlarının geliştirilmesini amaçlamaktadır. Bu sayede hem doğal kaynakların korunmasına katkı sağlanması hem de sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda plastik katkıların betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki potansiyel etkilerinin araştırılması hedeflenmektedir. Çalışma, inşaat sektöründe uygulanabilir alternatif malzeme çözümleri geliştirilmesine bilimsel bir temel oluşturmayı amaçlamaktadır.

Bunun yanı sıra, mevcut literatürde yer alan bazı çalışmalarda kullanılan plastik atıkların özellikleri önceden belirlenmeden veya standardize edilmeden deneylere konu edildiği görülmektedir. Bu durum, elde edilen sonuçların karşılaştırılabilirliğini ve genellenebilirliğini sınırlayabilmektedir. Türkiye özelinde değerlendirildiğinde ise bu alandaki araştırmaların sayısının sınırlı olduğu ve çoğunlukla küçük ölçekli deneysel uygulamalara odaklandığı gözlemlenmektedir. Özellikle farklı plastik türlerinin aynı deneysel düzende karşılaştırıldığı ve hem fiziksel hem de mekanik özelliklerin birlikte ele alındığı kapsamlı çalışmalara daha fazla ihtiyaç duyulduğu düşünülmektedir.

Elde edilecek veriler, yalnızca akademik çevreler için değil, aynı zamanda beton üreticileri, geri dönüşüm sektörü temsilcileri, mühendislik firmaları ve çevre politikası belirleyicileri için de kıymetli bilgiler sunacaktır. Bu yönüyle tez çalışması, çevre dostu beton üretimi konusunda uygulanabilir çözüm önerileri geliştirme potansiyeline sahiptir.

1.3. Plastiklerin Sınıflandırılması

Plastikler, üretim yöntemleri ve kullanım amaçlarına göre çeşitli gruplara ayrılmaktadır. En temel ayırım, termoplastikler ve termoset plastikler arasında yapılır. Termoplastikler ısıtıldıklarında yumuşayıp tekrar şekillendirilebilir özellik gösterirken, termoset plastikler bir kez sertleştikten sonra yeniden biçimlendirilememektedir. PET, PP ve PE gibi yaygın olarak geri dönüştürülebilir plastik türleri termoplastik grubuna dâhildir (ASTM International, 2013). Geri dönüşüm süreçlerinde kolay tanınabilmeleri amacıyla plastikler, uluslararası tanımlama sistemlerine göre yedi sınıfa ayrılmıştır:

- PET (1): Polietilen Tereftalat
- HDPE (2): Yüksek Yoğunluklu Polietilen
- PVC (3): Polivinil Klorür
- LDPE (4): Düşük Yoğunluklu Polietilen
- PP (5): Polipropilen

- PS (6): Polistiren
- Diğerleri (7): Polikarbonat, biyoplastikler vb. (ASTM International, 2013)

Her plastik türü, sahip olduğu farklı yoğunluk, elastiklik ve kimyasal özellikler nedeniyle beton içerisindeki performans üzerinde farklı etkiler göstermektedir. Bu farklılıklar, plastiklerin beton içerisindeki davranışlarını ve katkı sağladıkları mekanik özellikleri doğrudan etkilemektedir. Tablo 1’de özetlenen verilere göre, PET, düşük su emme kapasitesi ve yüksek çekme dayanımı sayesinde betonun çekme dayanımını artırıcı bir etki göstermektedir (Yılmaz & Kaya, 2020; Sharma vd., 2022). PP ise hafifliği ve kimyasal direnci ile süneklik kazandırarak çatlak kontrolü açısından katkı sağlamaktadır (Siddique vd., 2008). PE ise esnek yapısı ve yüksek darbe dayanımıyla, özellikle darbe emici ve ısı yalıtımı gerektiren beton uygulamalarında avantaj sunmaktadır (Yazıcı & Sarıdemir, 2021).

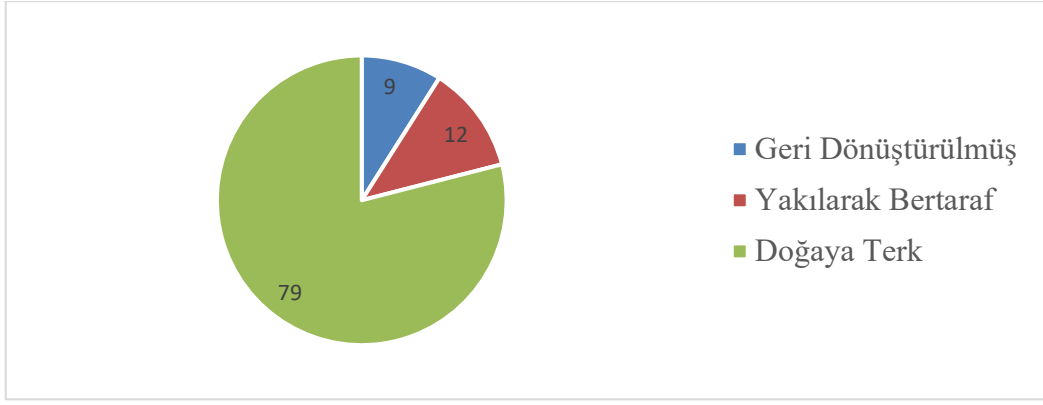
Tablo 1. Karışımda atık plastik türlerinin beton üzerine etkileri

Plastik Türü	Özellikleri	Beton Üzerindeki Etkisi
PET	Yüksek dayanım, düşük su emme	Çekme dayanımını artırır
PP	Hafif, kimyasal dirençli	Elastikiyeti artırır
PE	Esnek, darbe dayanımı yüksek	Darbe dayanımını artırır

1.4. Küresel Plastik Atık Sorunu ve İstatistiksel Veriler

Plastik atık sorunu, günümüzde en büyük çevresel tehlikelerden biri haline gelmiştir. 1950’li yıllarda yılda yaklaşık 2 milyon ton olan küresel plastik üretimi, 2021 itibarıyla 390 milyon tonun üzerine çıkmıştır (Plasticsoup Foundation, 2021).

Avrupa Çevre Ajansı’nın 2021 yılı verilerine göre Avrupa’da kişi başına düşen plastik tüketimi 35–40 kg tespit edilmiştir (EEA&Eurostat, 2021). Türkiye’de bu miktar 45–50 kg seviyelerinde bulunmaktadır. TÜİK’in (TÜİK, Atık İstatistikleri, 2022) 2022 verilerine göre ise Türkiye’de yalnızca ambalaj plastiklerinden 2,7 milyon ton atık ortaya çıkmış, ancak bunun yalnızca %20’si geri dönüştürülmüştür. Şekil 1’de görüldüğü gibi dünya üzerinde toplamda 8,3 milyar tondan fazla plastik üretilmiş; bunun sadece %9’u geri dönüştürülmüş, %12’si yakılarak bertaraf edilmiş, kalan %79’u ise doğaya terk edilmiştir (Geyer vd., 2017).



Şekil 1. Plastik atıkların bertaraf yöntemlerine göre dağılımı

Plastik atıkların çevre üzerindeki etkileri yalnızca karasal alanlarla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda suyolları, denizler ve okyanuslar aracılığıyla geniş ekosistemleri etkisi altına almaktadır (European Environment Agency [EEA], 2021). Mikro plastikler deniz canlılarına kadar ulaşmakta ve dolaylı olarak insan gıda zincirine karışmaktadır. 2019’da Dünya Ekonomik Forumu tarafından yayımlanan bir çalışmada, bir insanın haftada ortalama 5 gram mikro plastik tükettiği belirtilmiştir. Bu miktar bir kredi kartı ağırlığına denk gelmektedir (University of Newcastle/WWF, 2019).

Ekonomik anlamda ise plastik kirliliği; turizm, balıkçılık ve deniz taşımacılığı gibi sektörleri etkilemekte ve yılda yaklaşık 13 milyar dolarlık ekonomik kayba neden olmaktadır (UNEP, 2020). Bu nedenle inşaat gibi hacimli malzeme tüketiminin oldukça fazla olduğu sektörlerde plastik atıkların faydalı ürünlere dönüştürülmesi, hem çevre hem de ekonomik açıdan büyük bir potansiyel taşımaktadır.

1.5. Geri Dönüşüm Süreçleri ve Uygulama Alanları

Plastik atıkların taze beton içerisinde katkı malzemesi olarak kullanılabilmesi için belirli geri dönüşüm süreçlerinden geçirilmesi zorunludur. Bu süreçlerin uygulanabilirliği, plastik türüne, kirlenme derecesine ve hedeflenen ürün özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Genel geri dönüşüm süreci aşağıdaki temel aşamaları içermektedir (Plastics Europe, 2024):

- Toplama ve Ayrıştırma: Evsel, ticari ve endüstriyel kaynaklardan gelen plastik atıklar toplanır ve plastik türlerine göre manuel veya otomatik sistemlerle ayrıştırılır.

- b) Temizleme: Toplanan atık plastikler üzerindeki kirletici maddeler, deterjan bazlı su sistemleriyle temizlenir.
- c) Parçalama: Temizlenen plastikler 4–12 mm boyutlarında granüller halinde parçalara ayrılır.
- d) Granülleme: Bazı uygulama noktalarında plastikler eritilerek filament veya pellet formuna dönüştürülür.

Atık plastiklerin ayrıştırma işlemi ve parçalanma işlemi sonucundaki görseller şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. Plastik atıkların ayrıştırılması ve atık grubuna göre parçalanması

Geri dönüştürülmüş plastiklerin beton uygulamalarında kullanımı ise aşağıdaki formlarda gerçekleşmektedir:

- Lif formu: PET ve PP plastikler 10–20 mm uzunlukta kesilerek çatlak kontrolü amacına yönelik kullanılır (Pelisser vd., 2012).
- Granül formu: PE gibi plastikler agrega yerine kısmen kullanılarak hafif beton üretimini kolaylaştırır (Özdemir vd., 2023).
- Şerit/pul formu: LDPE gibi plastikler ince şeritlere dönüştürülerek ısı ve ses yalıtımı sağlamak için kullanılır (Peker vd., 2022).

Öne çıkan başlıca uygulama alanları aşağıda listelenmiştir:

- Yol yapımı: Hindistan’da plastik katkılı asfaltla yapılan yollar 150.000 km’yi aşmış, %30 oranında daha uzun ömürlülük sağlamıştır (Hindustan Times, 2020).
- Ses yalıtımı: Almanya’da PET katkılı paneller bina içi ses yalıtımı ve akustik düzenlemede kullanılmaktadır (MMT Acoustix, 2025).

- Modüler yapılar: Hollanda'da geri dönüştürülmüş plastiklerden üretilen prefabrik yapılar çevre dostu konut çözümleri sunmaktadır (Sıfır Atık, 2018).
- Türkiye'de pilot uygulamalar: Karayolları Genel Müdürlüğü ile bazı üniversiteler, plastik atık içeren betonun alt temel ve temel dolgularındaki potansiyelini araştırmaktadır (Çağrıci, 2016).

Bu uygulamalar, plastik atıkların çevreye zarar vermeden yeniden değerlendirilmesini mümkün hale getirmesinin yanı sıra beton teknolojisine de sürdürülebilir katkılar sağlamaktadır.

İnşaat sektörü, kullanılan malzemelerin miktarı ve çeşitliliği açısından geri dönüştürülmüş ürünlerin en yaygın şekilde değerlendirilebileceği alanlardan biridir. Günümüz inşaat sektöründe geleneksel yapı malzemeleri olan beton, çelik, tuğla ve asfaltın yanı sıra cam, metal, kauçuk ve plastik gibi geri dönüştürülebilir atıkların da yapı elemanlarında kullanımına yönelik çalışmaların sayısı giderek artmaktadır (Wu, Ye & Cui, 2025).

Plastik atıkların inşaat sektöründe değerlendirilme yöntemleri genel olarak üç ana başlık altında incelenmektedir:

- a) **Agrega Yerine Kullanım:** Plastik granüller, doğal agregaların belirli bir kısmının yerine kullanılarak hafif beton üretiminde değerlendirilmektedir. Bu yaklaşım, betonun birim hacim ağırlığını düşürerek taşıyıcı sistem üzerindeki yükü azaltmaktadır (Maghali vd., 2022).
- b) **Lif Katkısı Olarak Kullanım:** Geri dönüştürülmüş PET ve PP gibi plastikler, betonun çekme dayanımını artırmak ve çatlak oluşumunu azaltmak amacıyla lif formunda beton karışımına eklenmektedir (Ali vd., 2024)
- c) **Yalıtım ve Dolgu Malzemesi Olarak Kullanım:** PE ve polistiren(PS) gibi plastikler, yapıların ısı ve ses yalıtımı gibi önemli ihtiyaçlarını karşılamak üzere dolgu malzemesi ya da yalıtım levhası formunda kullanılmaktadır (Zhukov, 2022).

Uygulama Örnekleri:

- İstanbul Teknik Üniversitesi tarafından yürütülen projelerde plastik lif katkılı betonun eğilme ve çekme dayanımı üzerindeki olumlu etkileri deneysel olarak gösterilmiştir (Karademir, 2017).
- Karayolları Genel Müdürlüğü, plastik katkılı betonun yol alt temel dolgularında ve stabilizasyon tabakalarda kullanılabilirliğine yönelik saha denemeleri gerçekleştirmiştir (Karayolları Genel Müdürlüğü, KGM Ar-Ge, 2004).

- Avrupa’da birçok ülke, plastik katkılı yalıtım levhalarını bina kabuklarında uygulayarak enerji verimliliğini artırmayı ve tasarruf sağlamayı hedefleyen projelere öncülük etmektedir (Corker,2020).

Bu tür uygulamalar, yalnızca atık yönetimi açısından değil, aynı zamanda yapı malzemesi çeşitliliği ve sürdürülebilir inşaat uygulamaları açısından da önem arz etmektedir. Geri dönüştürülmüş plastiklerin sektörde yaygınlaşması, ülke ekonomisinin desteklenmesine doğrudan katkı sağlamaktadır

1.6. Türkiye’de Atık Yönetimi ve Mevzuat Durumu

Türkiye’de atık yönetimi, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’nın koordinasyonunda yürütülmekte olup, çevre koruma politikaları kapsamında plastik atıkların toplanması, ayrıştırılması ve geri dönüştürülmesi çeşitli yasal düzenlemelerle desteklenmektedir. Bu düzenlemeler; atıkların kaynağında ayrıştırılması, geri dönüşüm tesislerinde geri kazanılması ve ekonomiye katkı sağlayacak biçimde değerlendirilmesini hedeflemektedir.

Yürürlükte olan temel yasal düzenlemeler şunlardır:

- Atık Yönetimi Yönetmeliği (2015): Tüm atık türlerinin yönetimine dair usul ve esasları belirlemekte olup, geri dönüşüm süreçlerinin çevresel ve sağlık açısından uygun biçimde yürütülmesini zorunlu hale getirmektedir (Atık Yönetimi Yönetmeliği, RG, 02.04.2015/29314).
- Ambalaj Atıkları Kontrolü Yönetmeliği(2021): Ambalaj atıklarının, özellikle plastik içerikli olanların, kaynağında ayrıştırılıp toplanarak geri kazanım sürecine dâhil edilmesine dair bir yönetmeliktir (Ambalaj Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği, RG, 2021/31523).
- Sıfır Atık Yönetmeliği (2019): İsrafin önüne geçilmesi, kaynakların etkin kullanılması ve geri dönüşüm oranlarının artırılmasını amaçlayan bu yönetmelik, plastik atıkların kaynağında ayrıştırılmasını teşvik eden bir yönetmeliktir (Sıfır Atık Yönetmeliği, RG, 12.07.2019/30829).

Plastik geri dönüşüm faaliyetleri büyük çoğunlukla lisanslı geri dönüşüm tesislerinde sürdürülmektedir. Bu tesislerde plastik atıklar türlerine göre ayrıştırılmakta, fiziksel ve kimyasal işlemlerden geçirilerek tekrar kullanılabilir hammaddelere dönüştürülmektedir.

Ancak özellikle karışık ve kirli plastiklerin dönüştürülmesindeki zorluklar, günümüzde hala çözülmesi gereken önemli bir problem olarak varlığını sürdürmektedir.

Yapı Malzemelerinde Plastik Kullanımına İlişkin Mevzuat Boşluğu: Türkiye’de plastiklerin yapı malzemesi olarak kullanımını doğrudan düzenleyen özel bir mevzuat henüz bulunmamaktadır. Ancak Türk Standartları Enstitüsü (TSE) ve ilgili Bakanlıklar tarafından bu alanda standart geliştirmeye yönelik çalışmalar yürütülmektedir. Özellikle TS EN 206 standardına ilave edilecek alt düzenlemeler ile geri dönüştürülmüş plastik katkıların beton üzerindeki performanslarına yönelik değerlendirme kriterleri oluşturulması hedeflenmektedir.

Kamu Destekli Uygulamalar ve Girişimler:

- TÜBİTAK destekli projeler ile üniversiteler plastik katkılı beton üzerine deneysel araştırmalar yürütmektedir (Çakılcıoğlu., 2023).
- Büyükşehir belediyeleri geri dönüşüm merkezleri kurarak plastik atıkların etkin şekilde toplanmasını amaçlayan uygulamalar yapmaktadır (Fatih Belediyesi, 2023).
- “Sıfır Atık Binalar” projesi kapsamında, inşaat sektöründe geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımına yönelik teşvik politikaları geliştirilmiştir (INFOLDIA, 2023). Bu gelişmeler, Türkiye’de plastik atıkların geri dönüşümünün yalnızca çevre koruma değil, aynı zamanda ekonomik ve sektörel dönüşüm açısından da stratejik önem taşıdığını göstermektedir.

1.7. Beklenen Sonuçlar ve Etki Değerlendirmesi

Bu çalışmanın sonunda elde edilmesi beklenen sonuçlar, teknik, çevresel ve ekonomik açılardan çok yönlü katkılar sunma potansiyeline sahiptir. Beton karışımlarına belirli oranlarda eklenen plastik atıkların; basınç ve çekme dayanımı, işlenebilirlik, su emme oranı, birim hacim ağırlık ve ısı iletkenliği gibi mekanik ve fiziksel özellikler üzerindeki etkileri detaylı biçimde analiz edilecektir. Beklenen Teknik Kazanımlar aşağıda listelenmiştir

- Bazı katkı oranlarında plastik atıkların betonun mekanik özelliklerini iyileştirdiği veya yönetmelik sınırları içinde etkilediği görülebilir.
- PET ve PP katkılarının çatlak önleyici etkiler yaratabileceği düşünülmektedir.
- PE gibi hafif plastiklerin, betonun birim ağırlığını azaltarak ısı iletkenliğini düşürmesi muhtemel sonuç olarak görülmektedir.

Beklenen Çevresel Kazanımlar:

- Beton üretiminde doğal kaynakların kullanımının azaltılması,
- Plastik atıkların çevreye bırakılmak yerine yapı malzemesi olarak değerlendirilebilirliği,
- Geri dönüşüm oranlarının artmasına doğrudan veya dolaylı olarak katkı sağlanması,
- Plastik atıkların, çimento ve doğal agrega gibi yüksek karbon ayak izine sahip malzemelerin yerine kısmen kullanılması sayesinde sera gazı salınımının azaltılması (Global Cement and Concrete Association, 2021).

Beklenen Ekonomik ve Sosyal Etkiler:

- Plastik atıklara katma değer katılarak nihai ürüne dönüştürülmesiyle yeni iş alanlarının oluşması,
- Hazır beton üreticileri için maliyet düşürücü alternatif katkı malzemelerinin geliştirilmesi,
- Kamu projelerinde çevre dostu yapı malzemesi kullanımının teşvik edilmesi.

Beklenen teknik, çevresel ve ekonomik kazanımlar Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 2. Muhtemel teknik, çevresel ve ekonomik kazanımlar

Alan	Kazanım
Çevresel	Atık azalımı
Teknik	Dayanım iyileşmesi
Ekonomik	Maliyet düşüşü

Sonuç olarak, bu tez çalışması yalnızca deneysel bir çalışma olmanın ötesine geçerek, plastik atıkların dögüsel ve ekonomik bakış açısında yapı sektörüne kazandırılabilceğini göstermeyi amaçlamaktadır. Hem mühendislik uygulamaları hem de çevresel politika geliştirme açısından yol gösterici bir örnek olma potansiyeline sahiptir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1. Plastik Atık Kavramı, Türleri ve İşleme Süreci

Plastik, endüstriyel üretimin temel yapı taşlarından biri olarak, günümüz dünyasının hemen her alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Kimyasal olarak polimer bir yapıya sahip olan plastikler, sentetik veya yarı sentetik bir formda olup genellikle petrol veya petrol türevlerinden elde edilir (WasteTrade, 2025). 20. yüzyılın başlarından itibaren hızla artan üretim hacmi, plastiklerin esneklik, hafiflik, suya dayanıklılık ve kimyasal direnç gibi üstün fiziksel özellikleri sayesinde gıda ambalajlarından otomotiv parçalarına, elektronik cihazlardan yapı malzemelerine kadar birçok sektörde geniş bir kullanım alanı bulmasına neden olmuştur.

Ancak plastiklerin sektörel bazda geniş bir kullanıma sahip olması, plastiklerin doğada çözünme sürecinin oldukça uzun zaman alması sebebi ile ciddi çevresel sorunları da beraberinde getirmektedir. Özellikle tek kullanımlık plastikler, denizler ve okyanuslardaki atıkların %80'inden fazlasını oluşturmakta; mikro plastikler ise su, toprak ve hatta insan kanında dahi tespit edilebilmektedir. Bu durum, plastik atıkları sürdürülebilirlik esasında küresel boyutta bir çevre sorunu haline getirmiştir (UNESCO Ocean Literacy, 2022). Plastik atıklar, üretim teknolojileri ve yapısal özellikleri dikkate alındığında genel olarak iki ana gruba ayrılmaktadır (Kılıç & Yüce, 2014):

a) Termoplastikler: Isıtıldıklarında yumuşayıp yeniden şekillendirilebilirler. Bu nedenle de geri dönüşüme uygun olan plastiklerdir. Defalarca eritilip kalıplanabilmeleri sayesinde çevre dostu geri dönüşüm faaliyetlerine daha kolay entegre edilebilirler. Bu gruba dâhil başlıca türler aşağıda listelenmiştir (Kılıç & Yüce, 2014):

- PET: Şeffaf, hafif ve gaz geçirimsizdir. Genellikle içecek şişelerinde ve tekstil ürünlerinde kullanılır.
- Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE): Sert ve dayanıklı yapısıyla deterjan bidonları, oyuncaklar ve atık su borularında yaygın bir şekilde kullanılır.
- Düşük Yoğunluklu Polietilen (LDPE): Esnek yapısıyla poşet ve streç film gibi ambalaj malzemelerinde tercih edilmektedir.
- PP: Kimyasal direnci yüksektir. Otomotiv sektörü, laboratuvar ekipmanları ve temiz su boru üretiminde kullanılır.
- Polistiren (PS): Köpük (strafor) formuyla ambalaj ve yalıtım sektöründe büyük oranda kullanılmaktadır.

b) Termoset Plastikler: İlk ısıtıldıklarında şekil alan ancak bir kez kalıplandıktan sonra tekrar şekil almayan plastiklerdir. Sertleşmiş yapılarını geri dönüşüm sürecine sokmak neredeyse imkânsızdır. Epoksi, fenolik reçine ve poliüretan malzemeler bu gruba örnek olarak verilebilir (Kılıç & Yüce, 2014).

Bu çalışmada, geri dönüşüm potansiyeli en yüksek olan termoplastik türler (özellikle PET, PE ve PP) odak noktasıdır. Bu plastik türleri tablo 3’de görüldüğü gibi, fiziksel dayanıklılıkları, düşük yoğunlukları ve kimyasal özellikleri sayesinde beton karışımlarında katkı malzemesi olarak kullanılmaya uygundur (Umasabor & Daniel, 2020).

Tablo 3. Plastik türleri ve temel özellikleri

Plastik Türü	Özellikleri	Kullanım Alanları
PET	Şeffaflık, yüksek dayanım	Şişeler, tekstil
PP	Hafiflik, kimyasal direnç	Endüstriyel parçalar
PE	Esneklik, düşük sıcaklık direnci	Ambalajlar, borular

Bu veriler, özellikle yüksek miktarda malzeme tüketimi olan inşaat sektörü gibi alanlarda plastik atıkların geri kazanımı ve alternatif yapı malzemesi olarak kullanılmasının çevresel sürdürülebilirlik açısından bir zorunluluk hâline geldiğini göstermektedir.

2.2. Betonun Yapısı ve Katkı Maddeleri

Beton, günümüz inşaat sektörünün temel yapı taşlarından biridir. Tarihsel olarak kökeni Antik Mısır medeniyetine kadar uzansa da, günümüzde gelişmiş üretim teknikleri ile çok daha yüksek performanslı bir yapı malzemesi hâline gelmiştir. Genel olarak beton; çimento, su, ince ve iri agrega (kum, çakıl, kırma taş) ile çeşitli mineral ve kimyasal katkı maddelerinin belirli bir oranlarda karıştırılması ile elde edilen yapay bir taş malzemedir. Taze halde şekillendirilebilmesi ve sertleştiğinde yüksek basınç dayanımı sunması, onu yol, köprü, baraj, bina ve altyapı projelerinde vazgeçilmez kılmaktadır (History of Concrete, 2022).

Betonun temel bileşenleri aşağıdaki gibi listelenebilmektedir.

- a) Çimento: Betonun en önemli ve bağlayıcı unsurudur. Su ile birleşerek hidrasyon sürecini başlatır ve zamanla sertleşerek agregaları bir arada tutar. Günümüzde kullanımda olan en yaygın türü Portland çimentosudur. Klinker, alçıtaşı ve bazen uçucu kül, cüruf gibi katkıları içerir.

- b) Agrega: Beton hacminin %60–75'ini oluşturur. Mekanik dayanımı sağlayan temel bileşendir. Doğal (kum, çakıl) ya da yapay (genleştirilmiş kil, geri dönüştürülmüş malzeme) olabilir. İnce agregası (<4 mm) ve iri agregası (4–32 mm) olarak sınıflandırılır.
- c) Su: Çimento ile kimyasal tepkimeyi sağlayarak hidrasyon sürecini başlatır. Ayrıca karışımın işlenebilirliğini etkiler. Su/çimento oranı (s/c) genellikle 0.4–0.6 aralığında tutulmalıdır.
- d) Katkı Maddeleri: Betonun işlenebilirliğini, dayanımını, geçirimsizliğini ve priz süresini düzenleyen özel bileşenlerdir. Kimyasal ve mineral katkı olmak üzere iki ana grupta incelenebilir.

Kimyasal katkı maddeleri;

- Su Azaltıcılar (Plastifiyanlar): Su miktarını düşürerek aynı kıvamın sağlanmasını mümkün kılar, dayanımı artırır (Wang vd., 2024)
- Hava Sürükleyiciler: Betonun donma-çözülme döngülerine karşı dayanıklılığını artırır (Shang & Yi, 2013).
- Priz Geciktiriciler: Sıcak iklimlerde betonun daha uzun süre işlenmesini sağlar (Kimteks, 2021).
- Priz Hızlandırıcılar: Soğuk ortamlarda priz süresini kısaltarak erken dayanım sağlar (FHWA, 2024).
- Akışkanlaştırıcılar: Kendiliğinden yerleşen beton üretiminde kullanılır, yüksek oranda su azalımı sağlar (Patel, 2020).

Mineral katkı maddeleri;

- Uçucu Kül: Termik santral atığı olup betonun işlenebilirliğini büyük oranda artırır (Federal Highway Administration, 2025).
- Yüksek Fırın Cürufu: Çimentoya ilave edilerek dayanıklılığı artırır (Sharma vd., 2021)
- Silis Dumanı: Mikro boyutta yapısıyla geçirimsizliği iyileştirir (Nochaiya vd., 2017)
- Tras, Pomza: Doğal puzolanik özellik gösteren mineral katkı maddeleridir (Korkmaz, 2017).

Sürdürülebilir inşaat malzemelerine olan ilginin artmasıyla birlikte, geri dönüştürülmüş plastik atıklar beton üretiminde alternatif katkı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle PET, PP ve PE gibi plastik türleri, ya agregası yerine kullanılarak hafif beton üretimini desteklemekte ya da lif formunda karışıma eklenerek çatlak kontrolü sağlamaktadır.

Plastik katkıların başlıca avantajları:

- Betonun yoğunluğunu azaltarak hafif yapılar oluşturulmasına imkân tanır.
- Lifli yapısı ile çatlak oluşumunu engellemeye yardımcı olur.
- Isı ve ses yalıtımı özelliklerini iyileştirir.
- Su geçirimsizliğini düşürerek durabiliteyi artırır.
- Doğal kaynak kullanımını azaltır, çevresel yükü hafifletir (Minde vd., 2024).

Bu nedenlerle plastik atıklar, yalnızca geri dönüşüm açısından değil, aynı zamanda beton teknolojisine sürdürülebilir özellik katan önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

2.3. Literatür Taraması

Literatürde yapılan çeşitli çalışmalar, plastik atık katkılı betonların hem çevresel hem de fiziksel performans açısından önemli potansiyeller sunduğunu göstermektedir.

Choi & Yoo (2002) tarafından yürütülen çalışmada, geri dönüştürülmüş PET atıkları ince agrega yerine kullanılarak %5, %10 ve %15 oranlarında karışımlarla hafif betonlar üretilmiştir. PET katkısının beton üzerinde çeşitli fiziksel ve mekanik etkileri gözlemlenmiştir; birim hacim ağırlık değerlerinde %10 - %20 arasında bir azalma meydana gelirken, basınç dayanımı %5 katkı oranında değişmeden kalmış, %10 katkıya kadar yaklaşık %5 - %10 oranında azalma meydana gelmiştir. Ancak %15 katkı oranında basınç dayanımında yaklaşık %15 - %20'ye varan oranda düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca, PET kullanımının betonun ısı yalıtım özellikleri üzerinde olumlu etkiler yarattığı, yani termal iletkenliği azalttığı ve yalıtım performansını artırdığı belirtilmiştir.

Silva ve arkadaşları (2005) tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, PET bazlı kompozit malzemeler üretilmiş ve bu kompozitlerin yapısal olmayan uygulamalara yönelik fiziksel, termal ve mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Kompozit üretiminde, PET matrisine takviye olarak hem işlenmemiş jeopolimer beton atıkları (U-GCW; Untreated Geopolymer Concrete Waste) hem de oleik asit (OA) ile kimyasal işlem uygulanmış GCW (T-GCW; Treated GCW) kullanılmıştır. Takviye olarak kullanılan GCW oranları PET/GCW ağırlık oranları %80/20, %60/40 ve %50/50 olacak şekilde tasarlanmış ve T-GCW ile U-GCW katkılı kompozitler karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, T-GCW içeren PET kompozitlerinde mikroyapı bütünlüğü daha kararlı kalmış, basınç dayanımı %15 - %25 oranında artış göstermiş, termal

dayanımında ise yaklaşık %20 - %30 oranında iyileşme sağlanmıştır. Bu gelişmeler, özellikle düşük yük taşıma kapasitesine sahip yapısal olmayan inşaat elemanlarında geri dönüştürülmüş PET atıklarının fonksiyonel kullanımını mümkün kılan önemli bulgular sunmaktadır.

Reis (2006) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, doğal liflerle takviye edilmiş epoksi polimer betonunun mekanik özellikleri incelenmiş ve bu malzemenin sentetik liflerle takviye edilmiş beton ile karşılaştırılabilirliği analiz edilmiştir. Çalışmada özellikle çevresel sürdürülebilirliği artırmak amacıyla, tarımsal atık kaynaklı doğal liflerin kullanımıyla beton üretiminin potansiyeli değerlendirilmiştir. Doğal lifler (hindistancevizi, şeker kamışı ve muz lifleri), herhangi bir kimyasal işleme tabi tutulmadan doğrudan beton karışımına %1 hacim oranında eklenmiş ve bu liflerin yapısal özelliklere etkisi araştırılmıştır. Takviye edilen doğal lif katkılı epoksi polimer betonlar, sentetik lif katkılı betonlar ve takviyesiz referans betonla karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, doğal lif takviyesi ile üretilen betonlarda eğilme dayanımı %13,7 oranında artış göstermiştir. Ancak basınç dayanımında anlamlı bir değişiklik gözlemlenmemiş, değerler yaklaşık olarak referans betonla aynı seviyede kalmıştır. Çalışma, doğal liflerin dayanım, işlenebilirlik ve çevresel faydalar açısından beton üretiminde etkili ve uygulanabilir bir takviye materyali olabileceğini vurgulamaktadır.

Marzouk ve arkadaşları (2007) tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, geri dönüştürülmüş plastik atıkların ince agrega olarak kullanılması yoluyla yapısal beton üretimindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada özellikle, inşaat sektöründe çevresel sürdürülebilirliği artırmak amacıyla doğal kum yerine plastik atıkların kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Araştırmada, beton karışımlarına herhangi bir kimyasal işleminden geçirilmeden doğrudan katılan plastik atıkların, işlenmemiş doğal halde yapısal özelliklere etkisi analiz edilmiştir. Plastik atıklar, kullanım sonrası ürünlerden elde edilen geri dönüştürülmüş malzemeler olup, plastik bazlı atıkların doğrudan kullanımı hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, plastik atıkların ince agrega olarak beton karışımına %50'ye kadar eklenmesi durumunda, basınç dayanımı ve eğilme dayanımında anlamlı bir değişim gözlenmemiştir. Ancak, plastik katkı oranı %50'nin üzerine çıktığında, bu mekanik özelliklerde %10 - %60 arasında belirgin düşüşler meydana gelmiştir. Ayrıca, plastik atık katkısı betonun yoğunluğunu %5 - 20 oranında azaltarak hafif beton üretimine olanak sağlamıştır. Bu bağlamda, plastik katkılı betonlar, dayanım ve işlenebilirlik açısından sürdürülebilir ve ekonomik bir alternatif olarak değerlendirilmiştir. Çalışma, geri dönüştürülmüş plastik atıkların yapısal betonlarda optimum seviyelerde kullanılması

durumunda hem çevresel fayda sağladığını hem de yapısal performansın kabul edilebilir sınırlar içinde korunduğunu ortaya koymaktadır.

Ismail ve Al-Hashmi (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, PE (polietilen) atıkları doğal kumun yerine ağırlıkça %10, %15 ve %20 oranlarında kullanılmıştır. Özellikle 30 kg plastik atık içeren karışımlarda yapılan testlerde beton birim hacim ağırlığında yaklaşık %10 oranında azalma gözlemlenmiştir. Basınç dayanımı testlerinde, plastik katkı oranı %10'a kadar %10 - 15 arasında bir azalma yaşanırken, %15 ve %20 katkı oranlarında basınç dayanımı değerlerinde %20 - 30'a varan düşüşler göstermiştir. Eğilme dayanımı ve tokluk testleri sonuçları ise plastik katkılarının betonun tokluk özelliklerini artırdığını ve mikro çatlak yayılımını azalttığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, plastik atık kullanımının mekanik dayanımda sınırlı kayıplara yol açarken, betonun işlenebilirlik ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirebildiğini göstermektedir. Slump testleri de plastik katkılı betonların işlenebilirliğinde herhangi bir olumsuz etkilenme olmadığını doğrulamıştır. Genel olarak, PE atıklarının %10 - 15 oranlarında kullanılması, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de mekanik performans açısından dengeli bir alternatif sunacağı belirtilmiştir.

Siddique ve arkadaşları (2008), geri dönüştürülmüş plastiklerin beton içindeki kullanımını geniş çapta inceleyen çalışmalarında, plastik katkıların betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde çeşitli etkileri olduğunu belirtmiştir. Plastik atıkların betonun yoğunluğunu %5-15 arasında azalttığı, buna karşın basınç dayanımında %10'dan %60'a kadar düşüşler yaşandığı raporlanmıştır. Eğilme ve çekme dayanımlarındaki azalma, basınç dayanımına göre düşük oranda kalırken, plastik katkılı betonların sünekliği ve işlenebilirliği genellikle artış göstermektedir. Ayrıca, Siddique ve arkadaşları özellikle polipropilen (PP) lif katkılarının betonun mekanik performansına olumlu etkilerini de ortaya koymuştur. %0.5, %1.0 ve %1.5 oranlarında PP lif katkısı ile yapılan deneylerde, 28 günlük kür sonunda eğilme dayanımında %8 - 12 arasında artış, darbe dayanımında ise belirgin iyileşmeler raporlanmıştır. Bu bulgular, plastik katkılarının betonun yapısal dayanıklılığını artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermekte ve geri dönüştürülmüş plastiklerin çevresel avantajları ile birlikte beton teknolojisinde önemli bir alternatif olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır.

Albano ve arkadaşları (2009) tarafından yapılan deneysel çalışmada, geri dönüştürülmüş PET içeren beton karışımlarının mekanik özellikleri, farklı su/çimento oranları (0,50 ve 0,60), PET içeriği (%10 ve %20, hacimce) ve parçacık boyutları dikkate alınarak incelenmiştir. Ayrıca, bu

karışımların 200 °C, 400 °C ve 600 °C sıcaklıklara maruz bırakılarak termal bozulmaya karşı dayanımı da değerlendirilmiştir. Sonuçlar, PET oranı %10'dan %20'ye çıktıkça ve parçacık boyutu büyüdükçe, basınç dayanımında yaklaşık %5 - 30 arasında, yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülünde benzer oranlarda azalmalar kaydedilmiştir. Ultrasonik darbe hızı değerleri de bu değişimlere paralel olarak düşmüştür. Bununla birlikte, su emme oranında PET içeriği ve partikül boyutu arttıkça %10 - 25 arasında artışlar gözlenmiştir. Betonun eğilme dayanımı ise sıcaklık, su/çimento oranı, PET içeriği ve parçacık boyutuna bağlı olarak değişiklik göstermiş; yüksek sıcaklıklarda PET katkılı betonun eğilme performansında bazı iyileşmeler raporlanmıştır. Ayrıca, aktivasyon enerjisinin PET partiküllerinin konumu ve su/çimento oranıyla ilişkili olduğu belirlenmiştir. Genel olarak, yüksek PET içeriği ve büyük parçacık boyutları betonun mekanik performansını olumsuz etkilerken, kontrollü oranlarda ve uygun partikül boyutlarında PET kullanımı belirli koşullar altında betonun termal dayanımını iyileştirebileceği belirtilmiştir.

Frigione (2010) tarafından yürütülen bu çalışmada, ince agrega (doğal kum) ağırlığının %5'i oranında yıkanmamış atık PET (WPET) şişelerinden üretilmiş PET agregaları ile ikame edilerek beton üretimi gerçekleştirilmiştir. WPET parçacıkları, ikame edilen doğal kumla benzer tane dağılımına sahip olacak şekilde hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında farklı çimento dozajı ve su/çimento oranlarına sahip numuneler üretilmiş; hem taze betonun reolojik özellikleri hem de 28 ve 365 günlük kür sürelerinden sonra mekanik dayanım özellikleri incelenmiştir. Elde edilen WPET katkılı betonlar, yalnızca doğal ince agrega içeren referans betonlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, WPET agregası ile üretilen betonların işlenebilirlik özellikleri referans betonlarla benzer düzeyde kalmıştır. Ancak WPET içeren betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinde bazı farklılıklar gözlenmiştir. Özellikle taze beton birim hacim ağırlığı yaklaşık %3, sertleşmiş beton birim hacim ağırlığı ise %2 oranında azalmıştır. Basınç dayanımı değerlerinde referans betona kıyasla %5 - 10 aralığında bir düşüş yaşanmış; benzer şekilde yarmada çekme dayanımında da küçük oranlı azalmalar gözlemlenmiştir. Buna karşın, WPET katkısı betonun sünekliğini artırmış, daha yumuşak kırılma davranışı sergilemesine katkıda bulunmuştur. Frigione, atık PET kullanımının yalnızca geri dönüşüm açısından değil, aynı zamanda betonun mekanik davranışını iyileştirme potansiyeli bakımından da dikkate değer olduğunu raporlamıştır.

Alhozaimy ve arkadaşları (2012) tarafından yapılan çalışmada, beton karışımlarına hacimce %0.5, %1.0 ve %1.5 oranlarında polipropilen (PP) lif katkısı eklenmiş ve 7 ile 28 günlük

kürleme sürelerinden sonra yapılan testlerde, %1.0 lif katkısının darbe dayanımında %20 - 25, çekme dayanımında ise %10 - 20 oranında mukavemet artışı sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, %1.0 oranındaki lif katkısının eğilme dayanımını %20 - 30, oranında iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Basınç dayanımında ise %0.5 - 1.0 lif oranlarında %5 - 10 arasında hafif artışlar görülmüş, daha yüksek oranlarda ise dayanımda kayıplar meydana gelmiştir. Birim hacim ağırlık değerlerinde ise PP liflerin düşük yoğunluğu nedeniyle %1 - 3 arasında azalma kaydedilmiştir.

Saikia & de Brito (2012), geri dönüştürülmüş plastik atık katkılarının beton üzerindeki etkilerini geniş çapta analiz eden uluslararası literatür taramasında, plastik agregaların betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinde önemli değişikliklere yol açtığını belirtmiştir. Buna göre, betonun birim hacim ağırlığında %1 ila %6 arasında azalma yaşanırken, basınç dayanımında %20'den %72'ye varan düşüşler gözlemlenmiştir. Eğilme ve yarmada çekme dayanımları ise basınç dayanımına kıyasla daha sınırlı, %5 - 20 aralığında azalmalar göstermektedir. Buna karşın, plastik katkılar betonun sünekliğini artırarak kırılma davranışını olumlu yönde etkilemektedir. Ayrıca, Saikia & de Brito geri kazanılmış plastiklerin kullanımının betonun yapısal performansını optimize ederken çevresel açıdan da önemli avantajlar sağladığını vurgulamışlardır.

Ghernouti ve arkadaşları (2013) tarafından yürütülen çalışmada, gıda ambalajlarında yaygın olarak kullanılan PET atıklarının beton üretiminde ince agrega yerine kullanılmasının taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, kumun %5, %10 ve %15 oranlarında PET parçacıkları ile ikame edildiği beton numuneleri üretilmiş ve farklı su/çimento oranlarıyla hazırlanarak kübik ve silindirik biçimlerde numuneler hazırlanmıştır. Taze beton özellikleri kapsamında işlenebilirlik ve birim hacim ağırlık değerlendirilmiş, PET katkılı betonların işlenebilirliği azalmış, yoğunlukta ise yaklaşık %5 - 10 oranında düşüş gözlenmiştir. Sertleşmiş beton testlerinde elastisite modülü ve yarmada çekme dayanımı, geleneksel betona kıyasla belirgin şekilde düşmüş; basınç dayanımı %5'e kadar olan PET katkısında %5 - 8 arasında azalma gösterirken, %10 ve üzeri katkılarda bu azalma %15-30'a kadar yükselmiştir. Eğilme dayanımı ise %20 PET katkısında yaklaşık %20 -25 oranında düşüş sergilemiştir. Ayrıca, ultrasonik geçiş hızı testleri PET içeren betonların daha gözenekli bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymuş olup, bu durumun dayanım ve dayanıklılıkta azalmaya yol açtığı raporlanmıştır.

Mermerdaş ve arkadaşları (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, atık PET granüllerinin kendiliğinden yerleşen beton (KYB) taze, mekanik ve su emme özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu amaçla, ince agrega, atık PET şişelerin kırılmasıyla elde edilen PET granülleri ile hacimce %0, %2, %4, %5 ve %8 oranlarında ikame edilmiştir. Taze beton özellikleri, çökme çapı ve V-funnel akış süresi testleri ile belirlenmiş; mekanik dayanımlar, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı testleriyle incelenmiştir. Ayrıca su emme testleri ile emme davranışı analiz edilmiştir. Çalışmanın bulgularına göre, PET granül oranı %5'e kadar olan karışımlarda basınç dayanımı %5 oranında azalmış, işlenebilirlik değerlerinde düşüşler gözlemlenmiştir. Ancak %5'in üzerindeki PET oranlarında, işlenebilirlikte belirgin bozulmalar yaşanmış; V-funnel akış süresi sınır değerlerinin üzerine çıkarak %10 - 15 oranında artmış, basınç dayanımı %15 - 20 arası azalmış ve su emme oranı %10 - 20 oranında yükselmiştir. Öte yandan, %5 oranında PET granülü içeren KYB, taze ve sertleşmiş beton kriterlerini karşılayarak yüksek performanslı beton üretimi için uygun bulunmuştur.

Babafemi ve arkadaşları (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, geri dönüştürülmüş atık plastiklerin beton içerisindeki mühendislik özelliklerine etkileri değerlendirilmiştir. Çalışma, atık plastiklerin taze beton özellikleri, mekanik dayanım ve dayanıklılık performansı üzerindeki etkilerini üç ana bölümde incelemiştir. Mevcut deneysel veriler ışığında, plastik katkı oranına bağlı olarak beton özelliklerinde önemli değişimler gözlemlenmiştir. Özellikle, plastik katkı oranı %0 - %5 arasında olduğunda basınç dayanımında %0 - %5 arasında azalma ya da nötr etki görülürken, işlenebilirlikte %5 - %10 arasında düşüş ve yoğunlukta %2 - %5 azalma tespit edilmiştir. %5 - %10 katkı oranlarında basınç dayanımı %5 - %15, işlenebilirlik %10 - %20 ve birim hacim ağırlık %5 - %10 oranlarında azalmıştır. %10 - %20 katkı oranı ile basınç dayanımı %15 - %25, işlenebilirlik %20 - %35, birim hacim ağırlık ise %10 - %20 oranında azalma göstermiştir. %20'nin üzerindeki plastik katkı oranlarında ise basınç dayanımı %25 - %35, işlenebilirlik %30'dan fazla ve birim hacim ağırlık %20 - %30 oranında azalma ile birlikte su emme oranında %15 ve üzeri artışlar meydana gelmiştir. Buna karşın, plastik katkılı betonların çoğu, mühendislik uygulamalarının temel gerekliliklerini karşılayabilecek düzeyde performans sergilemiştir. Çalışmada ayrıca, plastik atıkların beton üretiminde daha verimli kullanımı için yüzey modifikasyonu, parçacık şekli ve boyut optimizasyonu gibi ön işlem tekniklerinin geliştirilmesinin gerekliliği vurgulanmış; bu iyileştirmelerin plastiklerin çimento hamuruna daha iyi bağlanmasını sağlayarak kompozit malzemenin kalitesini artırabileceği belirtilmiştir. Reddy & Kumar (2020) tarafından Hindistan'da yapılan çalışmada, PE atıkları %10, %20 ve %30 oranlarında agrega yerine kullanılmıştır. Özellikle %20 katkıda beton birim hacim

ağırlığında %15 - 20, ısı iletkenliğinde ise %18 azalma sağlanmıştır. Basınç dayanımında ise %10'luk katkı oranında %10 düşüş, %30 katkı oranında ise %25 - 30'a varan bir azalma gözlemlenmiştir. İşlenebilirlikte ise %5 - 15 arasında azalma kaydedilmiştir. Ayrıca, su emme oranında %15 - 30 arasında artış meydana gelmiştir.

Aydın (2021), PET atıklarının çimento harçlarına %1, %3 ve %5 oranlarında eklenmesiyle elde edilen beton numunelerinde, %1 - 3 katkı oranlarında basınç dayanımında %5 - 8, eğilme dayanımında ise %12'ye kadar iyileşmeler gözlemlenmiş; ancak %5 katkı oranında basınç dayanımında %10, eğilme dayanımında %15 oranında azalma olduğunu rapor etmiştir. Ayrıca, katkı boyutu küçüldükçe mekanik performansın olumlu yönde etkilendiği tespit edilmiştir.

Yılmaz (2021) tarafından yapılan çalışmada, atık PET parçaları %0.25, %0.5, %0.75 ve %1.0 oranlarında beton karışımına lif katkısı olarak dahil edilmiştir. 28 günlük kürlenme sonrası yapılan testlerde, %0.75 katkı oranında çekme dayanımında %12 artış ve eğilme dayanımında %10 oranında mukavemet artışı sağlanmıştır. Ayrıca, genel olarak plastik katkı oranının artmasıyla beton yoğunluğunda %5 - 12 azalma gözlemlenmiş, %10 katkı oranına kadar mekanik dayanımlarda iyileşmeler gerçekleşirken, bu oranın üzerinde %15 - 25 arasında dayanım düşüşleri kaydedilmiştir. Su emme oranlarında ise %10 - 25 artış ve işlenebilirlikte %10 - 20 oranında azalma tespit edilmiştir.

Miah ve arkadaşları (2022), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, plastik atıkların beton üretiminde doğal kumun kısmi ikamesi olarak kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Çalışmada, farklı plastik türlerinin birleşiminden oluşan Resin8 (geri dönüştürülmüş farklı plastik atıkların karışımı olarak kullanılan plastik agrega) ile PET içeren beton karışımları değerlendirilmiştir. Kumun hacimsel olarak %5, %10 ve %15 oranlarında Resin8 ve PET ile ikame edildiği beton numuneleri hazırlanmış; bu numuneler, plastik içermeyen referans betonla karşılaştırılmıştır. Taze betonun işlenebilirliği, sertleşmiş betonun basınç ve çekme dayanımı, oksijen geçirgenlik indeksi (OPI) ve sıcaklık etkisi analiz edilmiştir. Ayrıca numunelere sıcaklık uygulanmadan önce ve sonra plastik agregaların ve plastik katkılı betonların mikroyapısı, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, %10 oranında PET ile ikame edilen karışımda basınç dayanımı %2,4 oranında artış göstermiştir. OPI sonuçları ise tüm plastik katkılı karışımların geçirgenlik açısından "iyi" sınıfında yer aldığını ortaya koymuştur. Ayrıca, 250 °C sıcaklık etkisine maruz bırakılan numunelerde, %15 Resin8 ve %5 - 15 PET içeren karışımların basınç dayanımında önemli bir azalma gözlemlenmemiştir.

Sikora ve arkadaşları (2022) tarafından yapılan çalışmada, geri dönüştürülmüş PET agregalarının kendiliğinden yerleşen beton (KYB) içerisindeki etkileri araştırılmıştır. Kullanılan PET, atık PET şişelerin geri dönüşüm sürecinden elde edilen bir atık fraksiyondur. PET agregaları, ince agreganın %0, %5, %10, %15 ve %20'si oranında yerini alacak şekilde karışımlara dâhil edilmiştir. Çalışmada hem taze betonun akış özellikleri (slump flow ve V-funnel testleri) hem de sertleşmiş betonun basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü ve Poisson oranı değerlendirilmiştir. Ayrıca ultrasonik geçiş hızı ve sklerometrik testler (beton yüzey sertliğini ölçen Schmidt çekiç testi) gibi tahribatsız yöntemlerle de betonun performansı analiz edilmiştir. Araştırma sonuçları, PET katkı oranı arttıkça taze betonun akıcılığında %10'a varan azalma ve sertleşmiş betonun basınç dayanımında %5 - 15, eğilme dayanımında %3 - 12 oranlarında düşüş olduğunu göstermiştir. Özellikle %20 PET katkılı beton, KYB için gerekli olan işlenebilirlik şartlarını sağlayamamış ve basınç dayanımında yaklaşık %50 oranında ciddi bir azalma yaşanmıştır. Buna karşılık, %5 oranındaki PET ikamesi, betonun hem taze hem de sertleşmiş özelliklerinde %7'ye kadar birim hacim ağırlık azalması dışında önemli bir değişikliğe yol açmamış ve bu oran, geleneksel ince agregalar için sürdürülebilir bir alternatif olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca yapılan tahribatsız testlerden elde edilen verilerle, geri dönüştürülmüş PET agregalı KYB'lerin kalite kontrolünde kullanılabilecek korelasyon eğrileri geliştirilmiştir.

Asdollah-Tabar ve arkadaşları (2023), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yaygın yapı malzemelerinden biri olan şap (screed) üretiminde, ince boyutlu geri dönüştürülmüş PET atıklarının agregalar olarak kullanılmasının mekanik ve termal özellikler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, artan plastik tüketimine karşı sürdürülebilir bir çözüm sunmayı ve yapı sektöründe çevreci alternatiflerin kullanımını teşvik etmeyi amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında, PET agregaları %0, %5, %10 ve %15 oranlarında ağırlıkça ikame edilerek farklı şap karışımları hazırlanmış ve sonuçlar plastik içermeyen bir referans şap ile karşılaştırılmıştır. Taze durumda işlenebilirlik ve hava içeriği, sertleşmiş durumda ise birim hacim ağırlık, termal iletkenlik, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı ölçülmüştür. Elde edilen bulgulara göre, %15 PET katkısında yoğunluk %5 - 7, termal iletkenlik %20 oranında azalmış; basınç dayanımında %18, eğilme dayanımında ise %10 - 12 oranlarında düşüş gözlenmiştir. SEM analizleri, çimento matrisinin PET agregalarla temasında bir ayrılma yüzeyi oluştuğunu, ancak buna rağmen matris ile PET arasında mekanik bağlanmanın sürdüğünü ortaya koymuştur.

González ve arkadaşları (2023), tarafından yürütülen çalışmada, ince agreganın geri dönüştürülmüş polietilen tereftalat (R-PET) ile kısmen değiştirilmesinin, betonun mekanik ve elektrokimyasal özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmanın amacı, sürdürülebilir, uzun ömürlü ve yüksek dayanımlı yeşil yapı betonları üretmek için doğal kaynakların kullanımını azaltırken, çevresel etkileri en aza indirmektir. Beton karışımlarında %0, %5, %10 ve %15 oranlarında R-PET agregası kullanılarak numuneler hazırlanmış ve bu numunelerin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, açık devre potansiyeli (OCP) ve polarizasyon eğrileri ile korozyon direnci incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, %5 oranındaki R-PET ikamesinde basınç dayanımı %7 oranında azalırken, eğilme dayanımı %5 - 8 arasında hafif artış göstermiştir. %10 ve %15 katkı oranlarında ise basınç dayanımında sırasıyla %15 ve %25 azalma, eğilme dayanımında ise %10 ve %18 oranında azalma gözlenmiştir. Ayrıca, R-PET katkısı sayesinde deniz suyu elektroliti altında test edilen donatı çeliğinin korozyon oranında belirgin bir azalma sağlanmıştır. Bu sonuçlar, geri dönüştürülmüş PET'in yalnızca çevresel sürdürülebilirlik açısından değil, aynı zamanda mekanik dayanım ve donatı koruması gibi teknik gereklilikleri de karşılayabilecek potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Kumar ve arkadaşları (2023), tarafından gerçekleştirilen derleme ve meta-analiz çalışmasında, 2010–2022 yılları arasında yapılan 20 bağımsız araştırmanın sonuçları incelenerek, yapısal hafif betonlarda PET agregalarının kullanımı üzerine genel bir değerlendirme sunulmuştur. Çalışma kapsamında, PET agregalarının üretim yöntemleri, fiziksel ve termal özellikleri, beton içerisindeki kullanım oranları ve bu oranların betonun dayanım ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, %20'ye kadar PET agregası kullanımıyla beton yoğunluğunda %10 - 20 oranında azalma sağlanmış, basınç dayanımında ise %5 - 15 arasında düşüş görülmüştür. Ancak çekme ve eğilme dayanımı, %10'a kadar olan PET katkılarında %5 - 12 arasında artış göstermiştir. PET katkısı ile birlikte su emme oranı %10 - 30 arasında artış göstermiş ve bunun sonucu olarak betonun dayanıklılığı kısmen azalmıştır; bu durum betonun gözenekliliğiyle ilişkilendirilmiştir. Meta-analiz kapsamında uygulanan t-testi ve F-testi gibi hipotez testleri, PET içeriği ile elde edilen deneysel sonuçlar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar olduğunu göstermiştir. Araştırmacılar, PET agregalarının betonda daha etkili kullanımı için melez karışım tasarımları ve optimum katkı oranlarının belirlenmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca, yüksek dayanımlı ya da hafif beton üretimi için PET katkılı karışımların optimizasyonuna yönelik ileri düzey deneysel tasarımların gerekliliğine dikkat çekilmektedir.

Khan ve arkadaşları (2024), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, PET plastik atıklarının termal ve mekanik yöntemlerle agrega haline getirilmesi süreci detaylı olarak ele alınmış; elde edilen agregaların morfolojik, fiziksel, mekanik ve maliyet analizleri yapılmıştır. Çalışma hem çevresel sürdürülebilirliği teşvik etmek hem de inşaat sektöründe doğal agrega kullanımını azaltmak amacı taşımaktadır. 1 kg PET agregasının üretimi için 24.341,67 Uganda Şilini (yaklaşık 6,09 USD) harcadığı belirtilmiştir. Düzgün olmayan şekilli, düzgün yüzeyle agregalar elde edilmiştir. İncelik modülü: 4,25, yassılık indeksi: %26, uzunluk oranı (elongation index): %16, parçacık indeksi: %13 olan morfolojik, parçacık yoğunluğu: 1330 kg/m³, yığın yoğunluğu: 715 kg/m³, su emme oranı: %0,445 olan basınç dayanımı: 50 MPa, agrega Kırılma Değeri (ACV): %37, %10 İnce Malzeme Değeri: 71 kN, agrega Darbe Değeri (AIV): %24, agrega Aşınma Değeri (AAV): %20 olan mekanik özellikler elde edilmiştir. Elde edilen bu teknik özellikler, üretilen PET agregalarının yapısal hafif betonlar ve rijit kaplama sistemlerinde kullanım için uygun olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu agregaların, beton karışım tasarımlarında doğal agregaların tamamen ya da kısmen yerine kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Yapılan çalışmalar, plastik atıkların yalnızca çevreye olan olumsuz etkilerini azaltmakla kalmayıp, betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini de iyileştirebileceğini göstermektedir. Özellikle düşük oranlı katkılarla elde edilen dayanım ve performans iyileştirmeleri, bu tür malzemelerin yapı sektöründe alternatif bir çözüm olarak kullanılmasını teşvik etmektedir.

3. YÖNTEM

Araştırmanın bu bölümünde, plastik atık katkılı betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinin tayin edilmesine yönelik deneysel yöntemler ayrıntılı olarak sunulacaktır. Çalışma kapsamındaki tüm deneysel uygulamalar, Kayseri Ericyes Üniversitesi inşaat mühendisliği Bölümü ilgili laboratuvar ortamlarında gerçekleştirilmiştir. Bu bölüm, araştırma yöntemi, kullanılan malzemeler, karışım modeli, numune hazırlama evresi, kürlenme koşulları, deneysel incelemeler ve araştırma yöntemlerini kapsayan geniş bir yapıda ele alınmıştır.

3.1. Araştırma Modeli

Araştırmanın temeli deneysel yöntem yaklaşımına dayanmaktadır. Bağımsız değişken olarak plastik atık türleri (PET, PP, PE) ve katkı oranları (%0.5, %1.0, %1.5) belirlenmiştir. Bu oranlar, plastik katkıların agrega miktarına göre ağırlıkça yüzdesi olarak hesaplanmıştır. Bağımlı değişkenler ise betonun basınç dayanımı, eğilme dayanımı, çekme dayanımı, birim hacim ağırlık, su emme ve ısı iletkenliği performanslarıdır. Her araştırma grubu için üç tekrar yapılmış ve elde edilen sonuçlar ortalama değerler üzerinden değerlendirilmeye alınmıştır.

Araştırma Süreci:

- a) Hipotez: Atık plastiklerin betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştireceği varsayılmıştır.
- b) Bağımsız Değişkenler atık plastik türü ve katkı oranı, bağımlı Değişkenler ise Betonun mekanik ve fiziksel özellikleri olarak belirlenmiştir.
- c) Kontrol: Su/çimento oranı (0.48), agrega ve çimento türü, kürlenme koşulları sabit tutulmuştur.
- d) Deney Grupları: 1 kontrol + 9 plastik katkılı karışım (3 plastik türü × 3 katkı oranı)
- e) Numune: Her beton karışımından 3'er adet olmak üzere farklı boyutlarda >90 adet numune üretilmiştir.

Bu model, plastik atıkların yapı malzemesi olarak uygulanabilirliğini araştırmayı ve sektöre yönelik akademik dayanak sağlamayı amaçlamaktadır.

3.2. Kullanılan Malzemeler

- Çimento

Bu çalışmada kullanılan çimento, TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42,5 R tip Portland çimentosudur. Çimento Votorantim Çimento San. Tic. A.Ş. ürünü olup çimentonun fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemek için çalışma yapılmamıştır. Fabrikadan elde edilen ürün değerleri kabul edilmiş ve özellikleri şekil 3'te verilmiştir. Çimento yerel bir yapı malzemeleri tedarikçisinden temin edilmiştir.

Özellik	Ölçüm Sonuçları	TS EN197-1 Standard Limit Değerleri	
		Minimum	Maksimum
Kimyasal Özellikler			
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0,52	-	5.0
MgO (%)	1,05	-	-
SO ₃ (%)	3,21	-	4.0
Kızdırma Kaybı (%)	3,56	-	5.0
Cl ⁻ (%)	0,0129	-	0.1
Eşdeğer Toplam Alkali (%)	0,681	-	-
Fiziksel Özellikler			
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3,20	-	-
Özgül Yüzey (cm ² /gr)	3510	-	-
Normal Kıvam Su İhtiyacı (%)	28,0	-	-
Priz Başlangıcı (dakika)	170	60	-
Priz Sonu (dakika)	230	-	-
Hacim Genleşmesi (mm)	2,0	-	10
Mekanik Özellikler			
2 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	27,2	20	-
7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	40,9	-	-
28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	51,2	42.5	62.5

Şekil 3. Votorantim CEM I 42,5 R tip Portland çimentosu fiziksel ve kimyasal özellikleri

- Agregat:

Bu çalışmada beton karışımında hem iri hem de ince agregat kullanılmıştır. İri agregat olarak, 4–16 mm boyut aralığında kırma taş tercih edilmiştir. Bu agregat, yüksek mekanik dayanım sayesinde betonun taşıyıcı yapısına katkı sağlamaktadır. İri agregat, Kayseri

Melikgazi ilçesinde Tokgöz Grup bünyesindeki Tokgöz Maden Ürünleri Demir Çelik San. Tic. Ltd. Şti tarafından işletilen Koramaz taş ocağından temin edilmiştir.

İnce agregalar olarak ise, 0–4 mm tane boyutunda doğal kum kullanılmıştır. Doğal kum, betonun işlenebilirliğini artırmak ve boşluk oranını azaltmak amacıyla karışıma dâhil edilmiştir. İnce agregalar, Kayseri Sarıoğlan ilçesinde bulunan Kızılırmak Nehri yatağında bulunan Tokgöz Grup bünyesindeki Tokgöz Maden Ürünleri Demir Çelik San. Tic. Ltd. Şti tarafından işletilen kum ocağından temin edilmiştir. İri ve ince agregalar, çalışma kapsamında ilgili ocaklardan yerinde temin edilmiştir.

Deneylerde kullanılan ince ve iri agregalara ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tokgöz Madencilik'den temin edilmiş olup, ilgili veriler Tablo 4'te sunulmuştur.

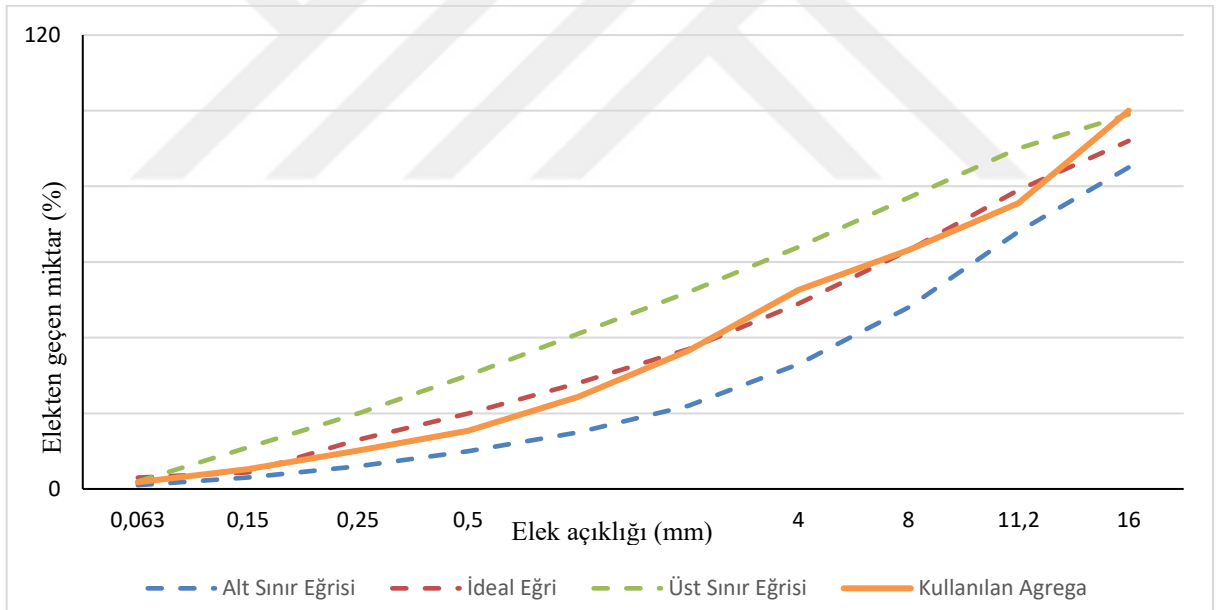
Tablo 4. İnce ve iri agregaların fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellik	İnce Agregalar	İri Agregalar
Granülometri (mm)	0 - 4	4 - 16
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2.67	2.73
Su Emme Oranı (%)	2.8	1.5
Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)	1550	1720
Yassılık İndeksi (%)	-	13
Los Angeles Aşınma Oranı (%)	-	22
Organik Madde (%)	0.3	0.1
Klorür İçeriği (%)	0.006	0.004
Sülfat İçeriği (%)	0.3	0.4

Beton karışımında kullanılan agregaların dane boyutu dağılımlarını belirlemek amacıyla elek analizi deneyi gerçekleştirilmiştir. Beton karışımında %60 oranında iri agregalar, %40 oranında ise ince agregalar kullanılmıştır. İri agregalar, kullanımdan önce elenerek en büyük tane çapı (D_{max}) 16 mm olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Bu uygulama, agregalar gradasyonunun uygunluğunu sağlamak ve betonun dayanım ile işlenebilirlik özelliklerini optimize etmek amacıyla tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılan agregaların dane boyutu dağılımlarına ilişkin detaylar, aşağıda Tablo 5'de verilen elek analizi sonuç tablosu sunulmuştur.

Tablo 5. Elek analizi tablosu

Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen			Miktar(%)
	Alt Sınır	Orta Sınır	Üst Sınır	Kullanılan Agregaya
16	85	92	99	100
11,2	68	79	90	75,51
8	48	63	77	63,12
4	33	49	64	52,61
2	22	37	52	36,58
1	15	28	41	24,25
0,5	10	20	30	15,37
0,25	6	13	20	10,11
0,15	3	7	11	5,22
0,063	1	3	5	1,78



Şekil 4. Karışım agregası granülometri eğrisi

Elek analizi verilerine dayalı olarak hazırlanan granülometri eğrisi şekil 4'te verilmiştir. Granülometri eğrisinde, kullanılan agregaların tane dağılımı, TS 706 EN 12620: Beton Agregaları standardında belirtilen üst ve alt sınır eğrileri ile karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Yapılan değerlendirme sonucunda, elde edilen granülometri eğrisinin TS 706

EN 12620 standardında belirlenen sınır eğrileri arasında yer aldığı ve ideal eğriye yakın bir dağılım sergilediği görülmüştür. Bu durum, kullanılan agreganın granülometrik özellikler açısından TS 706 EN 12620 standardına uygun olduğunu teyit etmektedir. Bu uygunluk, beton karışımında işlenebilirlik, dayanım ve boşluk oranı gibi kritik özelliklerin sağlanabileceğini göstermektedir.

- Su

Beton karışımında kullanılan su, içme suyu kalitesinde olup pH değeri 8.2 olarak ölçülmüştür (KASKİ, 2025). Çalışmada kullanılan su, Erciyes Üniversitesi şehir şebeke suyundan temin edilmiştir.

- Plastik Atıklar

Plastikler; yüksek moleküler ağırlığa sahip, sentetik veya yarı sentetik polimer zincirlerinden oluşan, şekillendirilebilir, hafif ve dayanıklı mühendislik malzemeleridir. Kimyasal açıdan plastikler, karbon (C) temelinde yapılandırılmış uzun zincirli polimer yapılarından meydana gelir ve genellikle hidrojen (H), oksijen (O), azot (N) gibi elementleri de içerebilir. Bu polimer zincirleri, termoplastik veya termoset özellikler gösterebilir ve farklı üretim teknikleriyle çeşitli fiziksel biçimlere dönüştürülebilir. Günlük yaşamda yaygın olarak kullanılan plastik ürünler; ambalaj, tekstil, otomotiv ve inşaat sektörlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak bu malzemelerin biyolojik olarak parçalanma süreçlerinin oldukça yavaş olması nedeniyle doğada uzun süre kalmaları, ciddi çevresel sorunları beraberinde getirmektedir. Plastik atıklar, genellikle tüketim sonrası veya üretim esnasında ortaya çıkan ve yeniden kullanımı ya da geri dönüşümü sağlanamayan plastik malzemeleri ifade etmektedir. Doğaya kontrolsüz bir şekilde bırakılan bu atıklar, başta toprak ve su sistemleri olmak üzere tüm ekosistemlerde birikerek çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bu çalışma kapsamında ise, plastik atıkların çevresel etkilerinin azaltılmasına katkı sağlamak amacıyla; söz konusu atıkların beton üretiminde alternatif agrega ve lif donatı malzemesi olarak kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Bu sayede hem atık yönetimi açısından bir çözüm geliştirilmesi hem de beton teknolojisinde sürdürülebilir malzeme kullanımının teşvik edilmesi hedeflenmiştir.

Çalışmada üç farklı tür plastik atık kullanılmıştır:

- PET: Etilen monomerlerinin polimerleşmesiyle elde edilen, $(C_2H_4)_n$ genel kimyasal formülüne sahip ve yüksek kimyasal direnç gösteren yarı kristalin bir termoplastiktir. Kullanılmış içecek şişelerinden elde edilmiştir. Lif ve agrega yerine kullanılmıştır.
- PP: Propilen monomerlerinden oluşan, $(C_3H_6)_n$ kimyasal yapısıyla tanımlanan ve ısı dayanımı yüksek, yarı sert bir poliolefin türüdür. Enjeksiyon üretiminden kaynaklanan endüstriyel atıklardan sağlanmıştır. Sadece lif donatı olarak kullanılmıştır.
- PE: Etilen monomerlerinin polimerleşmesiyle elde edilen, $(C_2H_4)_n$ genel kimyasal formülüne sahip ve yüksek kimyasal direnç gösteren yarı kristalin bir termoplastiktir. Ambalaj atıklarından elde edilip yalnızca agrega yerine kullanılmıştır.

Kullanılan plastik atıklar, Şam Yapı A.Ş. bünyesindeki Csr Plastik isimli yerel geri dönüşüm tesislerinden temin edilmiştir. Lif katkıları 5–25 mm uzunluk aralığında, granül katkıları ise 3-10 mm boyut aralığında olacak şekilde firmadan temin edilmiştir. Şekil 5'te çalışmada kullanılan lif ve granül formdaki atık plastik görsellerine yer verilmiştir.



Şekil 5. Lif ve Granül formunda atık plastik beton katkıları

- Kimyasal Katkı

Bu çalışmada, beton karışımının işlenebilirliğini artırmak amacıyla polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcılar, tarak tipi kopolimer yapısına sahip anyonik ana zincirler ve etilen glikol esaslı yan zincirler içerir. Karboksilat grupları çimento parçacıklarına güçlü adsorpsiyon sağlarken, polieter yan zincirleri sterik itme mekanizmasıyla taze betonun akışkanlığını ve slump dayanımını artırır. Süper akışkanlaştırıcılar, çimento taneciklerinin dispersiyonunu artırarak daha düşük su içeriğiyle akıcı karışımlar elde edilmesini sağlar. Kullanılan

kimyasal katkı, TS EN 934-2 standardına uygun, inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan bir katkı maddesidir. Katkı maddesi, Ven Kimya San. Tic. A.Ş. isimli İstanbul merkezli yapı kimyasalları tedarikçilerinden temin edilmiştir. Polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcının teknik ve kimyasal özellikleri, firma tarafından sağlanan ürün değerleri esas alınarak Tablo 6’da sunulmuştur

Tablo 6. Polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcının özellikleri

Özellik	Ölçüm Sonuçları
Görünüm	Berrak, şeffaf
Katı İçerik (%)	16.35
Yoğunluk (kg/m ³)	1.05
PH	6.9
Klorür İçeriği	% 0.05

Bu çalışmada kullanılan tüm malzemelerin özellikleri ve temin yerleri tablo 7’de açıkça listelenmiştir.

Tablo 7. Kullanılan malzeme tedarikçileri ve özellikleri

Malzeme	Özellikleri	Tedarikçi
Çimento	Yüksek erken dayanım	Yerel üretici
Polikarboksilat temelli süper akışkanlaştırıcı	Yüksek işlenebilirlik	Yerel üretici
İnce agreg	0-4 mm ince agreg	Yerel dere yatağı
İri agreg	4-16 mm iri agreg	Yerel taşocağı
PET lif	10-20 mm uzunlukta, esnek	Geri dönüşüm firması
	12 mm uzunlukta, kimyasal	
PP lif	dirençli	Geri dönüşüm firması
	2-5 mm çapında düşük	
PE granül	yoğunluklu	Geri dönüşüm firması

3.3. Karışım Tasarımı

Geri dönüşüm tesisinden temin edilen PET, PP ve PE plastik atıkları; yerel taş ocağı ve dere yatağından elde edilen agregalar, CEM I 42,5 R tipi çimento ve polikarboksilat temelli süper akışkanlaştırıcı ile birlikte kullanılarak beton numuneleri üretilmiştir Kontrol betonu için karışım hesaplamaları Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 de (TBDY) önerilen minimum beton sınıfı C30 olduğu için, C30 sınıfına göre hazırlanmıştır. C30 beton, yeterli taşıma kapasitesi ve dayanıklılık özellikleri sayesinde, konut yapıları gibi genel yapı projelerinde taşıyıcı elemanlarda yaygın olarak tercih edilen bir beton dayanım sınıfıdır. Bu çalışmada, plastik atık katkılarının betonun mekanik performansına etkilerinin doğru şekilde değerlendirilmesi amacıyla, C30 dayanım seviyesinde beton karışımları tercih edilmiştir. Plastik katkıları %0.5, %1.0 ve %1.5 oranlarında agrega yerine agreganın ağırlığı oranında eklenmiştir. C30 beton için hedef basınç dayanımı $f_{cm} = 36$ MPa olarak belirlenmiştir; bu değer, TS EN 206 standardında yer alan ilgili tablodan alınmıştır. Bu değere karşılık gelen su/çimento (w/c) oranı, TS 802 Çizelge 6'dan enterpolasyon yöntemiyle 0.48 olarak belirlenmiştir. Çevresel etki sınıfı ise TS EN 206 Çizelge 1'e göre XC1 olarak seçilmiştir. TS EN 206'ya göre izin verilen en büyük su/çimento oranı 0.65 iken, hedef dayanım için gerekli su/çimento oranı 0.48 olarak belirlenmiştir. Bu nedenle, beton karışım tasarımında en düşük su/çimento oranı tercih edilmiştir. Su miktarı, TS 802'deki Şekil 11'den ve kırmataş için $D_{max} = 16$ mm ile çökme değeri 15-18 cm aralığına göre 220 kg olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda;

Su miktarı $w = 220$ kg olarak bulunmuştur.

Karışımında akışkanlaştırıcı kullanıldığından dolayı su miktarı %10 oranında azaltılacaktır.

$w = 220 - 220 \cdot 0.1 = 198$ kg su kullanılacaktır.

Su çimento oranı w/c formülü ile çimento oranı aşağıdaki formül ile tayin edilmiştir.

$$0.48 = \frac{198}{c} \quad (3.1)$$

$c = 412$ kg çimento gerekmektedir.

TS EN 206'ya göre XC1 etki sınıfı için öngörülen minimum çimento miktarı 300 kg'dır. Hedef dayanımı sağlayabilmek amacıyla karışım tasarımında çimento miktarı 412 kg olarak seçilmiştir.

$D_{max} = 16$ mm olan agrega kullanılan hava sürüklenmemiş beton için hava miktarı %2,25 olarak kabul edilmiştir. Bu oran, 1 m³ beton hacminde 22,5 dm³ hacime karşılık gelmektedir.

Toplam hacim aşağıdaki formül ile ifade edilmektedir.

$$V_{beton} (1m^3) = V_{agrega} + V_{su} + V_{hava} + V_{çimento} + V_{akışkanlaştırıcı} \quad (3.2)$$

$$1000 \text{ dm}^3 = V_{\text{agrega}} + 198 + 22.5 + (412/3.15) + 4.5$$

$V_{\text{agrega}} = 644 \text{ dm}^3$ $D_{\text{max}} 16$ için grometriden ince agrega oranı %40, iri agrega oranı %60

$$V_{\text{ince}} = 0.40 * 644 = 257,6 \text{ dm}^3$$

$$W_{\text{ince}} = 257,6 * 2,67 = 688 \text{ kg}$$

$$V_{\text{iri}} = 0.60 * 644 = 386,4 \text{ dm}^3$$

$$W_{\text{iri}} = 386,4 * 2,73 = 1055 \text{ kg}$$

$$W_{\text{beton}} = 1055 + 688 + 412 + 198 + 4.5$$

$$W_{\text{beton}} = 2358 \text{ kg}$$

$$\gamma_{\text{beton}} = \frac{2358}{1000} = 2.358 \text{ t/m}^3$$

Karışım sırasında agregada nem oranları göz önünde bulundurulmuş ve agrega nem oranı 0 olarak alınmıştır. Buna göre düzeltilmiş su ve agrega miktarları aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

İri agrega için;

$$1055 * (0,015 - 0) = 16 \text{ kg/m}^3 \text{ su eklenecektir.}$$

İnce agrega için;

$$688 * (0,028 - 0) = 19,3 \text{ kg/m}^3 \text{ su eklenecektir.}$$

Düzeltilmiş su;

$$W_{\text{su}} = 198 + 16 + 19,3 = 233,3 \text{ kg/m}^3$$

Düzeltilmiş agrega;

$$W_{\text{iri}} = 1055 - 16 = 1039 \text{ kg/m}^3$$

$W_{\text{ince}} = 688 - 19,3 = 668,7 \text{ kg/m}^3$ olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan yeni değerler ile birlikte γ_{beton} aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$\text{Çimento} = 412 \text{ kg}$$

$$\text{Su} = 233,3 \text{ kg}$$

$$\text{İri agrega} = 1039 \text{ kg}$$

$$\text{İnce agrega} = 668,7 \text{ kg}$$

$$\text{Kimyasal katkı} = 4.5 \text{ kg}$$

$$W_{\text{beton}} = 1039 + 668,7 + 233,3 + 412 + 4,5$$

$$W_{\text{beton}} = 2357,5 \text{ kg}$$

$$\gamma_{\text{beton}} = \frac{2357,5}{1000} = 2.3575 \text{ t/m}^3$$

Tüm bu hesaplamalar neticesinde tablo 8'de, katkı oranlarına göre ayarlanmış karışım içerikleri sunulmuştur.

Tablo 8. Plastik katkı türü ve oranlarına göre karışım içerikleri(kg/m³)

Katkı Türü	Katkı Oranı (%)	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Kimyasal Katkı (kg/m ³)	İnce Agrega (kg/m ³)	İri Agrega (kg/m ³)	Katkı Miktarı (kg/m ³)
(Kontrol)	–	412	233,5	4.5	668,7	1039	–
PE	0.5	412	233,5	4.5	665	1034	9
PE	1.0	412	233,5	4.5	662	1029	17
PE	1.5	412	233,5	4.5	659	1024	25
PP	0.5	412	233,5	4.5	665	1034	9
PP	1.0	412	233,5	4.5	662	1029	17
PP	1.5	412	233,5	4.5	659	1024	25
PET	0.5	412	233,5	4.5	665	1039	9
PET	1.0	412	233,5	4.5	662	1029	17
PET	1.5	412	233,5	4.5	659	1024	25

Uygulama ilkeleri:

- Atık plastik katkılar kuru karışımda, lif katkılar son evrede karışıma ilave edilmiştir.
- Tüm malzemeler hassas terazide tartılmıştır.
- Karışımlar pan tipi mikserde aynı sürelerle yapılmıştır.

Homojenlik ve hazırlık:

- Bu çalışmada kullanılan plastik atıklar, ilgili geri dönüşüm tesisleri tarafından önceden boyutlandırılmış şekilde temin edilmiştir. Lif formundaki katkı malzemeleri (PET ve PP), 5–25 mm uzunluk aralığında kesilmiş olarak; granül formundaki PE katkısı ise 3-10 mm boyut aralığında olacak şekilde hazır olarak elde edilmiştir. Tüm katkı türleri (lif ve granül), ağırlıkça toplam agrega miktarının %0.5, %1.0 ve %1.5 oranlarında karışıma dâhil edilmiştir.

- Su/çimento oranı çalışmada 0.48 düzeyinde sabit tutulmuştur. Ancak katkı türlerine bağlı olarak betonun kıvamında görülen farklılıkları dengelemek amacıyla, tüm karışımlarda çimento ağırlığının %1'i oranında Polikarboksilat temelli süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Bu oran, hem katkıların homojen dağılmasını sağlamakta hem de plastik atıkların karışımdaki su ihtiyacına etkisini dengelemekte yeterli bulunmuştur. Bu karar yapılan gözlem neticesinde verilmiştir. İlave su veya katkı ihtiyacı ön denemelerle gözlemlenmiş ve bu doğrultuda C30 betonu için tek tip dozaj ile üretim kararı alınmıştır.

3.4. Numune Hazırlama Süreci

Numune türleri:

- 150×150×150 mm küpler (basınç dayanımı)
- 100×100×400 mm prizma (eğilme dayanımı)
- 150×300 mm silindir (yarmada çekme dayanımı)
- 150×64 mm silindir (darbe dayanımı)
- 100×100×100 mm küp (birim hacim ağırlık ve su emme)
- 300×300×50 mm (ısı iletkenliği)

Kalıplar:

- Kalıplar test öncesi temizlenmiş ve ince kalıp yağıyla yağlanmıştır.
- Kalıplar çelik ve yüksek dayanımlı plastikten üretilmiştir.

Plastik katkılı taze beton karışımlarının dökümünde kullanılan 150x150x150 mm boyutlarında standart küp kalıplar şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. Numune kalıpları

Karışımlar tamamlandıktan sonra, numune kalıplarına üç tabakada yerleştirme işlemi uygulanmıştır. Her tabaka 25 kez şişleme ile sıkıştırılmış ve ardından vibrasyon cihazında 30 saniye titreşim uygulanarak sıkışma ve hava boşluklarının giderilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir.

Etiketleme ve gruplama

Her numune, karışım kodu, plastik katkı oranı, plastik türü ve döküm tarih-saat bilgilerini içeren etiketlerle tanımlanmıştır. Etiketler seçilirken suya ve sıcaklığa dayanıklı olması nedeni ile özel laboratuvar etiketleri seçilmiştir. Ayrıca numuneler test türüne göre raf sistemi üzerinde ayrıştırılmıştır.

Kürleme süreci

Döküm tamamlandıktan sonra numune kalıpları, 24 saat boyunca $+23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ve %95 bağıl nemde kürleme tankında bekletilmiştir. Bu ortam, çimento Hidratasyon tepkimesinin sağlıklı ilerlemesi için ideal ortamdır. İlk kür boyunca numuneler dış etkilere karşı korunmuştur. 24 saat sonunda atık plastik katkılı numuneler kalıptan dikkatlice çıkarılmış ve kür havuzlarına alınmıştır. Standart Su Kürü: $+20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ sabit sıcaklıkta su içerisinde 28 gün bekletme olacak şekilde uygulanmıştır.



Şekil 7. Deneylerde kullanılmak üzere hazırlanmış kürleme işlemleri bitmiş beton numuneleri

Numune depolama ve teste hazırlık

Kürleme süreci tamamlanan beton numuneleri deformasyona uğramaması için özel raflarda şekil 7’de görüldüğü gibi muhafaza edilmiş ve test öncesinde her numunenin yüzey düzgünlüğü kontrol edilmiştir. Numuneler, test öncesinde sıcaklık ve nem dalgalanmalarının minimum olduğu, sabit ortam sıcaklığına sahip laboratuvar odasında en az 24 saat bekletilmiştir. Bu bekletme süresi ile numunelerin test ortamı koşullarına adaptasyonu ve ısı dengesinin sağlanması hedeflenmiştir. Bu uygulama, numuneler arasında sıcaklık ve nem farklılıklarından kaynaklanabilecek deney sonuçlarındaki sapmaları minimize etmek amacıyla yapılmıştır.

3.5. Deneysel Testler ve Uygulama Protokolleri

Bu bölümde, plastik atık katkılı beton numuneleri üzerinde uygulanan mekanik testler ve bu testlerin uygulama yöntemleri ayrıntılı bir şekilde sunulmaktadır. Her test yöntemi, kullanılan cihazlar, deney koşulları, ölçüm aralıkları ve değerlendirme kriterleriyle birlikte açıklanmıştır. Aşağıda, her test başlığı altında uygulanan standart ve normlar da belirtilmiştir.

3.5.1 Basınç dayanım deneyi

Basınç dayanımı, betonun en temel mekanik özelliklerinden biridir ve atık plastik katkıların beton üzerindeki etkilerini analiz etmek için en yaygın kullanılan deney yöntemidir. Bu test TS EN 12390-3 ve ASTM C39 standartlarına göre uygulanmıştır.

Numune Tipi: 150×150×150 mm küp numuneler

Cihaz: Hidrolik basınç test makinesi (kapasite: 2000 kN)

Uygulama:

- Her deney grubu için 3 adet numune kullanılmıştır.
- Numuneler kalıplarından çıkartılıp 24 saat boyunca 20 ± 2 °C sıcaklıkta bekletildikten sonra kür havuzuna alınmıştır. 7, 14 ve 28 günlük standart kürleme işlemi sonrasında deney aşamasına geçilmiştir.
- Test hızı: 0.6 ± 0.2 MPa/s olacak şekilde ayarlanmıştır.
- Maksimum yük kayıt altına alınmış ve dayanım test sonucu şu formülle hesaplanmıştır:

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (3.3)$$

Burada:

f_c : Basınç dayanımı (MPa)

P: Maksimum yük (N)

A: Yüzey alanı (mm²)



Şekil 8. Basınç dayanımı test cihazı

Şekil 8’ de görülen basınç dayanımı test elde edilen dayanım verileri, katkısız örnek betonla karşılaştırılarak değerlendirilmiş, katkı türü ve oranlarına göre karşılaştırmalı bir şekilde inceleme yapılmıştır.

3.5.2. Eğilmede çekme dayanım deneyi

Eğilme dayanımı, betonun çatlama direnci ve yük taşıma kapasitesi açısından son derece önemli bir parametredir. Atık plastik katkılarının bu mukavemet özelliği üzerindeki etkisini analiz etmek için TS EN 12390-5 ve ASTM C78 standart ve normlarına uygun olarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

Numune Tipi: 100×100×400 mm prizma numuneler

Cihaz: 100 kN kapasiteli eğilme testi presi, iki nokta yükleme sistemi

Uygulama Adımları:

- Numuneler 28 günlük kürlenme süreci sonrası test edilmiştir.
- Yükleme cihazında ortalama 400 mm açıklık mesafesi ile destekler yerleştirilmiş, yük ortadaki 1/3'lük kısma uygulanmıştır.
- Yükleme hızı 0.05 MPa/s olarak uygulanmıştır.
- Maksimum yük anında kırılma gerçekleştiğinde aşağıdaki formül ile eğilme dayanımı hesaplanmıştır:

$$f_r = \frac{P.L}{b.d^2} \quad (3.4)$$

Burada:

f_r : Eğilme dayanımı (MPa)

P: Uygulanan maksimum yük (N)

L: Destek açıklığı (mm)

b: Numune genişliği (mm)

d: Numune yüksekliği (mm)

Değerlendirme:

- Her karışım türü için 3 adet numune incelenmiştir.
- Plastik katkı oranı arttıkça eğilme dayanımındaki değişim grafiklerle değerlendirilmiştir.

3.5.3. Yarmada çekme dayanımı deneyi

Standart: TS EN 12390-6 ve ASTM C496

Numune Tipi: 150 mm çap × 300 mm silindir beton numuneler

Cihaz: Hidrolik basınç test cihazı

Uygulama Süreci:

- Deney Numunesi yatay pozisyonda cihaza yerleştirilmiştir.
- Yük dikey doğrultuda uygulanarak numune ortadan ikiye ayrılana kadar basınca maruz bırakılmıştır.
- Maksimum yük değeri ölçülmüş ve aşağıdaki formül ile çekme dayanımı hesaplanmıştır:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot L \cdot D} \quad (3.5)$$

Burada:

f_{ct} : Bölünme çekme dayanımı (MPa)

P: Maksimum yük (N)

L: Numune boyu (mm)

D: Numune çapı (mm)

3.5.4. Darbe dayanımı deneyi

Darbe dayanımı, betonun ani yüklemeler karşısında gösterdiği enerji sönümleme kapasitesini ifade eden önemli bir mekanik özelliktir. Bu deney, atık plastik katkıların betonun darbe dayanımına olan etkilerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma, ACI 544.2R standardı doğrultusunda düşey darbe yöntemi ile yürütülmüştür.

Numune Tipi: 150 mm çap × 64 mm kalınlıkta silindirik beton numuneler

Cihaz: Darbe Test Cihazı

Darbe dayanımı testlerinde 150 mm çap × 64 mm kalınlıkta silindirik beton numuneler kullanılmıştır. Deney düzeneğinde, 0.5 kg ağırlığında çelik bir bilye 45 cm yüksekten serbest bırakılarak numuneye düşürülmüştür.

Uygulama:

Her katkı türü (PET, PP, PE) ve katkı oranı (%0.5, %1.0, %1.5) için üçer adet numune hazırlanmış ve numuneler 28 günlük kürlenme sürecinin ardından test düzeneğine yerleştirilmiştir. Çelik bilye, her defasında aynı yükseklikten serbest bırakılarak numuneye

tekrarlı darbeler uygulanmıştır. Deneyler sabit düşme yüksekliği ve sabit çarpma enerjisi ile gerçekleştirilmiştir.

Deneyler sırasında, her darbe sonrası numuneler dikkatli şekilde gözle incelenmiş ve ilk görünür çatlak oluştuğu darbe sayısı ile nihai kırılmanın gerçekleştiği darbe sayısı ayrı ayrı kaydedilmiştir. İlk çatlak genellikle numune yüzeyinde gözle fark edilen ince bir çizgi olarak belirmiştir. Bu çatlak, ACI 544.2R standardına uygun biçimde değerlendirilmiş ve betonun çatlak başlatmaya karşı gösterdiği direnç düzeyini göstermesi bakımından önemli kabul edilmiştir. Nihai kırılma ise numunenin bütünlüğünün tamamen bozulduğu, artık yük taşıyamaz hâle geldiği darbe sayısı olarak tanımlanmıştır. Bu deney kapsamında hem ilk çatlak darbe sayısı hem de nihai kırılma darbe sayısı ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

3.5.5. Birim hacim ağırlık deneyi

Birim hacim ağırlık (BHA), betonun yoğunluk özelliğini tanımlayan ve hem mekanik hem de fiziksel davranışını etkileyen önemli bir parametredir. Bu deneyde, plastik atık katkılarının betonun birim hacim ağırlığı üzerindeki etkisini değerlendirebilmek amacıyla TS EN 12350-6 (taze beton) ve TS EN 12390-7 (sertleşmiş beton) standartlarına uygun olarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Numune Tipi:

- Taze beton için standart konik kap ($V = \sim 8$ litre)
- Sertleşmiş beton için $100 \times 100 \times 100$ mm küp numuneler

Cihaz ve Donanım:

- Dijital terazi (0.01 kg hassasiyet)
- Metal hacim kalıpları
- Çelik çubuk (kompaksiyon için)
- Master ve spatula

Uygulama Adımları:

Taze Beton İçin:

Kalıp iç yüzeyleri hafifçe yağlanmıştır. Taze beton karışımı üç eşit tabaka hâlinde kalıba yerleştirilmiştir. Her tabaka çelik çubukla 25 kez sıkıştırılmış ve yüzey düzeltilmiştir. Kalıp tamamen dolduktan sonra üst yüzey masterlanarak düzeltilmiş ve dış yüzey temizlenmiştir. Kalıp + beton toplam kütlesi tartılmış, boş kalıp ağırlığı çıkarılarak betonun net kütlesi belirlenmiştir. BHA, kütle/hacim oranı formülüyle hesaplanmıştır.

Sertleşmiş Beton İçin:

28 günlük kür süresini tamamlamış 100×100×100 mm boyutlarındaki küp numunelerin yüzeyleri temizlenmiştir. Laboratuvar şartlarında kurutulan numuneler dijital terazide tartılmıştır. Hacmi bilinen numunenin birim hacim ağırlığı aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır:

$$\gamma = \frac{m}{V} \quad (3.6)$$

Burada:

γ : Birim hacim ağırlık (kg/m³)

m: Numunenin kütlesi (kg)

V: Numunenin hacmi (m³)

Değerlendirme:

Her katkı oranı ve türü için 3 adet numune test edilmiştir. Taze ve sertleşmiş betonlar için ayrı ayrı ölçümler yapılarak ortalama değerler elde edilmiştir. Plastik katkı oranı arttıkça betonun yoğunluğundaki değişim grafik ve tablolar yardımıyla analiz edilmiştir.

3.5.6. Su emme deneyi

Su emme özellikleri, betonun durabilite özellikleri ve servis ömrü üzerinde doğrudan etki eden fiziksel değişkenlerdir. Özellikle plastik atıkların beton karışımına dahil edilmesi

durumunda bu özelliklerde meydana gelen değişiklikler, betonun çevresel etkilere karşı direnci açısından değerlendirilmelidir.

Test Standardı

- TS EN 12390-7 – Betonun hacimce su emme oranının tayini
- ASTM C642 – Sertleşmiş Betonun Yoğunluğu, Su Emme Oranı ve Boşluk Oranının Belirlenmesi için Standart Deney Yöntemi

Kullanılan Numuneler

- Prizmatik numuneler (100 mm × 100 mm × 100 mm)
- Her beton karışımından 3 adet

Deney Ekipmanı

- Su Emme Kabini

Test Prosedürü

- Numuneler 28 günlük kürlenme sürecinin ardından test öncesi 24 saat boyunca 105 ± 5 °C sıcaklıkta etüvde kurutulmuştur.
- Kurutulan numuneler soğduktan sonra hassas terazide tartılarak kuru ağırlık tayin edilmiştir (Wd).
- Numuneler 24 saat boyunca su dolu bir küvette bekletilmiştir.
- Su emmiş numuneler yeniden tartılarak doğun ağırlık tayin edilmiştir (Ws).
- Su emme yüzdesi aşığıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$S(\%) = \frac{W_s - W_d}{W_d} \times 100 \quad (3.7)$$

3.5.7. Isı iletkenliği deneyi

Bu deney, plastik atık katkılı beton numunelerinin ısı iletim düzeyini analiz ederek, enerji verimliliği yönünden potansiyel katkılarını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Yapı elemanlarının ısı iletkenliği, konfor seviyesini ve enerji tüketimini doğrudan etkileyen bir değerdir.

Test Standardı

- ASTM C518 – Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus
- TS EN 12664 – İnşaat malzemelerinde termal iletkenlik tayini

Kullanılan Numuneler

- Plaka tipinde numuneler (300 mm × 300 mm × 50 mm)
- Her katkı oranındaki numuneler için 3 adet

Deney Ekipmanı

- Isı İletkenlik Ölçer

Test Prosedürü:

- Numuneler 28 günlük kürlenme sürecini tamamladıktan sonra 23±2 °C sıcaklık ortam koşullarında 24 saat bekletilmiştir.
- Isı iletkenliği deneyleri, sabit 25 °C sıcaklık farkı esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla numunelerin üst ve alt yüzeylerine ısı sensörleri yerleştirilmiş ve ısı akış cihazı (heat flow meter) yardımıyla ölçümler alınmıştır. Sıcaklık farkı (ΔT), numunenin iki karşıt yüzeyi arasındaki sıcaklıkların farkı olup, ısı akışının yönünü ve büyüklüğünü belirleyen temel etkidir.
- Sabit sıcaklık farkı oluşturularak test başlatılmış, belirli bir süre boyunca sabit ısı akışı sağlanmıştır.
- Isı iletkenlik katsayısı (λ) aşağıdaki temel formülle hesaplanmıştır:

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{A \cdot \Delta T} \quad (3.8)$$

Burada:

- Q: Isı akışı (W)
- d: Numune kalınlığı (m)
- A: Numune yüzeyi (m²)
- ΔT : Sıcaklık farkı (K)

3.6. Deneysel Güvenirlik ve İç Doğruluk Önlemleri

Bu çalışmayı bilimsel geçerlik ve güvenirlilik açısından garanti altına almak için deneysel tasarım sürecinde iç ve dış tehditleri ortadan kaldırmaya yönelik sistematik önlemler alınmıştır. Bu önlemler hem laboratuvar ortamının standardizasyonu hem de test tekrarlarının kontrolü yönünden yapılandırılmıştır. İç geçerlik, deneysel sonuçların yalnızca uygulanan değişkenlerden kaynaklanıp kaynaklanmadığını sorgulayan bir kavramdır. Bu doğrultuda iç geçerlik tehditlerinin engellenmesi için aşağıdaki önlemler alınmıştır:

- Kontrol Grupları: Plastik katkı içermeyen kontrol betonları kullanılarak karşılaştırmalı analizler yapılmıştır.
- Sabit Kür Koşulları: Bütün beton numuneleri aynı sıcaklık (20 ± 2 °C) ve nem (95 ± 5) koşullarında kürlenme işlemine tabii tutulmuştur.
- Zaman Kontrolü: Deney uygulamaları, numunelerin kürlenme süreleri sabitlenerek aynı gün aralıklarında gerçekleştirilmiştir.

Dış geçerlik ve genellenebilirlik önlemleri

- Farklı Oranlar ve Türler: PET, PP ve PE türlerinin farklı oranlarda (0.5%, 1.0%, 1.5%) kullanılmasıyla geniş varyasyonlar elde edilmiştir.
- Uluslararası Standartlara Uygunluk: Tüm deneyler ilgili standartlara uygun olarak uygulanmıştır.

Aygıt ve gözlem güvenirliliği

- Kalibrasyon: Tüm test cihazlarının düzenli aralıklarla kalibrasyon işlemleri yapılmıştır.
- Operatör Sabitliği: Bütün deneylerde aynı cihazlar aynı kişiler tarafından kullanılmıştır.

Testler arası tutarlılık ve deneysel standartlaştırma aşağıdaki şartlar ile birlikte gerçekleştirilmiştir.

- Deney Protokolü Kitapçığı: Tüm laboratuvar personeli için detaylı adımları içeren protokol kitapçığı hazırlanıp personele teslim edilmiştir.
- Test Sıralaması: Testler belirli bir sıraya göre (önce fiziksel, sonra mekanik) yapılmıştır.

- Numune Etiketleme: Her numune, numune kimlik numarası ile etiketlenmiştir.

Etik kurallar ve araştırma güvenilirliği için aşağıdaki şartlara uyulmuştur.

- Veri Manipölasyonu Önlenmiştir: Her bir veri doğrudan deneysel cihazdan dijital olarak alınmıştır.
- Veri Saklama: Ham veriler 5 yıl süreyle dijital arşivde saklanacaktır.



4. BULGULAR

4.1. Basınç Dayanımı Bulguları

Numunelerin 7, 14 ve 28 günlük kütleme süreleri sonunda elde edilen basınç dayanımı sonuçları aşağıda tablo 9’da sunulmuştur.

Tablo 9. Basınç dayanım testi sonuçları (MPa)

Katkı Türü	Katkı Oranı	7 Gün	14 Gün	28 Gün
Kontrol (Yok)	-	29.4	37.1	44.8
PET	%0.5	28.7	36.2	43.2
PET	%1.0	27.5	34.9	41.5
PET	%1.5	25.1	32.3	38.8
PP	%0.5	29.1	36.7	44.1
PP	%1.0	28.3	35.5	42.3
PP	%1.5	26.8	33.6	39.9
PE	%0.5	28.9	36.5	43.5
PE	%1.0	27.6	34.4	40.7
PE	%1.5	25.5	32.1	38.2

Tablo 9’da görüldüğü üzere, plastik atık katkısı genel olarak basınç dayanımında mukavemet kaybına yol açmıştır. Atık türünden bağımsız olarak, plastik atık katkı oranı arttıkça basınç dayanımı değerlerinde belirgin bir düşüş meydana geldiği açıkça görülmektedir.

4.2. Yarmada Çekme ve Eğilmede Çekme Dayanımı Bulguları

Atık plastik katkılı beton numunelerinin yarmada çekme ve eğilme dayanım deney sonuçları tablo 10’da kontrol numunesi ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 10. Çekme dayanımları (MPa)

Katkı Türü	Katkı Oranı	Yarmada Çekme Dayanımı(MPa)	Eğilmede Çekme Dayanımı(MPa)
Kontrol	-	3.4	6.1
PET	%0.5	3.6	6.5
PET	%1.0	3.7	6.6
PET	%1.5	3.8	6.8
PP	%0.5	3.5	6.3
PP	%1.0	3.6	6.5
PP	%1.5	3.7	6.7
PE	%0.5	3.5	6.4
PE	%1.0	3.6	6.5
PE	%1.5	3.7	6.6

Plastik lif katkıları, yarmada çekme ve eğilme dayanımında gözle görülür bir artışa neden olmuştur. Bu durum betonun süneklik ve çatlama kontrolü açısından fayda sağlamaktadır. Tablo 10’da görüldüğü üzere, hem yarmada çekme dayanımı hem de eğilme dayanımı açısından en yüksek değerler, %1,5 katkı oranında kullanılan PET katkısı ile elde edilmiştir.

4.3. Darbe Dayanımı Bulguları

Darbe dayanımı deneyleri, plastik atık katkılarının betonun enerji emme kapasitesine olan etkilerini araştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde, belirli yüksekliklerden düşen çelik bilyelerin oluşturduğu darbe sayısı kayıt altına alınarak her bir katkı türü ve oranı için numunelerin çatlama ve kırılma mukavemeti ölçülmüştür.

Tablo 11. Darbe dayanım test sonuçları

Katkı Türü	Katkı Oranı	İlk Çatlak	Nihai Kırılma
Kontrol	-	16	20
PET	%0.5	19	26
PET	%1.0	21	28

Katkı Türü	Katkı Oranı	İlk Çatlak	Nihai Kırılma
PET	%1.5	23	30
PP	%0.5	20	27
PP	%1.0	22	29
PP	%1.5	24	32
PE	%0.5	18	25
PE	%1.0	20	27
PE	%1.5	21	28

Tablo 11.(Devamı)

Tablo 11’de yer alan darbe dayanımı test sonuçlarına göre, plastik atık katkısı kullanılan numunelerde hem ilk çatlak hem de nihai kırılma darbe sayılarında belirgin artış gözlenmiştir. En yüksek performans %1.5 PP katkısı ile elde edilmiştir.

4.4 Birim Hacim Ağırlık Bulguları

Birim hacim ağırlık, betonun hem mekanik hem de fiziksel performansında belirleyici bir rol oynamaktadır. Aşağıdaki tablo ve grafiklerde, taze ve sertleşmiş beton numuneleri için birim hacim ağırlık değerleri sunulmuştur.

Tablo 12. Taze ve sertleşmiş beton birim hacim ağırlıkları(kg/m³)

Katkı Türü	Katkı Oranı	Taze betonun birim hacim ağırlığı	28 Günlük betonun birim hacim ağırlığı
Kontrol	-	2358	2333
PET	%0.5	2313	2289
PET	%1.0	2276	2240
PET	%1.5	2232	2196
PP	%0.5	2321	2300
PP	%1.0	2286	2250
PP	%1.5	2242	2204

Katkı Türü	Katkı Oranı	Taze betonun birim hacim ağırlığı	28 Günlük betonun birim hacim ağırlığı
PE	%0.5	2331	2307
PE	%1.0	2291	2260
PE	%1.5	2253	2216

Tablo 12.(Devamı)

Plastik atık katkılarının yoğunluğu doğal agregalara göre çok daha düşük olduğundan, plastik katkı miktarı arttıkça hava kurusu durumunda elde edilen değerlerde, Tablo 12’de görüldüğü gibi betonun birim hacim ağırlığında düşüş gözlemlenmiştir. Plastik katkı oranı arttıkça hem taze hem de sertleşmiş betonun birim hacim ağırlığında azalmalar yaşanmaktadır. Bu durum, plastik atıkların düşük özgül ağırlığının bir sonucu olarak karşımıza çıkmaktadır.

4.5. Su Emme Bulguları

Su emme, betonun dayanıklılık performansını doğrudan etkileyen iki temel fiziksel özelliktir. Özellikle çevresel koşullara maruz kalan yapılarda, bu iki parametre yapı elemanlarının servis ömrünü belirleyen kritik faktörler arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, atık plastik katkıların betonun su emme davranışına etkisi değerlendirilmiştir. Deneysel uygulamalar TS EN 12390-7 ve ASTM C642 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Testlerde 100 mm × 100 mm × 100 mm boyutlarında prizmatik numuneler kullanılmış; her katkı türü (PET, PP, PE) ve katkı oranı (%0.5, %1.0, %1.5) için üçer adet beton numunesi hazırlanmıştır. 28 günlük kür sürecinin ardından, numuneler önce kurutulmuş ve ardından suya daldırılarak su emme oranları hesaplanmıştır.

Tablo 13.Su Emme Oranları(%)

Katkı Türü	Katkı Oranı	Su Emme(%)
Kontrol	-	5,6
PET	%0.5	4,9
PET	%1.0	4,4

Katkı Türü	Katkı Oranı	Su Emme(%)
PET	%1,5	4,1
PP	%0.5	4,6
PP	%1.0	4,2
PP	%1.5	3,7
PE	%0.5	4,7
PE	%1.0	4,3
PE	%1.5	3,9

Tablo 13.(Devamı)

Plastik atık katkısı, Tablo 13’de görüldüğü gibi genel olarak betonun su emme oranında azalmaya ve neden olmuştur. Deney sonuçlarına göre, su emme oranları açısından en verimli sonucu sağlayan atık grubunun PP olduğu açıkça görülmektedir.

4.6. Isı İletkenliği Bulguları

Betonun ısı iletkenliği, termal performans açısından en önemli fiziksel özelliklerden biridir. Yapı malzemelerinde düşük ısı iletkenliği, enerji verimliliği yüksek yapıların inşasında büyük önem taşır. Plastik atık katkılarının bu özellik üzerindeki etkisi, özellikle ısı yalıtımı ihtiyacı olan yapılarda dikkate alınması gereken bir durumdur. Yapılan deneylerde, tüm katkı türleri ve oranları için 28 günlük numunelerde ısı iletkenlik katsayıları kızgın plaka test yöntemi ile ölçülmüş ve sonuçlar Tablo14’de verilmiştir.

Tablo 14. Isı iletkenliği katsayısı (W/m*K)

Katkı Türü	Katkı Oranı	Isı İletkenliği
Kontrol	-	1.73
PET	%0.5	1.68
PET	%1.0	1.61

Katkı Türü	Katkı Oranı	Isı İletkenliği
PET	%1.5	1.56
PP	%0.5	1.66
PP	%1.0	1.60
PP	%1.5	1.54
PE	%0.5	1.67
PE	%1.0	1.60
PE	%1.5	1.53

Tablo 14.(Devamı)

Tablo 14'e göre çalışmada elde edilen deneysel veriler, plastik atık katkılarının betonun ısı iletkenliğini düşürdüğünü ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, katkı oranının artmasıyla birlikte ısı iletkenliği açısından malzemenin performansında belirgin bir iyileşme meydana geldiğini göstermektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

5.1 Tartışma

Bu bölümde, plastik atık katkılı beton numuneleri üzerinde gerçekleştirilen deneysel sonuçlar değerlendirilmiş ve elde edilen bulgular literatür verileri ile karşılaştırılmıştır.

5.1.1 Basınç dayanımı sonuçları üzerine tartışma

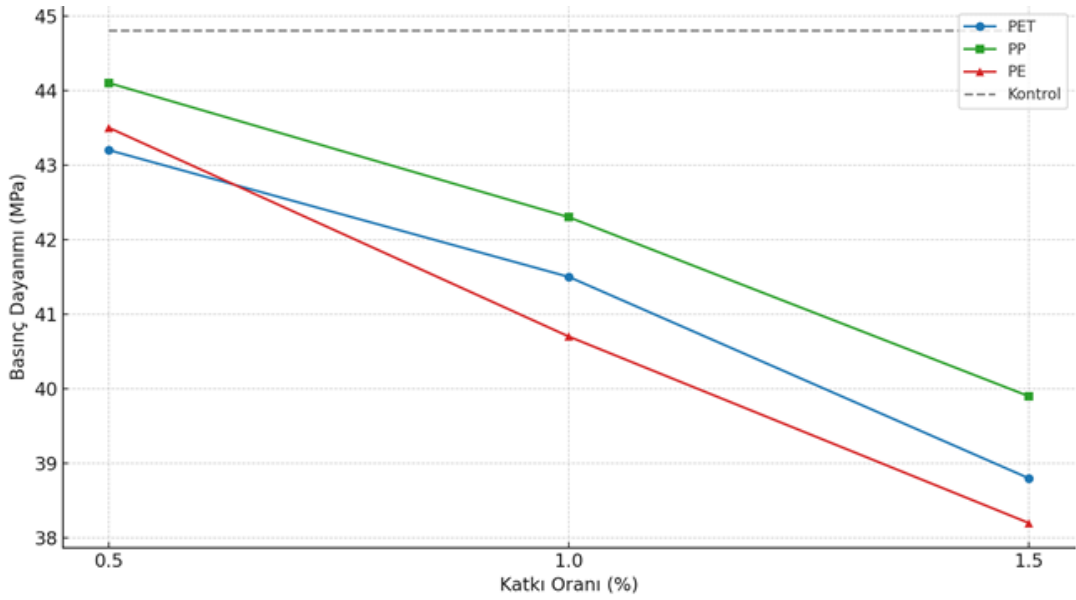
Yapılan deneysel çalışmalar, plastik atık katkılı betonların 28 günlük basınç dayanımında; katkı türü ve oranına bağlı olarak azalma eğilimi gösterdiğini ortaya koymuştur. Kontrol grubu ile karşılaştırmalı olarak elde edilen veriler şu şekildedir: Kontrol betonunun 28 günlük basınç dayanımı 44.8 MPa iken;

- %0.5 PET katkısı ile bu değer %3.6 azalarak 43.2 MPa'ya,
- %1.0 PET katkısı ile %7.4 azalarak 41.5 MPa'ya,
- %1.5 PET katkısı ile ise %13.3 azalarak 38.8 MPa'ya düşmüştür.

Benzer şekilde;

- %0.5 PP katkısında %1.5'lik azalma ile 44.1 MPa,
- %1.0 PP katkısında %5.6'lık azalma ile 42.3 MPa,
- %1.5 PP katkısında %10.9'luk azalma ile 39.9 MPa,
- %0.5 PE katkısında %2.9'luk azalma ile 43.5 MPa,
- %1.0 PE katkısında %9.1'lik azalma ile 40.7 MPa,
- %1.5 PE katkısında ise %14.7'lik azalma ile 38.2 MPa değeri elde edilmiştir.

Veriler, katkı miktarının artışıyla birlikte dayanım değerlerinde %1,5 ile %14,7 aralığında bir düşüş meydana geldiğini göstermektedir. Özellikle %1.5 oranında katkı içeren tüm numunelerde bu dayanım kaybı belirgindir. Öte yandan, %0.5 katkı oranında ki tüm katkı türlerinde dayanım değerleri kontrol betonuna oldukça yakın olup, basınç dayanımında ki düşüş oranı %4 seviyesindedir.



Şekil 9. Katkı türü ve oranına göre basınç dayanımı değerleri (MPa)

Şekil 9’da, farklı plastik katkı türlerinin (PET, PP, PE) ve katkı oranlarının (%0.5, %1.0, %1.5) 28 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkileri grafiksel olarak sunulmuştur. Sonuç olarak, plastik atık katkılı betonların basınç dayanımı üzerinde katkı türü ve oranına bağlı olarak düşüşler gözlemlenmiştir. Bu durum literatürle paralellik göstermektedir. Örneğin, Albano ve arkadaşları (2009), Choi & Yoo (2002) ve Siddique (2008) tarafından yürütülen çalışmalarda da benzer şekilde, %10–20’ye kadar PET katkılarında basınç dayanımında %5 - 30 arasında azalmalar rapor edilmiştir. Bu çalışmada %1.5 PET katkısıyla %13.3 oranında azalma gözlemlenmiş olup, bu oran literatürde bildirilen değerlerle örtüşmektedir. PP ve PE katkılarında da benzer şekilde katkı miktarı arttıkça basınç dayanımında düşüşler meydana gelmiş ve bu eğilim Ismail & Al-Hashmi (2008), Frigione (2010) ve Saikia & de Brito (2012) gibi araştırmacıların bulgularını desteklemiştir. Özellikle tüm katkı türlerinde düşük katkı oranlarında (%0.5) elde edilen sınırlı dayanım kayıpları (%3 - 4), bu katkıların kontrollü kullanımında betonun mekanik bütünlüğünü büyük ölçüde koruyabileceğini göstermektedir.

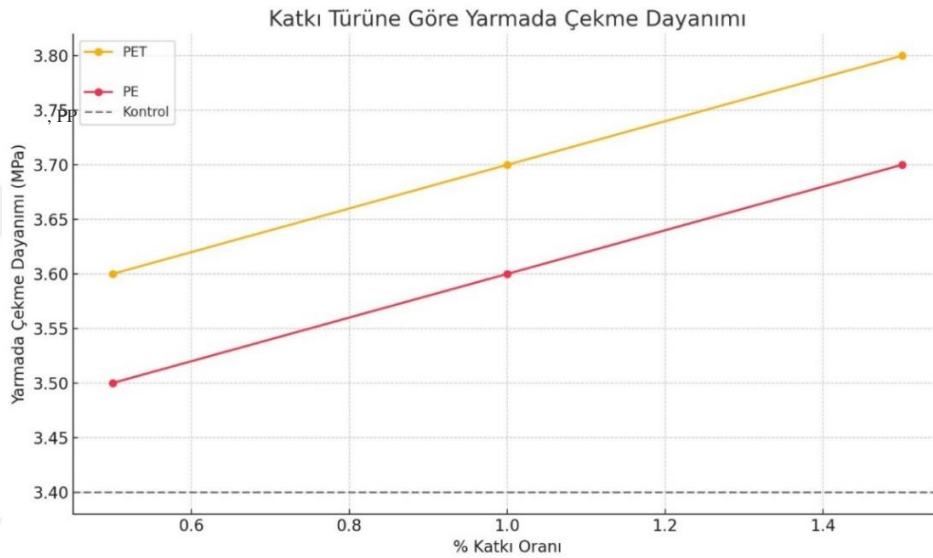
5.1.2 Yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımı sonuçları üzerine tartışma

Yarmada çekme dayanımı

Plastik atık katkılı betonların yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkisi, betonun süneklik, durabilite ve çatlak kontrol performansı açısından oldukça önemli bir parametredir. Karışıma 3

farklı plastik katkı malzemesi (PET, PP, PE) 0.5, %1,0 ve %1.5 oranlarında dahil edilerek çekme dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kontrol numunesinin 28 günlük ortalama yarmada çekme dayanımı 3.4 MPa olarak ölçülmüştür.

Elde edilen sonuçlara göre, katkı oranı arttıkça yarmada çekme dayanımında genel olarak doğrusal bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. Özellikle %1.5 PET katkısı ile elde edilen 3.8 MPa'lık değer, tüm örnekler arasında en yüksek yarmada çekme dayanımı olarak öne çıkmıştır. PET katkısı, %1.0 ve %1.5 oranlarında kullanıldığında, kontrol numunesine kıyasla sırasıyla yaklaşık %8.8 ve %11.7 oranlarında artış sağlamıştır.



Şekil 10. Katkı türü ve oranına bağlı olarak yarmada çekme dayanımı değerleri (MPa)

Şekil 10'da katkı türü ve oranlarına göre yarmada çekme dayanımı değişimi grafiksel olarak sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, PP ve PE katkılarının %1.0 ve %1.5 oranlarında benzer performans sergilediği görülmektedir. Her iki katkı türü de en yüksek performansını %1.5 katkı oranında göstermiş olup, bu oranda kontrol numunesine kıyasla yaklaşık %8.8 oranında bir artış sağlamışlardır. Ancak bu katkılarla elde edilen dayanım değerleri, PET katkısının gerisinde kalmıştır.

Sonuç olarak, plastik atık katkılarının yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkisi olumlu yönde olmuş ve katkı oranı arttıkça dayanım değerlerinde belirgin artışlar kaydedilmiştir. Özellikle %1.5 PET katkısıyla %11.7'lik bir artış elde edilmesi, Reis (2006) çalışmalarında bildirilen lif benzeri plastik katkıların çatlak kontrolü ve sünekliliğe katkı sağladığı yönündeki bulgularla uyumludur.

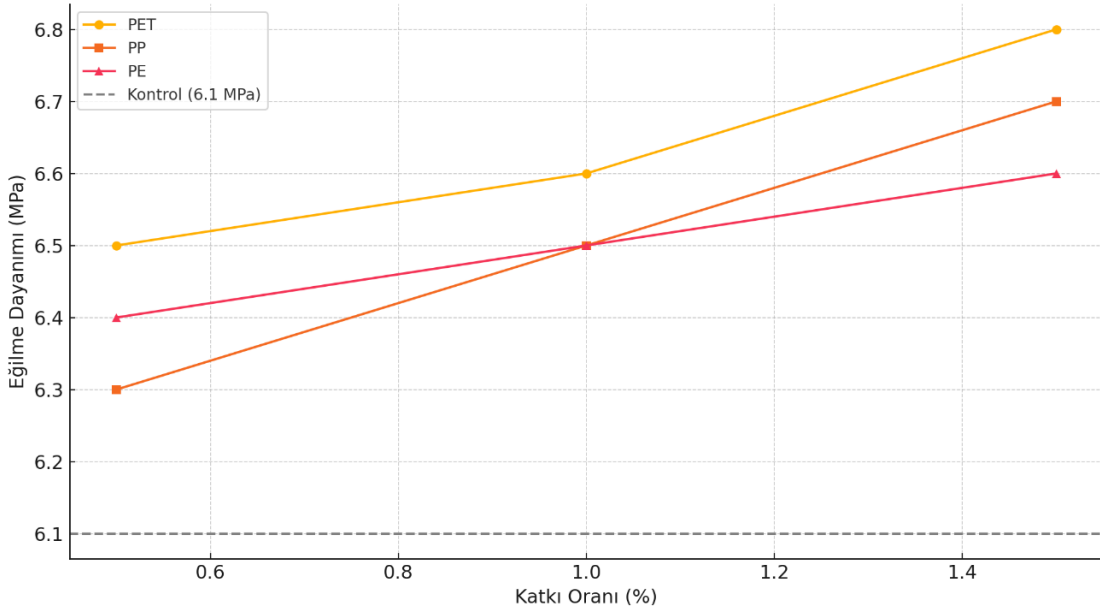


Şekil 11. Yarmada çekme dayanımı test cihazı ve deney numunesi

Şekil 11’ de 150 x 300mm boyutundaki silindirik beton numunesinin kırılma öncesi ve kırılma sonrası durumu görülmektedir. Numune, cihaz içerisinde uygulanan yük etkisiyle aksel doğrultuda iki parçaya ayrılmıştır. Bu kırılma literatürde belirtilen tipik yarmada çekme davranışı ile uyumludur.

Eğilmede çekme dayanımı

Betonun eğilmede çekme dayanımı, özellikle çatlak oluşumu ve dayanıklılık değerleri açısından önemli bir parametre kabul edildiğinden, plastik atık katkılarının bu özelliğe etkisi incelenmiştir. Kontrol numunesinin 28 günlük ortalama eğilmede çekme dayanımı 6.1 MPa olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, her üç plastik katkı türü de eğilmede çekme dayanımı üzerinde pozitif bir etki sağlamıştır.



Şekil 12. Katkı türü ve oranına göre 28 günlük eğilmede çekme dayanımı değerleri (MPa)

Şekil 12’te farklı plastik katkı türleri ve katkı oranlarının eğilmede çekme dayanımı üzerindeki etkileri görülmektedir. Grafiğe göre en yüksek eğilme dayanımı, %1.5 PET katkısından elde edilmiştir. Bu, katkı türleri arasında PET’in en etkili katkı olduğunu göstermektedir.



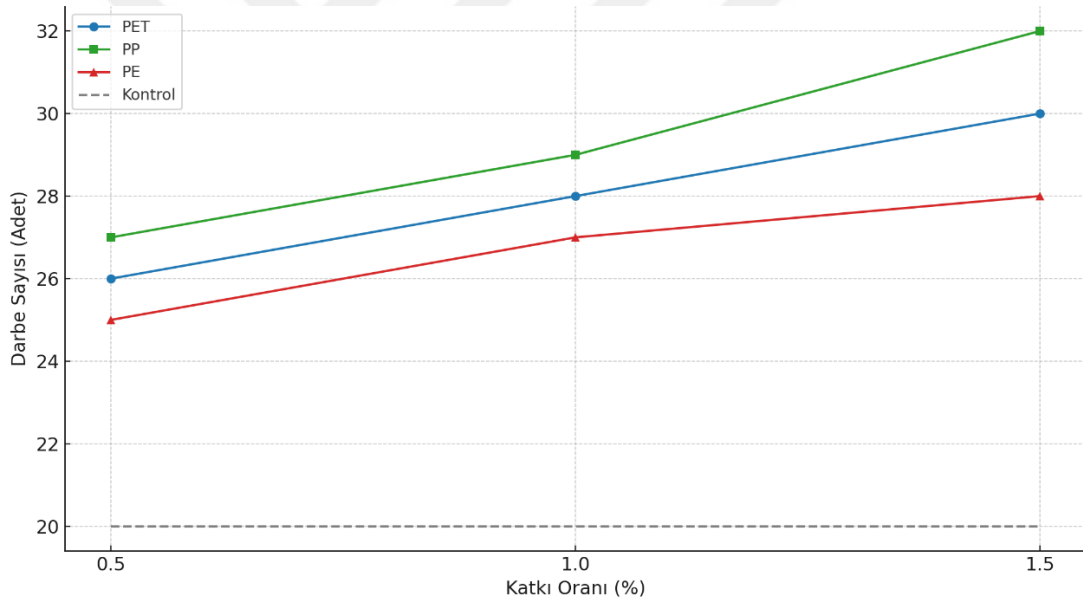
Şekil 13. Eğilmede çekme dayanım deneyi

Şekil 13’te eğilmede çekme dayanımı deneyi sırasında beton numunesinde oluşan kırılma anı görülmekte olup, üç noktalı yükleme sistemiyle uygulanan yük etkisi net biçimde ortaya konmaktadır. Sonuç olarak, Elde edilen eğilmede çekme dayanımı sonuçları literatür verileriyle önemli ölçüde örtüşmektedir. %1.5 PET katkısında sağlanan en yüksek eğilmede çekme dayanımı (%12 artış), Yılmaz (2021) ve Kumar ve arkadaşları (2023) tarafından bildirilen %10- 12 aralığındaki artışlarla paralellik göstermektedir. PP katkısı da literatürde (Alhozaimy ve arkadaşları 2012; Siddique, 2008) vurgulanan eğilme dayanımı artırıcı etkisini bu çalışmada da göstermiştir. PE katkısının da tüm oranlarda olumlu katkı sunduğu görülmüş,

bu durum Ismail & Al-Hashmi (2008) ve Reddy & Kumar (2020) çalışmalarını desteklemiştir. Genel olarak, tüm katkı türlerinin lif benzeri yapısıyla çatlak oluşumunu geciktirdiği ve betonun eğilme kapasitesini artırdığı literatür ile uyuşmaktadır.

5.1.3 Darbe dayanımı sonuçları üzerine tartışma

Bu çalışmada, farklı plastik katkı türleri (PET, PP, PE) ve katkı oranlarının (%0.5, %1.0, %1.5) betonun darbe dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen deney verileri tablo ve grafiklerle desteklenmiş, sonuçların daha net anlaşılması sağlanmıştır. Darbe dayanımı deneyleri sonucunda, plastik atık katkısı kullanılan beton numunelerinde hem ilk çatlak oluşumu hem de nihai kırılma aşamasında darbe sayılarında artış gözlemlenmiştir. Kontrol grubu numunelerinde ilk çatlak 16. darbeye, nihai kırılma ise 20. darbeye meydana gelirken; katkı içeren numunelerde bu değerler katkı türü ve oranına bağlı olarak yükselmiştir.



Şekil 14. Katkı türü ve oranına göre darbe dayanımı değerleri

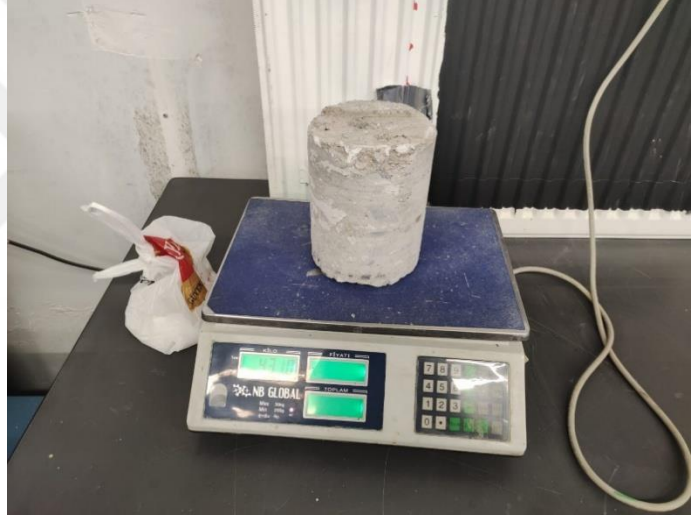
Şekil 14 incelendiğinde, özellikle PP ve PET katkılarının darbe dayanımı üzerinde olumlu etkiler sağladığı, PE katkısının ise daha düşük oranlarda bir iyileştirme sunduğu anlaşılmaktadır. Kontrol grubuna kıyasla, %1.5 oranında PP katkısı kullanılan betonlarda nihai kırılma darbe sayısında yaklaşık %55'e yakın bir artış elde edilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, plastik katkıların betonun yapısal bütünlüğünü iyileştirdiğini ve darbe enerjisini absorbe etme kapasitesini artırdığını göstererek literatürle örtüşmektedir.

Özellikle %1.5 PP katkısıyla yaklaşık %55 oranında artan darbe dayanımı, Alhozaimy (2012), Siddique (2008) gibi araştırmalarda bildirilen benzer performans artışlarını doğrulamaktadır. Literatürde bu katkıların lif benzeri yapılar oluşturarak çatlak ilerlemesini sınırladığı ve darbe dayanımını artırdığı vurgulanmakta olup, bu çalışmada elde edilen verilerle benzerlik göstermektedir.

5.1.4 Birim hacim ağırlık sonuçları üzerine tartışma

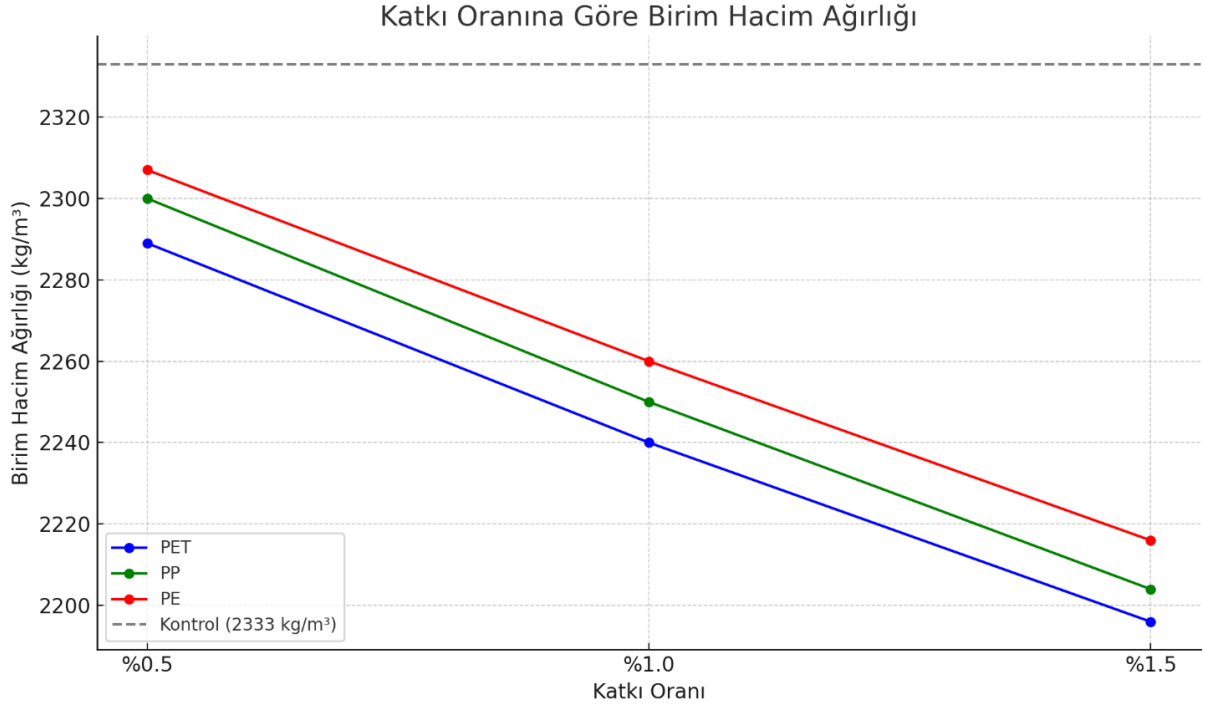
Betonun birim hacim ağırlığı, yapısal hesaplamalar açısından kritik bir parametre olup; taşıma kapasitesi, yerleştirme kolaylığı ve dayanıklılık gibi pek çok mühendislik özelliğiyle doğrudan ilişkilidir. Bu çalışmada, plastik atık katkılarının betonun birim hacim ağırlığı üzerindeki etkisi, katkı türü ve katkı oranı dikkate alınarak değerlendirilmiştir.



Şekil 15. Sertleşmiş beton numunesinin tartım işlemi

Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre, Kontrol numunesinin 28 günlük ortalama birim hacim ağırlığı 2302 kg/m^3 olarak ölçülürken;

- PET katkılı betonlarda, %0.5, %1.0 ve %1.5 katkı oranlarında sırasıyla birim hacim ağırlıklarında %1,89, %4 ve %5,87 düşüş elde edilmiştir.
- PP katkılı betonlarda, %0.5, %1.0 ve %1.5 oranlarında birim hacim ağırlıklarında sırasıyla %1,41, %3,56 ve %5,53 düşüş gözlemlenmiştir.
- PE katkılı betonlarda ise %0.5, %1.0 ve %1.5 katkı oranlarında birim hacim ağırlıklarında sırasıyla %1,11, %3,13 ve %5 düşüş yaşanmıştır.



Şekil 16. Katkı türü ve oranına göre ortalama birim hacim ağırlık değerleri (kg/m³)

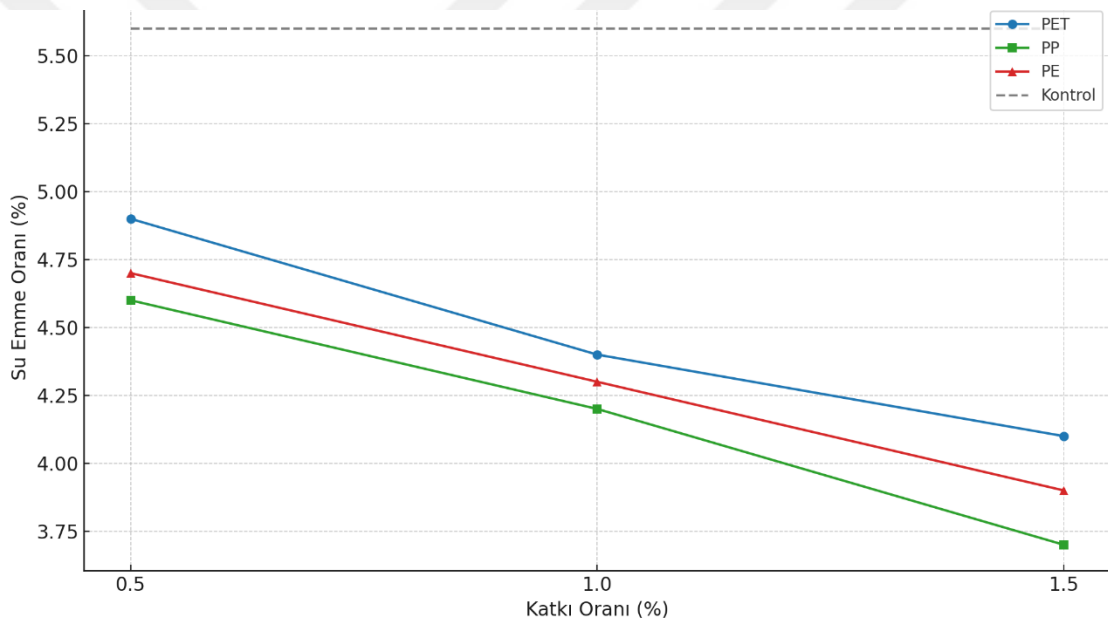
Şekil 16 grafiği incelendiğinde, katkı oranı arttıkça birim hacim ağırlığında kademeli bir azalma olduğu ve tüm katkı türlerinde bu azalmanın devam ettiği görülmektedir. Bu azalma, plastik atıkların özgül ağırlıklarının doğal agrega ve çimento hamuruna göre daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sonuçlar literatürle uyum göstermiştir. Örneğin, Ghernouti ve arkadaşları (2013) ve Frigione (2010) çalışmalarında %5 - 15 katkı oranlarında %1 - 7 aralığında birim hacim ağırlık azalması bildirilmiştir. Mevcut çalışmada da %1.5 katkı oranında en yüksek düşüş PET için %5.86 olarak tespit edilmiş, bu değerler literatürdeki çalışmalarla benzer oranlar göstermiştir. Bu tür hafifletilmiş betonlar, yapıların üzerine gelen ölü yükleri azaltmak için avantaj sağlayabilir. Bu veriler, hafif beton üretimi için plastik katkıların işlevsel olabileceğini göstermektedir. Ancak birim hacim ağırlık düşüşü dayanımı da etkileyebileceğinden, uygulama alanına göre katkı oranının dikkatle belirlenmesi gerekmektedir.

5.1.5 Su emme sonuçları üzerine tartışma

Çalışmada, plastik atık katkılarının betonun su emme davranışı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla yapılan deneylerin sonuçları aşağıda sunulmuştur. Elde edilen veriler, katkı türü ve katkı oranına bağlı olarak betonun su emme kapasitesinde meydana gelen değişimleri ortaya

koymaktadır. Plastik atık katkılarının bu değerler üzerindeki etkisi, hem deneysel sonuçlarla hem de literatür verileri ile doğrultusunda analiz edilmiştir.

Yapılan testlerde, katkısız beton numunesinin 28 günlük su emme oranı ortalama %5,6 olarak ölçülmüştür. %0.5 PET katkısıyla bu oran %4,9'a, %1.0 PE katkısıyla %4,3'e ve %1.5 PP katkısıyla ise %3,7 seviyesine kadar düşmüştür. Bu azalma, özellikle plastik katkıların beton içerisindeki boşluk yüzdesinde azalmaya yol açması ve lif formunun mikro çatlak yayılımını sınırlandırması ile doğrudan ilişkili olduğu söylenebilir. Bu sonuçlar, özellikle PP ve PET katkılarının betonun su emme kapasitesini azaltmada etkili olduğunu göstermektedir. Plastik katkıların çimento hamuru içinde mikro çatlakların yayılmasını sınırladığı ve boşluk hacmini azalttığı söylenebilir.



Şekil 17. Katkı türü ve oranına göre su emme oranları (%)

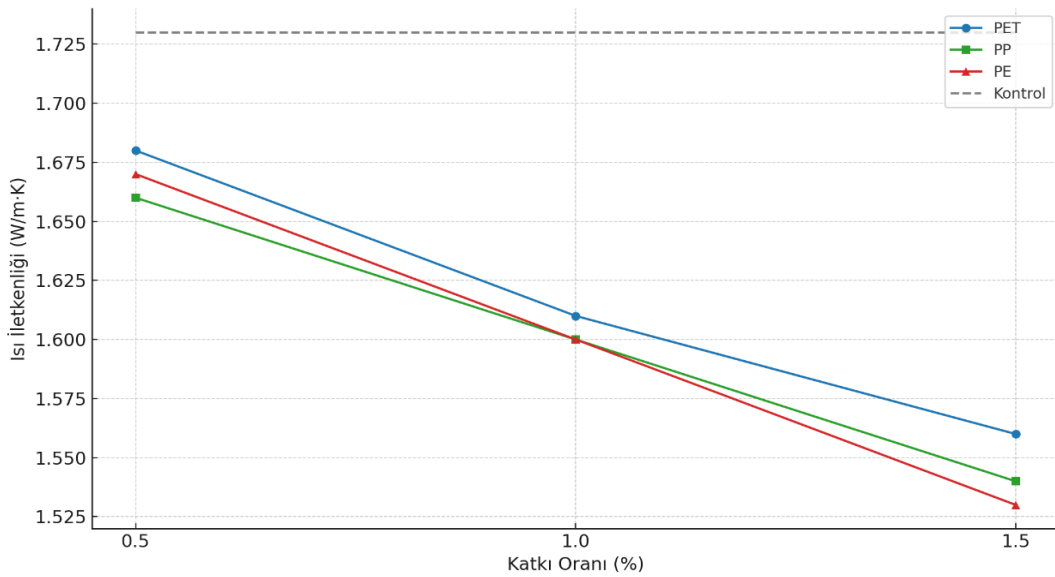
Şekil 17’de görüldüğü üzere, katkı türü ve oranına bağlı olarak su emme üzerinde anlamlı değişiklikler meydana gelmiştir. Betonun su emme oranları açısından elde edilen veriler, plastik katkıların özellikle PP ve PET türlerinde su geçirimsizliğini artırıcı etkiler sunduğunu göstermektedir. Literatürde Babafemi ve arkadaşları (2018) katkı türlerinin mikroçatlak yayılımını sınırladığı ve boşluk oranlarını azalttığı vurgulanmakta, bu da su emme oranındaki düşüşlerle açıklanmaktadır. Bu çalışmada %1.5 PP katkısı ile su emme oranı %3.7’ye kadar düşürülmüş, bu da katkısız betona göre %34’lük iyileşmeye işaret etmektedir. Bu değerler, literatürde bildirilen su emme oranları ile örtüşmektedir.

5.1.6. Isı iletkenliği sonuçları üzerine tartışma

Isı iletkenliği, betonun termal performansını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Yapı malzemelerinde düşük ısı iletkenlik değeri, enerji verimliliği yüksek yapıların inşasında büyük öneme sahip olduğu kabul edilmektedir. Plastik atık katkılarının bu değeri üzerindeki etkisi, özellikle ısı yalıtımı ihtiyacı olan yapılarda göz önüne alınması gereken önemli bir konudur. Araştırmamız sırasında yapılan ölçümler, katkısız beton numunesinin ortalama ısı iletkenlik değeri 1.73 W/m*K olarak belirlenmiştir. Bu değeri, katkı oranlarına bağlı olarak önemli ölçüde azaldığı görülmüştür:

- %0.5 PET katkıli betonda, kontrol numunesine kıyasla %2.9 oranında bir ısı iletkenliği düşüşü gözlemlenmiştir.
- %1.0 PE katkıli betonda, ısı iletkenliği değeri yaklaşık %7.5 oranında azalarak ısı geçirgenlikte belirgin bir düşüş ortaya koymuştur.
- %1.5 PP katkıli betonda ise, ısı iletkenliği değeri kontrol numunesine göre yaklaşık %11 oranında azalmış ve bu katkı düzeyinde en yüksek düşüş elde edilmiştir.

Plastik katkıların ısı iletkenlik değeri azaltma eğiliminde olduğu açıkça görülmektedir. Bu sonuç, plastiklerin düşük yoğunluk ve yüksek boşluk oranlarıyla açıklanabilmektedir. Özellikle %1.5 PE katkısının en düşük ısı iletkenlik değeri (1.53 W/m*K) ulaşması, bu tür katkıların ısı yalıtımı açısından daha avantajlı olduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 18. Katkı türü ve oranına göre ısı iletkenlik değeri (W/m*K)

Şekil 18’de, plastik atık katkı türlerine ve katkı oranlarına bağlı olarak betonun ısı iletkenlik değerlerinde meydana gelen değişimler görülmektedir. Grafik incelendiğinde, özellikle PE katkısının ısı iletkenliğini en fazla azaltan katkı türü olduğu, PP ve PET katkılarının ise belirli oranlarda iyileşme sağladığı söylenebilir. Bu durum, plastiklerin düşük yoğunluk ve yüksek gözeneklilik özellikleriyle açıklanabilmektedir. Özellikle PE katkısının, betonun termal performansını artırmada en etkili katkı türü olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, plastik atık katkılarının betonun termal performansını iyileştirdiğini göstermekte olup, bu durum literatürde bildirilen sonuçlarla paralel bir yapı sergilemektedir. Örneğin, Choi & Yoo (2002), Reddy & Kumar (2020) ve Asdollah-Tabar ve arkadaşları (2023) gibi araştırmalarda PET ve PE katkılarının ısı iletkenliğini %5–20 arasında düşürdüğü belirtilmiştir. Bu çalışmada %1.5 PP katkısı ile yaklaşık %11’lik bir azalma gözlemlenmiş olup, bu değer ısı yalıtımı ihtiyacına yönelik yapı malzemesi tasarımlarında katkıların olumlu katkı sunabileceğini göstermektedir.

5.2 Sonuç

Bu çalışmada, farklı türlerdeki (PET, PP ve PE) geri dönüştürülmüş plastik atıkların beton karışımlarına agrega yerine ağırlıkça belirli oranlarda (%0.5, %1.0 ve %1.5) ilave edilmesiyle betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinde meydana gelen değişimler deneysel yöntemlerle araştırılmıştır. Betonun sürdürülebilirliğini artırmak, çevresel etkilerini azaltmak ve plastik atıkları faydalı bir yapı malzemesine dönüştürmek amacıyla yürütülen bu çalışmada elde edilen sonuçlar, plastik atık katkılarının beton üzerinde hem olumlu hem de olumsuz bazı etkiler yarattığını göstermiştir.

Basınç dayanımı açısından değerlendirildiğinde, plastik atık katkılı beton numunelerinde katkı oranı arttıkça dayanımda düşüş eğilimi gözlenmiştir. Özellikle %1.5 oranındaki PET katkısı ile %13 oranında bir dayanım kaybı tespit edilmiştir. Bu durumun, plastik malzemelerin çimento hamuruna yeterli düzeyde bağlanamaması nedeniyle yapısal zayıflıklar oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Öte yandan, yarmada çekme ve eğilme dayanımı sonuçları plastik katkı türlerinin tamamında iyileşme göstermiştir. Özellikle %1.5 oranında PET katkısı kullanıldığında yarmada çekme dayanımında %12 oranında artış gözlemlenmiştir. Darbe dayanımı testlerinde ise PP katkısında dikkat çekici bir etki görülmüştür. %1.5 PP katkı oranında yaklaşık %55’lik bir artış meydana gelmiştir. Bu durum, PP’nin esnek ve sünek yapısının, enerji sönmüleme kapasitesini artırarak betonun darbe yüklerine karşı daha dayanıklı hale gelmesini sağlamasıyla açıklanabilir.

Fiziksel özellikler bakımından değerlendirildiğinde, plastik katkıları betonun birim hacim ağırlığını düşürmüş, bu azalma %1.5 PET katkısıyla %6 seviyelerinde gerçekleşmiştir. Bu da plastiklerin düşük yoğunlukları sayesinde betonu daha hafif hale getirdiğini göstermektedir. Isı iletkenliği deneylerinde ise %1.5 PE katkısı ile %11 oranında bir düşüş tespit edilmiş, bu da plastik katkıları betonun ısı yalıtım özelliklerine olumlu katkı sunduğunu ortaya koymaktadır. Su emme değerleri incelendiğinde ise katkılı numunelerde emme oranlarının kontrol numunelerine göre daha düşük olduğu belirlenmiş, bu durum plastiklerin beton içerisindeki boşluk oranını azaltarak geçirimsizliği artırdığı şeklinde yorumlanmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışmada plastik atık katkılı betonların hem teknik hem de çevresel açıdan önemli avantajlar sunduğu ortaya konmuştur. Mekanik özelliklerdeki bazı sınırlı olumsuzluklara rağmen, özellikle yarmada çekme, darbe dayanımı, ısı iletkenliği ve birim hacim ağırlık gibi özelliklerde iyileşme sağlaması; bu betonların belirli yapı uygulamalarında çevre dostu alternatif bir malzeme olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Ayrıca plastik atıkların geri dönüşüm yoluyla yapı sektörüne kazandırılması, hem atık yönetimine hem de sürdürülebilir yapı malzemelerinin gelişimine katkı sağlayacaktır.

5.3. Öneriler

- İnce agreganın tamamı yerine plastik atıkların kullanılmasıyla elde edilecek betonların mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine detaylı araştırmalar yapılmalıdır.
- Hafif agregaların belirli bir oranı yerine plastik atık kullanılarak üretilecek hafif betonların mekanik ve fiziksel özelliklerindeki değişimler araştırılmalıdır.
- Plastik atıkların toz haline getirilerek çimentonun bir kısmı yerine kullanılmasıyla elde edilecek betonların fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmalıdır.
- Beton karışımlarında çimento miktarının azaltılması mümkün olup olmadığı plastik atık katkıları ile birlikte değerlendirilmelidir.
- Farklı türlerdeki plastik atıkların (PET, PP, PE vb.) aynı beton karışımında birlikte kullanılması durumunda betonun mekanik ve fiziksel özelliklerine etkileri araştırılmalıdır.
- Plastik atıkların agrega ya da çimento yerine farklı oranlarda kullanıldığı betonların uzun vadeli dayanım, dayanıklılık ve çevresel etkilere karşı davranışları araştırılmalıdır.
- Plastik atık katkılı betonların işlenebilirlik, priz süresi ve hidrasyon ısı gibi taze beton özellikleri üzerinde oluşturduğu etkiler araştırılmalıdır.

- Plastik atık kullanılarak üretilen betonların kimyasal etkilere karşı direnci araştırılmalıdır.
- Plastik atık katkılarının farklı kür sürelerindeki beton dayanımı ve dayanıklılığı üzerindeki etkileri araştırılmalıdır.
- Geri dönüştürülmüş plastik atıkların kullanımıyla üretilen betonların karbon ayak izi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi yapılmalıdır.
- Plastik atıkların farklı işleme yöntemleri (örneğin granül, lif, toz) ile beton içindeki davranışları karşılaştırılmalıdır.
- Plastik atık katkılı betonların yangın dayanımı ve yüksek sıcaklıklara karşı performansı araştırılmalıdır.
- Farklı iklim koşullarında plastik atık katkılı betonların uzun dönem performanslarının saha deneyleriyle desteklenmesi önerilmektedir.

Bu çalışmadan elde edilen bulgular doğrultusunda, plastik atıkların beton üretiminde alternatif malzeme olarak kullanım potansiyelinin daha kapsamlı biçimde araştırılması önerilmektedir. Farklı plastik türlerinin çeşitli formlarda ve oranlarda agrega ya da bağlayıcı malzeme yerine kullanılmasıyla betonun kısa ve uzun vadeli performansı detaylı olarak incelenmelidir. Ayrıca bu tür uygulamaların çevresel, ekonomik ve yapısal açıdan sürdürülebilirliği üzerine yapılacak çalışmaların artırılması, hem atık yönetimi hem de inşaat sektörü açısından önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Aghaee, M., vd. (2013). Mechanical Properties of Lightweight Concrete Partition with a Core of Textile Waste. *Advances in Civil Engineering*, Article ID 482310.
- Al-Tulaian, B. S., Al-Shannag, M. J., & Al-Hozaimy, A. M. (2018). Recycled plastic fibers for minimizing plastic shrinkage cracking of cement-based mortar. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 12(7), 1–5. <https://publications.waset.org/9997009/recycled-plastic-fibers-for-minimizing-plastic-shrinkage-cracking-of-cement-based-mortar>
- Ahmed, K. A., & Abdulqudos, A. N. (2024). Recycling Plastic Waste into Eco Friendly Concrete: A State of the Art Review. *Journal of Civil Engineering Frontiers*, 5(2), 63–78.
- Alhozaimy, A., Fares, G., & Al-Negheimish, A. (2012). Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 27(1), 403–408.
- Albano, C., Camacho, N., Hernandez, M., Matheus, A., & Gutierrez, 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>
- Ali, A. H., Johari, M. A. M., & Noaman, A. T. (2024). *Enhancing mechanical properties of 3D printed cementitious composites utilizing hybrid recycled PP and PET fibers*. *Construction and Building Materials*, 455, Article 139179. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139179>
- Alotaibi, S., Martinez-Vazquez, P. & Baniotopoulos, C. (2023). *Circular Economy and Waste Minimisation in Construction*. Lecture Notes in Civil Engineering.
- Alyousef, R. (2021). Review on the Durability of Polypropylene Fibre Reinforced Concrete. *Journal of Cleaner Production*
- Ajagbe, W., Tijani, M., & Odukoya, O. (2023). Modeling the tensile strength of concrete with polyethylene terephthalate (PET) waste as replacement for fine aggregate using artificial neural network. *Journal of Engineering Studies and Research*, 28(4), 25–33.
- Ambalaj Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği (26 Haziran 2021 tarihinde yayımlanan, Resmî Gazete sayısı 31523), Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Türkiye. <https://cygm.csb.gov.tr/ambalaj-atiklarinin-kontrolu-yonetmeliği-yayimlandi-duyuru-419106>
- ASTM International. (2013). *Modernizing the Resin Identification Code* (ASTM News & Reports). <https://www.astm.org/news/modernizing-resin-identification-code-ja13>

- ASTM International. (2014). *ASTM C469/C469M–14: Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression*. West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2015). *ASTM C1116/C1116M–10a: Standard specification for fiber reinforced concrete*. West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2017). *ASTM C518–17: Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus*. West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2018). *ASTM C33/C33M–18: Standard specification for concrete aggregates*. West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2021). *ASTM C39/C39M-21: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-21
- ASTM International. (2021). *ASTM C642-21: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0642-21>
- ASTM International. (2017). *ASTM C496/C496M-17: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0496_C0496M-17
- ASTM International. (2022). *ASTM C150/C150M-22: Standard specification for Portland cement [Standard]*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-22
- ASTM International. (2022). *ASTM C78/C78M-22: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0078_C0078M-22
- Asdollah-Tabar, M., Basiri, M., Dalvand, A., & Ashrafian, A. (2023). Mechanical and thermal effects of using fine recycled PET aggregates in common screeds. *Sustainability*, *15*(24), 16692. <https://doi.org/10.3390/su152416692>
- Aydın, G. (2021). Farklı orana sahip PET atıklarının çimento harçlarının mekanik ve dayanıklılık özelliklerine etkisi. *EJOSAT (Eurasian Journal of Science and Technology)*, *17*(2), 1126–1133. <https://doi.org/10.17776/ejosat.1004191>
- Babafemi, A. J., Šavija, B., Paul, S. C., & Anggraini, V. (2018). Engineering properties of concrete with waste recycled plastic: A review. *Sustainability*, *10*(11), 3875. <https://doi.org/10.3390/su10113875>
- Babafemi, A. J., Sirba, N., Paul, S. C., & Miah, M. J. (2022). Mechanical and durability assessment of recycled waste plastic (Resin8 & PET) eco-aggregate concrete. *Sustainability*, *14*(9), 5725. <https://doi.org/10.3390/su14095725>

- Banthia, N., & Gupta, R. (2006). Post cracking behavior and toughness of polypropylene fibre reinforced concrete.
- Berardi, U. (2013). Clarifying the new interpretations of the concept of sustainable building. *Sustainable Cities and Society*, 8, 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.01.008>
- California Department of Transportation (CalTrans). (2018). *Recycled plastic pavement pilot project report*. Sacramento, CA.
- CEN. (2021). EN 206: Concrete – Specification, performance, production and conformity. European Committee for Standardization.
- Chen, B., & Liu, Y. (2008). Thermal Performance of Structural Lightweight Concrete Composites for Potential Energy Saving. *Crystals*, 11(5), 461.
- Choi, Y. W., & Yoo, J. H. (2002). An experimental research on the substitution of recycled PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Management & Research*, 20(1), 79–84. <https://doi.org/10.1177/0734242X0202000109>
- Civil Tutorials. (2023). What is lightweight concrete? Benefits, types, and applications.
- Cwirzen, A., Penttala, V., & Vornanen, C. (2019). Green concrete: By products utilization and advanced approaches. *Sustainability*, 11(19), 5145. <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/19/5145>
- Çağrıci, A. (2016). İnşaat ve yıkıntı atıklarından elde edilen geri dönüşüm malzemelerinin karayolu üstyapısında kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi
- Çakılcıoğlu, A. N., Üstün, İ., Şafak, A., & Polat, H. (2023). Atık tuğla tozunun polimer betonda katkı malzemesi olarak kullanımı: Mekanik özelliklerin incelenmesi. *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(2), 76-86. <https://doi.org/10.53501/rteufemud.1306484>
- Çevik, A., & Albayrak, A. (2019). Assessment of mechanical and thermal properties of recycled PET fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 203, 35–45.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2019). *Sıfır Atık Yönetmeliği*. Resmî Gazete (No: 30829). <https://sifiratik.gov.tr>
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı – Yüksek Fen Kurulu. (17 Ocak 2025). *2025 Yılı Birim Fiyat Tarifeleri*. Erişim adresi: <https://webdosya.csb.gov.tr/db/yfk/icerikler/2025-yili-b-r-m-f-yatlari-20250117121853.pdf>
- Ceysan Geri Kazanım. (2025, Temmuz 8). Güncel hurda fiyatları. <https://ceysangerikazanim.com/guncel-hurda-fiyatları>

- CimentoKlinker. (2023). *Çimento üretiminde karbon salımı ve çevresel etkiler*. Erişim adresi: <https://cimentoklinker.com/icerik/cimento-uretiminde-karbon-salimi-ve-cevresel-etkiler>
- ÇimsaBlog (2022). *Etrenjit Nedir? Neden Oluşur? Nasıl Önlenir?* Çimsa Formülhane. <https://cimsa.com.tr/formulhane/gri-cimento/etrenjit-nedir-neden-olusur-nasil-onlenir/>
- CORDIS(2024). *Plastics2Olefins Project details* <https://cordis.europa.eu/project/id/101058032>
- Corker, J. (2020). *Insulating a green future with aerogel eco-panels*. GELCLAD Project (EU Horizon 2020): Developed modular cladding panels with aerogel and recycled polymer foams to improve energy efficiency in building envelopes.
- Dang, J., & Gao, X. (2020). Experimental Study on Impact Behavior of Concrete Panel with and without Polypropylene Macrofibers. *Buildings*, 13(2), 303
- Doğan, C., & Demir, İ. (2021). Polymer Fibers and Effects on the Properties of Concrete. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(2), 438–451.
- Doğan, M., & Demir, İ. (2021). Investigation of the effects of polymer fiber on the mechanical properties of concrete. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(3), 678–685. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ijerd/issue/65876/975432>
- European Commission(2023). *Horizon 2020 projects overview*. <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en>
- European Environment Agency & Eurostat. (2021). *Per capita plastic packaging waste in the EU: 35.9 kg; total packaging waste: 188.7 kg per person; 19 % plastic*. EEA Report No. 18/2020.
- Duraiswamy, S., Neelamegam, P., VishnuPriyan, M., Alaneme, G. U., & ark. (2024). Impact of plastic waste fiber and treated construction demolition waste on the durability and sustainability of concrete. *Scientific Reports*, 14, 27221.
- ESCSI. (2025). Construction efficiency – Lowering environmental impact.
- ERMCO. (2012). Guidelines for Fibre Concrete – Design, production and conformity. European Ready Mixed Concrete Organization.
- European Commission. (2018). Guidance on requirements for substances in articles under REACH and on waste classification. Directorate-General for Environment.
- European Commission, Joint Research Centre. (2021). Environmental effects of plastic waste recycling – Focus on Climate Change effects (EUR 30682 EN). Publications Office of the European Union.
- European Commission(2023). *Horizon 2020 projects overview*. <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en>

- European Environment Agency & Eurostat. (2021). Per capita plastic packaging waste in the EU: 35.9 kg; total packaging waste: 188.7 kg per person; 19 % plastic. EEA Report No. 18/2020.
- European Parliament & Council. (2011). Regulation (EU) No 305/2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products. Official Journal of the European Union.
- EOTA. (2024). EAD 190021-00-0502: Polymer-based construction products – Fire and emission criteria. European Organisation for Technical Assessment.
- Fatih Belediyesi. (2023). *1. Sınıf Atık Getirme Merkezi*. Erişim adresi: <https://www.fatih.bel.tr/tr/main/pages/1-sinif-atik-getirme-merkezi/741>
- Federal Highway Administration. (2024). *Set-modifying admixtures – accelerators*. Retrieved from <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/trailer/resources/hif24032.pdf>
- Federal Highway Administration. (2025). *Fly ash for concrete: Chapter 3 – Fresh concrete properties*. U.S. Department of Transportation. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/cfa53.cfm>
- 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.2010.01.001>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Ghernouti, Y., Rabehi, B., Safi, B., & Chaid, R. (2013). On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*, 47, 1302–1308.
- Global Cement and Concrete Association. (2021). *Cement production accounts for around 7% of global CO₂ emissions*. <https://gccassociation.org>
- González, J. A., Méndez-Sánchez, A., & López-González, C. (2023). Mechanical and electrochemical performance of structural concrete incorporating recycled polyethylene terephthalate as a partial fine aggregate replacement. *Recycling*, 9(3), 51. <https://doi.org/10.3390/recycling9030051>
- Hannawi, K., & Agbodjan, W. P. (2015). Use of waste plastic in cement-based materials. *Journal of Building Engineering*, 3, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.06.002>

- Hindustan Times. (2020, 10 Temmuz). 1 lakh km of road built using plastic waste, govt aims to double it. Hindustan Times. <https://www.hindustantimes.com/india-news/1-lakh-km-of-road-built-using-plastic-waste-govt-aims-to-double-it/story-iwmkiKjIG86BYIDlg2aLtM.html>
- History of Concrete: Timeline & Insights. (2022). *The Concrete Protector*. Erişim adresi: <https://theconcreteprotector.com/history-of-concrete/>
- IBM Corporation. (2019). *IBM SPSS Statistics for Windows* (Version 26.0). Armonk, NY: IBM Corporation.
- INFOLDIA. (2023, 24 Kasım). *Sıfır Atık Projesi Kapsamında İnşaat Sektöründe Yapılabilecekler*. <https://www.infoldia.com/blog-detay-187877-Sifir-Atik-Projesi-Kapsaminda-Insaat-Sektorunde-Yapilabilecekler.html>
- Ismail, Z. Z., & Al-Hashmi, E. A. (2008). Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Management*, 28(11), 2041–2047.
- Ithy. (2025). Cost analysis and economic feasibility of lightweight concrete. Ithy.
- Iucolano, F., Liguori, B., Caputo, D., Colangelo, F., & Cioffi, R. (2013). Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties. *Materials & Design*, 52, 916–922. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.025>
- Jacob-Vaillancourt, C., & Sorelli, L. (2018). Characterization of concrete composites with recycled plastic aggregates from postconsumer material streams. *Construction and Building Materials*, 182, 561–572. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.083>
- Karademir, C. (2017). *Polietilen Plastik Atıkların Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi* [Conference Paper]. İstanbul Teknik Üniversitesi. Teorik ve Uygulamalı Mekanik Türk Milli Komitesi
- Karakurt, C., & Canbaz, M. (2014). Mechanical properties of self-compacting concrete incorporated with industrial wastes. *Construction and Building Materials*, 50, 435–442.
- Karakurt, C., & Canbaz, M. (2014). Recycled glass and plastic aggregates in lightweight concrete. *Journal of Cleaner Production*, 34, 30–35.
- Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı. (2004). *Beton Yollar Deneme Uygulamaları* [Proje]. KGM Özkaynakları ile yürütülen projeler kapsamında.
- KASKİ. (2025). *Güncel içme suyu analiz sonuçları*. <https://www.kaski.gov.tr/guncel-icme-suyu-analiz-sonuclari>

- Kavitha, V., Venkatesan, T., Avudaiappan, S., & Flores, D. (2020). The effect of polypropylene, steel, and macro synthetic fibers on mechanical behavior of cementitious composites. *Journal of Construction and Building Materials*, S0718 915X2021000300591
- Khan, M. I., Ahmad, I., Shah, N., & Ali, M. (2024). Characterization of heat-processed artificial lightweight aggregates from polyethylene terephthalate plastic waste. *Discover Civil Engineering*, 2(1), 46. <https://doi.org/10.1007/s44298-023-00046-z>
- Kimteks. (2021). *Priz Geciktirici Nedir? Özellikleri Nelerdir?* <https://www.kimteks.org/priz-geciktirici-nedir-ozellikleri-nelerdir>
- Kılıç, M., & Yüce, A. E. (2014). Plastiklerin sınıflandırılması ve geri dönüşüm yöntemleri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(2), 79-93. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/211224>
- Koçak, Ö., & Altun, F. (2021). Lif Katkısının Beton Darbe Dayanımına Etkisi. *European Journal of Science and Technology*, 11, 454 468.
- Korkmaz, A. V. (2017). Karakaya (Yıldızeli) Andezitik Tüflerinin Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Mühendislik ve Yer Bilimleri Dergisi*, 3(1), 1-10.
- Kos, Ž., Kroviakov, S., Kryzhanovskyi, V., & Hedulian, D. (2022). *Strength, frost resistance, and resistance to acid attacks on fiber-reinforced concrete for industrial floors and road pavements with steel and polypropylene fibers*. *Materials*, 15(23), 8339. <https://doi.org/10.3390/ma15238339>
- Kumar, A., Soni, V., Kumar, V., & Gupta, R. (2023). Polyethylene terephthalate aggregates in structural lightweight concrete: A meta-analysis and review. *Discover Materials*, 3(1), 60. <https://doi.org/10.1007/s43939-023-00060-8>
- KÜB (2025). *Beton ve Yangın*. Türkiye Hazır Beton Birliği - Kalite Ürün Belgelendirme ve Geliştirme Merkezi. <https://kub.org.tr/beton-ve-yangin>
- Lee, S.-J., Shin, H., Lee, H.-N., Park, S.-H., Kim, H.-M., & Park, C.-G. (2024). *Effect of Waste PET Fiber on the Mechanical Properties and Chloride Ion Penetration of Emergency Repair Concrete for Road Pavement*. *Materials*, 17(21), 5352. <https://doi.org/10.3390/ma17215352>
- LEED Japan. (2025). How does the use of recycled materials increase LEED points? <https://leedjapan.com/how-does-the-use-of-recycled-materials-increase-leed-points>

- Li, X., Zhang, Y., Chen, L., & Wang, H. (2025). *Mechanical, Environmental, and Cost Evaluation of Concrete Using Recycled Polypropylene*. *Materials Today Communications*.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.107891>
- Łukowski, P., & Dębska, D. (2019, December 22). *Effect of Polymer Addition on Performance of Portland Cement Mortar Exposed to Sulphate Attack*. *Materials*, 13(1), Article 71.
<https://doi.org/10.3390/ma13010071>
- Maghali, E., de Filippo, S., & Kaushal, S. (2022). *The impact of differently prepared mixed plastic waste granules on the properties of cementitious materials*. *Sustainability*, 17(3), 1052. <https://doi.org/10.3390/su17031052>
- Marzouk, O. Y., Dheilly, R. M., & Queneudec, M. (2007). Recycled plastic waste as fine aggregate for structural concrete. *Construction and Building Materials*, 21(1), 25–33.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.030>
- Mermerdaş, K., Nassani, D. E., & Sakin, M. (2017). Fresh, mechanical and absorption characteristics of self-consolidating concretes including low volume waste PET granules. *Civil Engineering Journal*, 3(5), 470–479. <https://doi.org/10.28991/cej-030916>
- Microsoft Corporation. (2019). *Microsoft Excel (Version 2019)*. Redmond, WA: Microsoft Corporation.
- Minde, P., Kulkarni, M., & Patil, J. (2024). *Comprehensive review on the use of plastic waste in sustainable concrete construction*. *Discover Materials*, 4, 58.
<https://doi.org/10.1007/s43939-024-00126-1>
- MMT Acoustix. (2025). *PET Acoustic Panel in Germany | Non-Woven Felt Acoustic Panel in Germany*. Erişim adresi: <https://mmtacoustixonline.com/pages/pet-non-woven-felt-acoustic-panels-in-germany>
- Mohajerani, A., Nwaogu, U. G., Moghimi, M., & Yin, R. (2024). Comprehensive review on the use of plastic waste in sustainable concrete construction. *Discover Materials*, 4, 58
- Nochaiya, T., Jeenram, T., Disuea, P., & Torkittikul, P. (2017). Microstructure, compressive strength, and permeability of Portland-condensed silica fume cement. *Monatsh Chem*, 148, 1363–1370. <https://doi.org/10.1007/s00706-017-1976-y>
- Özdemir, A., Yılmaz, K., & Şahin, M. (2023). Mechanical and durability properties of concrete made up of recycled-waste polyethylene (PE) and PET as aggregate replacement. **Construction and Building Materials**. <https://doi.org/...>
- Patel, M. (2020, November 3). *Superplasticizers: High-Range Water Reducers*. Gharpedia. <https://gharpedia.com/blog/superplasticizer-high-range-water-reducer/>

- Peker, M. A., Ataş, O., & Aksel, M. (2022). Plastik atıkların betonda değerlendirilmesindeki güncel durum. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 4(3), 159–178. <https://doi.org/10.46740/alku.1221977>
- PlasticRoad Consortium. (2018). *PlasticRoad project: World's first plastic bicycle path*. VolkerWessels, Wavin & Total. <https://www.plasticroad.eu>
- Pelisser, F.; Montedo, O. R. K.; Gleize, P. J. P.; Roman, H. R. (2012). *Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete*. *Materials Research: Ibero-american Journal of Materials*, 15(4), s. 682–689.
- PennDOT. (2021, October). *PennDOT pilot tests asphalt, recycled plastic paving mixture and other alternative roadway treatments*. Roads & Bridges. Retrieved from <https://www.roadsbridges.com>
- Plasticsoup Foundation.(2021). Plastic facts and figures. <https://www.plasticsoupfoundation.org/en/plastic-facts-and-figures>
- Plastics Europe. (2024). *The Circular Economy for Plastics – A European Analysis 2024*. Erişim adresi: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/the-circular-economy-for-plastics-a-european-analysis-2024/>
- Rai, B., Singh, B., & Khan, R. A. (2021). Mechanical Strength Characterization of Plastic Fiber Reinforced Sustainable Concrete Composites. *Applied Sciences*, 11(2), 852. <https://doi.org/10.3390/app11020852>
- Ramezaniyanpour, A. A., & Esmaeili, M. (2015). Flexural Performance of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Beams. *Construction and Building Materials*, 101, 519–529. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.146>
- Reddy, D. V., & Kumar, B. R. (2020). Mechanical performance of recycled plastic waste incorporated concrete. *Materials Today: Proceedings*, 33(1), 522–528. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.617>
- Reddy, D. V., & Kumar, H. M. (2020). Experimental study on lightweight concrete using waste plastic aggregates. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 9(2), 120–127.
- Reis, J. M. L. (2006). Fracture and flexural characterization of natural fiber-reinforced polymer concrete. *Construction and Building Materials*, 20(9), 673–678. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.005>
- Saikia, N., & de Brito, J. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, 34, 385–401. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066>

- Saini, R. K., & Kumar, P. (2025). Thermal conductivity of concrete containing aggregates of e-waste. *Journal of Green Building*, 20(2), 227–244. <https://doi.org/10.3992/jgb.20.2.227>.
- Shang, H.-S., & Yi, T.-H. (2013). *Freeze–Thaw Durability of Air-Entrained Concrete*. *The Scientific World Journal*, 2013, Article ID 650791. <https://doi.org/10.1155/2013/650791>
- Sharma, R., Gupta, R., & Sharma, M. (2022). Use of recycled PET in concrete: A review on mechanical and durability properties. *Scientific Reports*, 12(1), 12456. <https://www.nature.com/articles/s41598-022-12456>
- Sharma, D., Agrawal, Y., Gupta, T., & Sharma, R. (2021). A review of the hardened properties of eco-friendly concrete containing ground granulated blast-furnace slag. *Journal of Scientific Research and Reports*, 27(3), 37–49. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2021/v27i330368>
- Sıfır Atık. (2018, Eylül 10). *Hollanda Geri Dönüştürülmüş Plastik Kullanarak Halkevi Yaptı*. Erişim adresi: <https://sifiratik.co/2018/09/10/hollandada-geri-donusturulmus-plastikten-halkevi/>
- Sikora, P., Cendrowski, K., & Mijowska, E. (2022). Selected properties of self-compacting concrete with recycled PET aggregate. *Materials*, 15(7), 2566. <https://doi.org/10.3390/ma15072566>
- Siddique, R., & Naik, T. R. (2004). Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview. *Waste Management*, 24(6), 563-569.
- Siddique, R., Khatib, J., & Kaur, I. (2008). Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management*, 28(10), 1835–1852. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.011>
- Silva, D. A., Betioli, A. M., Gleize, P. J. P., Roman, H. R., Gomes, L. A., & Ribeiro, J. L. D. (2005). *Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials*. *Cement and Concrete Research*, 35(9), 1741–1746. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.040>
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2015). Atık Yönetimi Yönetmeliği. *Resmî Gazete*, 29314, 2 Nisan 2015. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/04/20150402-2.htm>
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2019). *Sıfır Atık Yönetmeliği*. *Resmî Gazete*, 30829, 12 Temmuz 2019. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/07/20190712-9.htm>
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2025). *Plastik atıklar*. Sıfır Atık Platformu. <https://sifiratik.gov.tr/plastik-atik>
- Toprak Ambalaj. (2022). *Enerji Üretiminde Geri Kazanımın Önemi*. Erişim adresi: <https://toprakambalaj.com/enerji-uretiminde-geri-kazanimin-onemi>

- TÜİK. (2022). *Türkiye İstatistik Kurumu Atık İstatistikleri*. <https://data.tuik.gov.tr/>
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2023). *Atık İstatistikleri, 2022* (Yayın No: 49570). <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2022-49570>
- Türk Standardları Enstitüsü. (2012). TS EN 197-1:2012, Çimento – Bölüm 1: Genel çimentolar – Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2012). TS EN 934-2+A1:2012, Beton, harç ve sıva katkı maddeleri – Bölüm 2: Beton katkı maddeleri – Tanımlar, gereklilikler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme. Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2019). TS EN 12390-3:2019, Sertleşmiş beton – Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2019). TS EN 12390-5:2019, Sertleşmiş beton – Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini. Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2010). TS EN 12390-6:2010, Sertleşmiş beton – Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini. Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2019). TS EN 12390-7:2019, Sertleşmiş beton – Deney numunelerinin yoğunluğunun tayini. Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2009). TS EN 12664:2009, Bina malzemeleri ve ürünlerinin ısı performansını – Korunmalı sıcak plaka ve ısı akış ölçer yöntemleriyle ısı direnç tayini – Orta ve düşük ısı dirençli kuru ve nemli ürünler. Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2010). TS EN 12350-6:2010, Beton – Taze beton deneyleri – Bölüm 6: Yoğunluk [Testing fresh concrete – Part 6: Density]. Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2002). TS EN 934-2:2002, Kimyasal katkıları – Beton, harç ve şerbet için – Bölüm 2: Beton katkıları – Tanımlar, gereklilik, uygunluk, işaretleme ve etiketleme. Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2003). TS 706 EN 12620:2003, Beton agregaları – Beton üretiminde kullanılacak doğal, yapay veya geri kazanılmış agregaların özellikleri. Türk Standardları Enstitüsü.
- Turkish Standards Institution (TSE). (2014). *TS EN 12390-13: Testing hardened concrete - Part 13: Determination of modulus of elasticity in compression*. Ankara, Turkey.
- Turkish Standards Institution (TSE). (2014). *TS EN 206: Concrete – Specification, performance, production and conformity*. Ankara, Turkey.
- Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK). (2020). *Türkiye’de Ar-Ge ve Geri Dönüşüm Stratejileri Raporu*. Ankara, Türkiye.

- Tošić, N., vd. (2022). *Incorporating polypropylene fibers improves freeze-thaw resistance in recycled concrete*. *Frontiers in Materials*, 149319 .
- Türk Standardı Enstitüsü. (2019). *TS EN 934-2: Kimyasal katkı maddeleri – Beton, harç ve şerbet için – Bölüm 2: Beton için katkı maddeleri – Tanımlar, şartlar, uygunluk, işaretleme ve etiketleme kuralları* (3. Baskı). Ankara: TSE Yayınları.
- Umasabor, R. I., & Daniel, S. C. (2020). The effect of using polyethylene terephthalate as an additive on the flexural and compressive strength of concrete. *Heliyon*, 6(8), e04700. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04700>
- UNESCO Ocean Literacy. (2022). Plastic pollution in the ocean: data, facts, consequences. <https://oceanliteracy.unesco.org/plastic-pollution-ocean/>
- United Nations. (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Retrieved from UN Regional Information Centre: <https://unric.org/en/united-nations-sustainable-development-goals/>
- United Nations Environment Programme. (2021). *Drowning in plastics – Marine litter and plastic waste vital graphics*. <https://www.unep.org/resources/report/drowning-plastics>
- University of Newcastle, Australia, & World Wildlife Fund (WWF). (2019, 12 Haziran). *Plastic ingestion by people could be equating to eating a credit card a week* [Basın bülteni]. University Newsroom
- U.S. Environmental Protection Agency. (2021). *Plastic waste: Environmental impacts*. <https://www.epa.gov/trash-free-waters/plastic-waste>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2021). *National overview: Facts and figures on materials, wastes and recycling*. <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials>
- U.S. Federal Highway Administration. (t.y.). *Chapter 3 – Fly Ash in Portland Cement Concrete*. In *Fly Ash Facts for Highway Engineers*. Retrieved from FHWA Pavement Materials website
- Van Rossum, G., & Drake, F. L. (2009). *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace Independent Publishing.
- Yazıcı, H., & Sarıdemir, M. (2021). Polietilen lif katkısının betonun darbe ve ısı performansı üzerindeki etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(2), 85–94. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/cumuhfd/issue/63918/927540>
- Yılmaz, B. (2021). PET lif katkısının betonun mekanik özelliklerine etkisi [Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi].

- Yılmaz, T., & Kaya, M. (2020). Geri dönüştürülmüş PET katkılı betonların mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(4), 743–752. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/aku-feb/issue/57914/803120>
- Yılmaz, M. (2021). Geri dönüştürülmüş plastik atık katkılı betonların mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine deneysel bir çalışma [Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi].
- Wang, X.-H., Fang, Z.-C., & Zheng, L. (2024). Effect of dose and types of the water reducing admixtures and superplasticizers on concrete strength and durability behaviour: A review. *Journal of Civil Engineering and Management*, 30(1), 33–48. <https://doi.org/10.3846/jcem.2024.20145>
- WasteTrade. (2025.). *Definition of Plastics*. Retrieved from <https://www.wastetrade.com/resources/plastics/introduction-to-plastics/definition-of-plastics/>
- Wu, J., Ye, X., & Cui, H. (2025). *Recycled materials in construction: Trends, status, and future of research*. *Sustainability*, 17(6), Article 2636. <https://doi.org/10.3390/su17062636>
- Wu, J., Ye, X., & Cui, H. (2025). *Recycled materials in construction: Trends, status, and future of research*. *Sustainability*, 17(6), Article 2636. <https://doi.org/10.3390/su17062636>
- Yin, X., vd. (2021). *Effect of Fibers on Durability of Concrete: A Practical Review*. *Materials*,
- Zhukov, A. D., & Ter-Zakaryan, K. A. (2022). *Polyethylene foam in seamless insulation systems*. *Polymer Science: Peer Review Journal*, 3(3), 58–61. <https://doi.org/10.31031/PSPRJ.2022.03.000565>