



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



PLASTİK ATIK VE POMZA AGREGA İKAME
İLE HAFİF BETONUN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN FARKLI SICAKLIK
KOŞULLARI SONRASI
DEĞERLENDİRİLMESİ

Osman Ahmed UMİYE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Nisan-2026
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Osman Ahmed UMIYE tarafından hazırlanan “Plastik Atık ve Pomza Agregası İle Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin Farklı Sıcaklık Koşulları Sonrası Değerlendirilmesi” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Sadık Alper YILDIZEL

.....

Danışman

Doç. Dr. Yasin Onuralp ÖZKILIÇ

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Nebi ÖZDÖNER

.....

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

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Necmettin Erbakan Üniversitesi tarafından 24YL19006 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Osman Ahmed UMIYE

08.05.2026

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PLASTİK ATIK VE POMZA AGREGA İKAME İLE HAFİF BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN FARKLI SICAKLIK KOŞULLARI SONRASI DEĞERLENDİRİLMESİ

Osman Ahmed UMİYE

NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Doç. Dr. Yasin Onuralp ÖZKILIÇ

2026, 87 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Yasin Onuralp ÖZKILIÇ

Prof. Dr. Sadık Alper YILDIZEL

Dr. Öğr. Üyesi Nebi ÖZDÖNER

Dünya genelinde giderek artan plastik atık miktarı önemli bir çevresel sorun hâline gelmiştir. Bu soruna yönelik olası çözümlerden biri, plastik atıkların yapı malzemelerinde yeniden kullanılmasıdır. Bu araştırmada, plastik atık içeren hafif betonların mekanik özellikleri hem ortam sıcaklığı hem de yüksek sıcaklık koşulları altında deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, parçalanmış plastik atıkların hafif beton karışımlarında kısmi agregası ikamesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Deneysel program kapsamında, plastik atıkların %0, %1, %3, %5, %10, %15, %20, %25, %30, %40 ve %50 oranlarında kullanıldığı hafif beton karışımları hazırlanmıştır. Hafif beton karışımlarında hafif agregası olarak pomza agregası kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan plastik atıklar parçalanarak elde edilmiş; temizlenmiş, kurutulmuş ve beton karışımlarına eklenmeden önce küçük parçalar hâline getirilmiştir. Kür işleminin ardından beton numuneleri, betonun mekanik performansı üzerindeki ısı etkisinin belirlenebilmesi amacıyla 600°C'ye kadar farklı sıcaklık seviyelerine maruz bırakılmıştır. Numunelerin mekanik davranışını belirlemek amacıyla basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, seçilen plastik ikame oranlarını (%0, %5, %10, %20 ve %30) içeren donatılı beton kırış numuneleri dört noktalı eğilme deneyine tabi tutularak yapısal davranışları incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, plastik atık miktarının artmasıyla birlikte betonun mekanik dayanımında genel olarak bir azalma meydana geldiğini göstermiştir. Bu azalma, plastik parçacıklar ile çimento matrisi arasındaki zayıf aderans ve plastik malzemelerin düşük rijitliğe sahip olmasıyla açıklanmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklıklara maruz kalma, betonun iç yapısında oluşan ısı hasarı ve mikro yapısal değişimler nedeniyle mekanik dayanımda ilave azalmaya neden olmuştur. Bu yaklaşım, hem plastik atıkların çevreye verdiği olumsuz etkilerin azaltılmasına katkı sağlamak hem de inşaat sektöründe kaynakların daha verimli kullanılmasına olanak tanımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Plastik atık, Hafif beton, Pomza agregası, Yüksek sıcaklık, Basınç dayanımı, Yarmada çekme dayanımı, Eğilme dayanımı ve Donatılı beton kırışlar

ABSTRACT

MS THESIS

EVALUATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES AFTER DIFFERENT TEMPERATURE CONDITIONS OF LIGHTWEIGHT CONCRETE WITH PLASTIC WASTE AND PUMICE AGGREGATE SUBSTITUTION

Osman Ahmed UMİYE

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY THE DEGREE OF MASTER OF
SCIENCE IN CIVIL ENGINEERING

Advisor: Assoc. Dr. Yasin Onuralp ÖZKILIÇ

2026, 87 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Yasin Onuralp ÖZKILIÇ

Prof. Dr. Sadık Alper YILDIZEL

Asst. Prof. Dr. Nebi ÖZDÖNER

The increasing amount of plastic waste generated worldwide has become a significant environmental concern. One potential solution to this problem is the reuse of plastic waste in construction materials. In this study, the mechanical properties of lightweight concrete containing plastic waste were experimentally investigated under both ambient and elevated temperature conditions. The study examined the feasibility of using shredded plastic waste as a partial replacement for aggregate in lightweight concrete incorporating pumice aggregate. Within the experimental program, lightweight concrete mixtures were prepared with plastic waste replacement ratios of 0%, 1%, 3%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 40%, and 50%. Pumice aggregate was used as the lightweight aggregate in all mixtures. The plastic waste used in the study was obtained by shredding, then cleaned, dried, and reduced to small pieces before being incorporated into the concrete mixtures. After curing, the concrete specimens were exposed to different temperature levels up to 600°C in order to evaluate the effect of thermal exposure on mechanical performance. Compressive strength, splitting tensile strength, and flexural strength tests were conducted to determine the mechanical behavior of the specimens. In addition, reinforced concrete beam specimens containing selected plastic replacement ratios (0%, 5%, 10%, 20%, and 30%) were subjected to four-point bending tests to evaluate their structural behavior. The experimental results indicated that the mechanical strength of concrete decreased progressively with increasing plastic waste content. This reduction is attributed to the weak bond between plastic particles and the cement matrix, as well as the low stiffness of plastic materials. Furthermore, exposure to elevated temperatures caused additional reductions in mechanical strength due to thermal damage and microstructural changes within the concrete. This approach contributes to reducing the environmental impact of plastic waste while promoting more efficient use of resources in the construction industry.

Keywords: Plastic waste, Lightweight concrete, Pumice aggregate, Elevated temperature, Compressive strength, Splitting tensile strength, Flexural strength and Reinforced concrete beams.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı kapsamında hazırlanmıştır. Çalışmada, beton üretiminde plastik atıkların kullanımının mekanik özellikler üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiş ve farklı sıcaklık koşulları altında beton davranışı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda elde edilen bulguların, sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesine katkı sağlaması amaçlanmıştır.

Tez çalışmamın her aşamasında bilgi, tecrübe ve değerli yönlendirmeleriyle bana rehberlik eden, çalışmanın planlanması ve yürütülmesi sürecinde her zaman destek olan değerli danışmanım Doç. Dr. Yasin Onuralp ÖZKILIÇ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, lisansüstü eğitimim süresince bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım tüm öğretim üyelerine teşekkür ederim. Deneysel çalışmalar sırasında laboratuvar imkânlarının sağlanmasında ve uygulama aşamasında destek olan ilgili personele de şükranlarımı ifade etmek isterim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan anneme, babama ve tüm kardeşlerime sonsuz teşekkür ederim. Onların duaları ve destekleri olmadan bu çalışmanın tamamlanması mümkün olmazdı.

Ayrıca, deneysel çalışmaların yürütülmesi sürecinde büyük katkı sağlayan ve laboratuvar çalışmalarında benimle birlikte yoğun emek harcayan değerli arkadaşlarım Fatih YILMAZ, Mohamed Abdikarin MOHAMUD ve Mohamed Ahmed SOUMBOUROU'ya içten teşekkür ederim. Deneysel süreç boyunca her gün birlikte çalışarak bu araştırmanın gerçekleştirilmesine önemli katkılarda bulunmuşlardır.

Son olarak, eğitim hayatım boyunca bana destek olan tüm dostlarıma ve emeği geçen herkese teşekkür ederim.

Osman Ahmed UMİYE
KONYA-2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	13
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	21
2.1. Plastik Atık ve Çevresel Etkileri.....	21
2.2. Beton Uygulamalarında Plastik Atık Kullanımı	22
2.2.1. Basınç dayanımı.....	23
2.2.2. Yarma çekme dayanımı	30
2.2.3. Eğilme dayanımı	33
2.3. Hafif Beton ve Donatılı Beton Kiriş Davranışı	36
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	40
3.1. Beton Numuneleri.....	40
3.1.1. Kullanılan malzemeler ve özellikleri	40
3.1.1.1. Çimento.....	40
3.1.1.2. İri agrega	41
3.1.1.3. İnce agrega	41
3.1.1.4. Su	42
3.1.1.5. Plastik.....	42
3.1.1.6. Karışım tasarımı.....	44
3.1.1.7. Numunelerin hazırlanması	45
3.2. Donatılı Beton Kirişler.....	46
3.2.1. Beton karışım tasarımı	47
3.2.1. Deney numuneleri.....	48
3.2.1.1. Küp numuneleri	49
3.2.1.2. Kiriş numuneleri	50
3.2.1.3. Yüksek sıcaklık deneyi prosedürü	50
3.2.1.4. Kiriş eğilme deneyi	51
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	53
4.1. Beton Numuneleri.....	53
4.1.1. Basınç dayanımı.....	53
4.1.2. Yarmada çekme dayanımı	56
4.1.3. Eğilme dayanımı	59
4.1.4. Görsel gözlemler.....	62
4.2. Donatılı Beton Kirişler.....	63

4.2.1. Kp numunelerde basınç dayanımı.....	63
4.2.2. Yük–deplasman davranışı.....	64
4.2.3. Çatlak gelişimi ve göçme gözlemleri.....	65
4.2.4. Sıcaklığın yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi	67
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	73
5.1. Numune Sonuçları	73
5.2. Kiriş Sonuçları	74
5.3. Öneriler	74
6. KAYNAKLAR.....	76



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Geri dönüşüm süreci adımları	23
Şekil 2.2. Farklı plastik agrega ikame oranlarına bağlı olarak 28 günlük beton basınç dayanımındaki değişim.	29
Şekil 2.3. Farklı plastik agrega ikame oranlarına bağlı olarak 28 günlük beton yarmada çekme dayanımındaki değişim.....	32
Şekil 2.4. Farklı plastik agrega ikame oranlarına bağlı olarak 28 günlük beton eğilme dayanımındaki değişim.	35
Şekil 3.1. Deneyleerde kullanılan kesilmiş plastik atıkların genel görünümü ve boyutlarının gösterimi.....	43
Şekil 3.2. Plastik atıkların boyut aralıklarına göre yüzde dağılımı	44
Şekil 3.3. Beton karışımlarında kullanılan kaba agrega, ince agrega ve plastik atık ...	45
Şekil 3.4. Basınç, yarmada çekme ve eğilme deney düzenekleri	46
Şekil 3.5. Betonarme kiriş numuneleri için hazırlanan donatı kafeslerinin kalıplara yerleştirilmesi ve küp kalıpları	49
Şekil 3.6. Deneyleerde kullanılan hafif betonarme kiriş numunesinin donatı düzeni.....	50
Şekil 3.7. Yüksek sıcaklık deneyi için fırın içerisine yerleştirilen küp ve kiriş numuneleri	51
Şekil 3. 8. Betonarme kiriş numunesinin eğilme deneyi düzeneği.....	52
Şekil 4.1. 24°C ile 600 °C arasındaki sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra, farklı değiştirme oranları içeren beton numunelerinin basınç dayanımı gelişimi	54
Şekil 4.2. Değişen plastik içerik ve termal koşullara maruz kalan beton küp numunelerinin basınçlı kırılma modelleri.....	55
Şekil 4.3. İkame oranı ve maruz kalma sıcaklığının 24–600 °C betonun yarma çekme dayanımı üzerindeki etkisi	58
Şekil 4.4. Çeşitli plastik içerik ve termal koşullarda beton silindirlerin yarma çekme özellikleri	58
Şekil 4.5. İkame oranı ve maruz kalma sıcaklığının 24°C ile 600 °C betonun eğilme dayanımı üzerindeki etkisi	61
Şekil 4.6. Çeşitli plastik içerik ve termal koşullarda beton eğilme özelliklerinin kırılma davranışı.....	61
Şekil 4.7. Farklı plastik içerik ve sıcaklık maruziyetleri yarma çekme testine maruz kalan tabi tutulan numunelerin kırılma görünümleri	63
Şekil 4.8. Küp numunelerde basınç dayanımının sıcaklık ve plastik oranına bağlı değişimi.....	64
Şekil 4.9. Dört noktalı eğilme deneyi sırasında donatılı beton kirişte çatlak gelişimi ve nihai göçme durumu	67
Şekil 4.10. Donatılı beton kirişin orta açıklık bölgesinde çatlak ilerlemesi	67
Şekil 4.11. %0 plastik içeren referans kirişin farklı sıcaklık seviyelerinde yük–deplasman davranışı.....	68
Şekil 4.12. %5 plastik içeren referans kirişin farklı sıcaklık seviyelerinde yük–deplasman davranışı.....	69
Şekil 4.13. %10 plastik içeren referans kirişin farklı sıcaklık seviyelerinde yük–deplasman davranışı.....	70

Şekil 4.14. %20 plastik içeren referans kirişin farklı sıcaklık seviyelerinde yük–deplasman davranışı.....	71
Şekil 4.15. %30 plastik içeren referans kirişin farklı sıcaklık seviyelerinde yük–deplasman davranışı.....	72



ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 2.1. Önceki çalışmalarda elde edilen basınç dayanımı sonuçlarının özeti	26
Çizelge 2.2. Önceki çalışmalarda yarmada çekme dayanımına ilişkin elde edilen sonuçların özeti	31
Çizelge 2.3. Önceki çalışmalarda eğilme dayanımına ilişkin elde edilen sonuçların özeti	34
Çizelge 2.4. Plastik atık türleri ve kaynakları	39
Çizelge 3.1. Beton karışım oranları	45
Çizelge 3.2. Plastik atık ikame oranına göre hazırlanan numune sayıları ve uygulanan sıcaklık koşulları	47
Çizelge 3.3. Eğilme numunelerinin donatı detayları ve maruz kaldıkları sıcaklık koşulları.	48
Çizelge 3.4. Küp ve kiriş numuneleri için kullanılan hafif beton karışım oranları	49

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

SİMGELER

°C	Sıcaklık
kg	Kilogram
mpa	Megapaskal
mm	Milimetre
%	Yüzde

KISALTMALAR

ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Derneği
CA	İri agrega
FA	İnce agrega
PP	Polipropilen
REF	Referans beton karışımı
TS EN	Türk Standardı – Avrupa Normu
PAA	Plastik Atık Agregası

1. GİRİŞ

İnşaat sektörünün çevresel etkisi, özellikle beton üretimi, son yıllarda giderek artan bir endişe kaynağı hâline gelmiştir (Zeyad, 2023). Beton, binlerce yıl boyunca ayakta kalabilen yapıların inşa edilmesine olanak tanıyan, sürdürülebilir ve çok yönlü bir yapı malzemesidir. Geniş kullanım alanları nedeniyle beton, sudan sonra dünyada en çok tüketilen ikinci malzeme olup, 2021 yılında küresel çimento üretimi yaklaşık 4,1 milyar ton olarak gerçekleşmiş ve yıllık beton tüketiminin bunun yaklaşık yedi katı olduğu rapor edilmiştir (Huo vd., 2023; Monteiro vd., 2017). Dünya nüfusundaki artış, inşaat faaliyetlerine olan talebi artırmakta ve bu durum doğal kaynaklara olan ihtiyacı daha da yükseltmektedir. Ancak inşaat faaliyetlerindeki bu artış, fosil yakıt tüketiminin artması ve doğal kaynakların tükenmesi gibi önemli çevresel sorunları da beraberinde getirmektedir. Sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi için ekolojik, sosyal ve ekonomik faktörlerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. İnşaat sektörü, çevresel etkiler kapsamında özellikle sera gazı salımlarına, başta karbondioksit (CO₂) olmak üzere, odaklanmaktadır (Javadabadi vd., 2019) Küresel ölçekte iklim değişikliğiyle mücadeleye yönelik çabalar yoğunlaşırken, geleneksel çimento kullanımına olan bu bağımlılık ciddi bir çevresel sorun oluşturmaktadır. Bu nedenle, yapısal güvenilirliği korurken karbon salımlarını azaltan alternatif yapı malzemelerinin geliştirilmesine yönelik acil bir ihtiyaç ortaya çıkmıştır (Sbahieh vd., 2023).

Normal beton, erişilebilirliği, dayanıklılığı ve yeterli mekanik performansı nedeniyle inşaat mühendisliğinde en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Genellikle Portland çimentosu, doğal ince agrega ve kırmataş iri agrega kullanılarak üretilmektedir. Normal ağırlıklı betonun yoğunluğu yaklaşık 2300–2500 kg/m³ aralığında olup, bu durum hafif betona kıyasla daha yüksek bir öz ağırlığa neden olmaktadır. Yüksek öz ağırlık, yapıların ölü yükünü önemli ölçüde artırmakta ve özellikle çok katlı binalarda dayanım ve hizmet verilebilirlik koşullarının sağlanabilmesi için eleman boyutlarının büyümesine yol açmaktadır. Buna bağlı olarak artan ölü yük, kiriş ve kolon tasarımını olduğu kadar temel sistemlerini ve yapının deprem performansını da doğrudan etkilemektedir. Bu sınırlamalara rağmen normal beton, kanıtlanmış yapısal güvenilirliği ve iyi tanımlanmış tasarım esasları sayesinde yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir (Monteiro, 2006; Neville, 1995).

Hafif agrega, özellikle yüksek katlı yapılarda kullanılan özel beton türlerinde betonun birim ağırlığının azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır (Choi vd., 2005)

Düşük yoğunluk ve özellikle yapısal uygulamalar için sağladığı yüksek ısı yalıtımı özellikleri sayesinde hafif beton, günümüz inşaat sektöründe önemli bir yer edinmiştir. Bu özellikler, yapısal elemanların öz ağırlığını azaltarak kesit boyutlarının küçülmesine ve temellerin (tekil temel, radye temel ve kazıklar gibi) toplam boyut ve sayısının azalmasına olanak sağlamaktadır. Bu durum hem maliyetlerin düşmesine hem de doğal kaynakların daha verimli kullanılmasına katkı sunarak sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca bazı hafif agregaların, endüstriyel atıklar veya yan ürünlerden üretildiği için çevresel faydalar da sunmaktadır (Moreno vd., 2014).

Hafif agrega betonu genellikle hava kurusu birim hacim ağırlığı 1850 kg/m^3 'ün altında olan beton olarak tanımlanırken, normal betonun yoğunluğu yaklaşık 2300 kg/m^3 civarındadır; ancak kesin bir sınır değer belirlenmesi tercih edilmemektedir (Zulkarnain ve Ramli, 2008). Topçu (1997) ve Al-Khaiat ve Haque (1998) yapısal hafif betonun daha yüksek dayanım/ağırlık oranı, daha iyi çekme şekil değiştirme kapasitesi, daha düşük ısıl genişleme katsayısı ve hafif agregadaki hava boşlukları sayesinde üstün ısı ve ses yalıtımı gibi belirgin avantajlara sahip olduğunu rapor etmiştir.

Son yıllarda dünya genelinde plastik tüketiminde önemli bir artış gözlenmiş ve bu durum büyük miktarlarda plastik atığın ortaya çıkmasına neden olmuştur. Plastik atıkların beton veya harç gibi yeni malzemelerin üretiminde geri dönüştürülmesi, ekonomik ve ekolojik avantajları nedeniyle plastik atıkların bertaraf edilmesinde en etkili çözümlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Plastik atıkların agrega, dolgu malzemesi veya lif olarak kullanıldığı çimento esaslı kompozitlerin özelliklerini inceleyen çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiş veya hâlen devam etmektedir (Saikia ve De Brito, 2012). Plastik atıklar, ambalaj sanayi ve hanehalkı gibi farklı kaynaklardan köken alan ve yeryüzünde biriken plastik malzemeler olarak tanımlanabilir. Küresel ölçekte her yıl yaklaşık 6,5 milyar ton plastik atık üretildiği bildirilmektedir (Jnr vd., 2018). Plastik atıkların birikmesi, çoğu plastik malzemenin biyobozunur olmaması ve bozunma süresinin 400 yıldan fazla olması nedeniyle ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır. Bu bağlamda plastik atıklar, büyük alanlara ihtiyaç duyan düzenli depolama sahalarına yerleştirilmekte ve bu durum depolama alanları üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır (Da Costa vd., 2016). Çevresel yükün azaltılabilmesi için somut ve etkili önlemlerin alınması gerekmektedir. Plastik atıkların normal beton içerisinde kullanımını inceleyen çok sayıda çalışma bulunmasına karşın, hafif agregalarla birlikte hafif beton bünyesinde kullanımına yönelik araştırmalar sınırlı düzeydedir. Ayrıca, benzer ikame oranları ve aynı deney

koşulları altında hem normal beton hem de hafif betonun birlikte değerlendirildiği karşılaştırmalı çalışmalar literatürde yeterince yer almamaktadır.

Beton

Beton, çimento, su ve kum ile çakıl gibi agregalardan oluşan kompozit bir malzeme olup, inşaat için temel bir malzemedir. Bu bileşim, yapısal dayanıklılığı ve uyarlanabilirliği ile bilinen ve çeşitli inşaat uygulamaları için vazgeçilmez olan son derece esnek ve dayanıklı bir yapı malzemesi üretir (Li, 2017).

Betonun bileşimi bazı temel bileşenleri içerir: Çimento bağlayıcı bir madde işlevi görürken, agregalar betona hacim ve dayanıklılık sağlar. Su, çimento partikülleri ile su arasında gerçekleşen kimyasal bir reaksiyon olan hidrasyon sürecinde önemli bir rol oynar ve bu süreç betonun sertleşmesini ve zamanla dayanım kazanmasını sağlar (Saremi ve Goulias, 2023). Su-çimento oranı, agrega seçimi ve özel katkı maddeleri gibi ana beton bileşenlerinin oranları, betonun işlenebilirliği, dayanıklılığı ve mukavemeti gibi nihai özelliklerini belirlemede kritik öneme sahiptir. Bu ayarlamalar, malzemenin farklı çevresel ve yükleme koşulları altındaki performansını önemli ölçüde etkiler (Ibañez vd., 2017).

Kalıp, beton inşaatında temel bir rol oynar ve taze betona sertleşene kadar şekil veren geçici bir destek yapısı işlevi görür. Beton karışımı, istenen şekil ve boyuttaki bir kalıba yerleştirilerek malzemenin sertleşmesi sağlanır ve belirlenen geometri ve boyutlarda taş benzeri bir yapıya dönüşür. Bu süreç, sertleşen betonun hem tasarlanan formunu hem de yapısal bütünlüğünü korumasını sağlar ve her inşaat projesi için belirlenen tasarım gereksinimlerini karşılar. Uygun kalıp seçimi ve kurulumu yalnızca şekli değil, aynı zamanda nihai ürünün dayanıklılığı ve mukavemetini de etkilediği için büyük önem taşır. Dikkatli planlama ve hassasiyetle kalıplar, betonun karmaşık şekillerde dökülmesini sağlayarak inşaat sektöründe yenilikçi ve dayanıklı tasarımları destekler (W. Li vd., 2022).

Pomza

Pomza taşı, patlayıcı volkanik patlamalar sırasında süper ısıtılmış magmanın hızlı soğuması ve aniden basınç kaybetmesiyle oluşan, düşük yoğunluklu ve gözenekli bir volkanik kayadır. Bu hızlı soğuma süreci, magmada çözünmüş olan gazların (çoğunlukla su buharı ve karbondioksit) genişleyip köpüklü, sünger benzeri bir doku oluşturmasına ve küçük veziküller veya gözeneklerle dolu bir yapı meydana getirmesine olanak tanır.

Bu gözenekler, pomza taşıyı oldukça hafif yapar ve suyun yüzeyinde yüzebilmesini sağlar; ancak zamanla gözeneklerin suyla dolması taşıın batmasına yol açar. Yüksek gözenekliliği nedeniyle ponza, hafif beton üretiminden bahçecilik ve kişisel bakıma kadar çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılır (Toktamış, 2023).

Ponza, mineral içeriği ve spesifik oluşum koşullarına bağlı olarak renk, yoğunluk ve petrofiziksel özelliklerinde çeşitlilik göstermesiyle bilinir. Bu farklılıklar, magmanın benzersiz bileşimi ve volkanik olayların patlayıcı dinamiklerinden kaynaklanır. Farklı patlamalar sırasında oluşan ponza, gaz içeriği, soğuma hızı ve magmanın diğer elementlerle etkileşimi gibi faktörlerin dokusunu ve yapısını etkileyerek kendine özgü özellikler gösterebilir. Bu nedenle ponza, fiziksel özellikler açısından geniş bir yelpazede farklılık gösterebilir ve kullanım alanları oluşum geçmişine ve doğal özelliklerine bağlı olarak değişir (Maisonneuve vd., 2009). Ayrıca ponza, plaj birikintileri ve arkeolojik alanlar gibi çeşitli jeolojik ortamlarda gelgit ve dalga hareketleriyle taşınarak bulunabilir (Turner vd., 2021).

Pomza gibi hafif agregalar, inşaatta önemli pratik ve ekonomik avantajlar sunar. Hafif agrega olarak pomza kullanımı, betonun genel ağırlığını %25–35 oranında azaltarak mukavemetten ödün vermeden normal ağırlıklı betonla benzer bir ağırlık–mukavemet oranı sağlar. Beton yoğunluğundaki bu azalma, yapısal elemanlardaki ölü yükleri azaltmanın yanı sıra hem malzeme hem de nakliye maliyetlerinde tasarruf sağlayarak daha ekonomik ve verimli inşaat projelerine katkıda bulunur (Stratoura vd., 2018). Pomza betonunun hafif yapısı, inşaatta taşımayı ve montajı kolaylaştırarak önemli avantajlar sunar. Hafif agrega olarak pomza kullanımı, betonun genel yoğunluğunu azaltarak yerinde daha kolay yerleştirilmesini sağlar. Bu artan işlenebilirlik, inşaat verimliliğini artırmanın yanı sıra projede daha hızlı ve akıcı bir ilerlemeyi destekler (Mohamed vd., 2022).

Pomza, özellikle hafif uygulamalarda betonun mekanik özelliklerini iyileştirmede önemli bir rol oynar. Araştırmalar, uygun şekilde oranlandığında pomza hafif agrega betonunun tatmin edici bir basınç dayanımına ulaşabileceğini göstermektedir. Pomza agrega olarak eklendiğinde, beton ağırlığındaki azalma ile yapısal dayanıklılık arasında etkili bir denge sağlar ve dayanıklılık ile düşük yükün gerekli olduğu çeşitli yapısal uygulamalara uygun hâle gelir (Wang vd., 2024). Ancak araştırmalar, iri agreganın %30–40'tan fazlasının pomza ile değiştirilmesinin elde edilen betonun basınç dayanımını ciddi şekilde etkilemediğini göstermektedir. Bu nedenle betonun hem hafiflik avantajlarını hem de gerekli yapısal dayanımı koruyabilmesi için bu aralıkta optimal bir ikame oranının

korunması önemlidir (Meng vd., 2022). Ayrıca ponzanın hafif agrega olarak betona dâhil edilmesi, karışım ve yerleştirme işlemlerini kolaylaştırarak işlenebilirliği artırır. Bu işlenebilirlikteki iyileşme, ponzanın yoğunluğu azaltması ve inşaat sırasında verimli taşıma ve uygulama sağlaması nedeniyle özellikle hafif beton uygulamaları için avantajlıdır (Güçlüer, 2021).

Agregaları

Agregaların, betonun temel bileşimini oluşturan ana malzemelerden biridir ve hacimce %60–80, ağırlıkça ise %70–85 oranında betonun içinde bulunur; bu da betonun genel özellikleri açısından kritik bir öneme sahiptir. Agregaların boyutu, şekli ve mineral içeriği betonun mekanik dayanımını, dayanıklılığını ve kalitesini doğrudan etkiler. Bu durum, beton uygulamalarında istenen performans özelliklerine ulaşmak için uygun agrega seçiminin önemini vurgular (Petrounias vd., 2018).

Agregaların türü ve yüzey dokusu, betonun mekanik özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynar. Daha pürüzsüz yüzeyli agregaların, çimento hamuruyla daha zayıf bir bağ oluşturarak beton dayanımını azaltabilirken, daha pürüzlü agrega dokuları hamurla daha iyi bir aderans sağlayarak daha güçlü ve dayanıklı beton yapılar oluşturur. Bu farklılık, beton uygulamalarında spesifik performans gereksinimlerine bağlı olarak agrega türlerinin seçilmesinin önemini ortaya koymaktadır (KA, 2021). Ayrıca pürüzlü agregaların, çimento hamuruyla yapışmayı artırarak betonun genel basınç dayanımını ve performansını iyileştirir (Güçlüer, 2021). Agregaların mineral bileşimi de yüksek sıcaklıklar altında dayanım azalmasını önemli ölçüde etkiler; örneğin silisli agregaların, kireçtaşı agregalarına kıyasla daha fazla hasara uğrayabilir. Bu durum, termal dayanıklılık açısından agrega seçiminin önemini ortaya koymaktadır (Arioz, 2007).

Sürdürülebilirlik açısından geri dönüştürülmüş Agregaların kullanımı, inşaat atıklarını azaltmak ve doğal kaynakları korumak için etkili bir yöntem olarak önemli ilgi görmektedir. Yıkım ve inşaat atıklarından elde edilen geri dönüştürülmüş agregaların, çevresel etkiyi en aza indirerek sürdürülebilir inşaat uygulamalarına katkıda bulunur. Bununla birlikte geri dönüştürülmüş Agregaların kullanımı, betonun basınç ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerinde değişikliklere neden olabilir. Bu nedenle güvenli ve dayanıklı inşaat için, nihai beton karışımının istenen performans standartlarına ulaşmasını sağlamak amacıyla geri dönüştürülmüş Agregaların özelliklerinin dikkatlice değerlendirilmesi gerekmektedir (Gaurav vd., 2023). Araştırmalar, geri dönüştürülmüş Agregaların atıkları azaltmak ve doğal kaynakları korumak için sürdürülebilir bir seçenek

sunduğunu; ancak betonun basınç dayanımı ve dayanıklılığı üzerindeki etkisinin yapısal uygulamalarda istenen performansı sağlamak için kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Kandiri vd., 2021).

İnşaatta agrega türleri

İnşaatta agregaların, beton ve diğer yapı malzemelerinin önemli bir kısmını oluşturur ve dört ana kategoriye ayrılır: doğal agregaların, yapay agregaların, geri dönüştürülmüş agregaların ve özel agregaların. Her biri farklı amaçlara hizmet eder ve kendine özgü özellikler sergiler. Doğal agregaların, öncelikle yerden çıkarılan kum, çakıl ve kırma taş gibi malzemeleri içerir. Kırma taş genellikle dağlardan ve nehir yataklarından çıkarılarak istenen boyut gereksinimlerini karşılayacak şekilde kırılır ve sınıflandırılır (Muhammad Riski vd., 2021). Bu agregaların, özellikle doğal yatakların bol bulunduğu bölgelerde, mevcut olmaları ve maliyet açısından avantajlı olmaları nedeniyle tercih edilir. Ancak inşaat malzemelerine olan artan talep, bu doğal kaynakların tükenmesiyle ilgili endişelere yol açarak alternatif kaynakların araştırılmasını gerekli kılmıştır (Abdullah vd., 2015).

Yapay agregaların, uçucu kül ve bazalt tozu gibi malzemeler kullanılarak alkali aktivasyon gibi belirli süreçler yoluyla endüstriyel yan ürünlerden üretilebilir ve alternatif kaynakların kullanılmasıyla sürdürülebilir inşaat uygulamalarına katkı sağlar (Copetti Callai vd., 2022). Yapay Agregaların kullanımı, doğal kaynak kıtlığını azaltarak çevresel etkileri sınırlandırır ve doğal yatakların korunmasına yardımcı olur (Özkan vd., 2022).

Geri dönüştürülmüş agregaların, inşaat ve yıkım atıklarından elde edilerek geleneksel agregalarına sürdürülebilir bir alternatif sunar ve doğal kaynakları korurken atık miktarının azaltılmasına katkı sağlar. Bu süreç, beton atıklarının kırılması ve işlenmesi yoluyla bu Agregaların beton uygulamalarında kısmi veya tamamen doğal Agregaların yerine kullanılmasını mümkün kılar (Nadigatla, 2023). Bu uygulama yalnızca doğal kaynakların korunmasına katkı sağlamakla kalmaz, aynı zamanda geri dönüştürülmüş agrega betonunu çevre dostu bir seçenek hâline getirerek depolama alanlarına giden atık miktarını da azaltır (Nili vd., 2019).

Standart agregalarına ek olarak, ağır beton uygulamaları için barit gibi özel ağır agregaların radyasyon koruma amaçlı yüksek yoğunluklu betonda kullanılmaktadır. Demir talaşı ve inşaat demiri parçaları gibi yapay ağır Agregaların eklenmesi, betonun yoğunluğunu artırarak radyasyonu engelleme kapasitesini daha da geliştirir (Kilinçarslan, 2015). Hafif beton ve belirli dayanıklılık gereksinimlerine sahip ortamlarda ise yüksek

basınç dayanımı ve düşük geçirgenlik gibi özellikleri nedeniyle gözenekli agregaların tercih edilmektedir (Wattanachai vd., 2009).

Su

Çimentonun hidrasyon süreci, esas olarak çimento partikülleri ile su arasındaki etkileşimi içeren karmaşık bir kimyasal reaksiyondur ve çeşitli hidrasyon ürünlerinin oluşumuna yol açar. Su, hidrasyon için gerekli kimyasal reaksiyonları kolaylaştırarak çözücü ve reaktif olarak bu süreçte kritik bir rol oynar.

Su-çimento (S/Ç) oranı, çimentolu malzemelerin hidrasyon derecesini etkileyen önemli bir faktördür. Çimento-cüruf karışımları gibi karmaşık bağlayıcılarda daha yüksek bir s/ç oranı, hidrasyon süreci için ek su sağlayarak reaksiyonu özellikle erken aşamalarda hızlandırabilir. Genellikle “seyreltme etkisi” olarak adlandırılan bu etki, su ile çimento partikülleri arasında daha geniş bir etkileşim sağlayarak daha yüksek bir hidrasyon derecesine yol açar. Sonuç olarak çimento-cüruf karışımlarında Portland çimentosunun artan hidrasyonu, erken yaş performansının iyileşmesine katkıda bulunur ve zamanla mekanik özelliklerin optimum şekilde gelişmesini sağlar (Liu ve Yan, 2013).

Su-çimento (S/Ç) oranı, betonun hidrasyon hızı ve genel özelliklerini belirlemede kritik bir faktördür. Yüksek performanslı betonda geçirgenliği en aza indirerek dayanıklılığı artırmak için genellikle yaklaşık 0,30 gibi düşük s/ç oranları kullanılır. Ancak bu tür düşük oranlar, tam hidrasyon için gerekli suyun bulunabilirliğini sınırlayarak erken yaş büzülmesine yol açabilir. Araştırmalar, ek nem sağlayan iç kür yöntemleri (hapsedilmiş su gibi) ile bu etkinin giderilebileceğini ve daha yüksek bir hidrasyon derecesini teşvik ederek betonun stabilitesini artırabileceğini göstermektedir. Bu bulgular, beton formülasyonlarında dayanıklılık, mukavemet ve hidrasyon verimliliği arasındaki dengeyi sağlamak için s/ç oranının optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır (Jiang ve Xia, 2011).

Araştırmanın amacı

Bu çalışmanın amacı, plastik atıkların %0, %1, %3, %5, %10, %15, %20, %25, %30, %40 ve %50 oranlarında kısmi agrega ikamesi olarak kullanıldığı hafif betonun taze ve mekanik özelliklerini deneysel olarak incelemektir. Bu kapsamda, hafif beton karışımları hafif agregalar kullanılarak hazırlanmıştır. Numuneler 24°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C ve 600°C sıcaklık seviyelerine maruz bırakılmıştır.

Farklı plastik atık ikame oranlarının hafif betonun, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Böylece plastik atık içeren hafif betonun hem ortam sıcaklığındaki hem de artan sıcaklık seviyeleri altındaki davranışlarının ortaya konulması amaçlanmıştır.

Araştırmanın önemi

Plastik atıkların beton bünyesinde kullanımına ilişkin literatürde çok sayıda çalışma bulunmasına karşın, bu atıkların geniş bir ikame aralığında (%0–%50) ve yüksek sıcaklık koşulları altında hafif beton için ele alındığı çalışmalar sınırlıdır. Ayrıca, plastik atık içeren hafif betonların 24°C’den 600°C’ye kadar değişen sıcaklık koşulları altında mekanik performanslarının sistematik olarak incelendiği araştırmalar literatürde yeterince yer almamaktadır. Bu çalışma, farklı plastik atık ikame oranlarının hafif betonun mekanik davranışı üzerindeki etkilerini ve yüksek sıcaklık altında meydana gelen performans değişimlerini deneysel olarak inceleyerek literatürdeki bu boşluğa katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Bunun yanı sıra, yüksek oranlarda plastik atık kullanımının hafif betonun mekanik davranışı üzerindeki etkilerinin ve yüksek sıcaklık altında oluşan performans değişimlerinin ortaya konulması, hem yangın dayanımı açısından mühendislik uygulamalarına hem de atık plastiklerin sürdürülebilir yapı malzemelerinde değerlendirilmesine önemli katkılar sunmaktadır. Elde edilen sonuçların, çevresel etkisi azaltılmış ve kaynak verimliliği yüksek betonların geliştirilmesine yönelik gelecekteki çalışmalara temel oluşturması beklenmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Plastik atıkların çevresel etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, bu bölümde konuya ilişkin mevcut literatür detaylı olarak incelenmiştir.

2.1. Plastik Atık ve Çevresel Etkileri

Küresel plastik üretimi son on yıllarda önemli ölçüde artmış olup, 2002 yılında yıllık yaklaşık 200 milyon ton seviyesindeyken 2015 yılında 322 milyon tona ulaşmış ve 2030 yılına kadar yaklaşık 485 milyon tona çıkması öngörülmektedir (Pimentel, 2022). Plastik malzemeler; düşük maliyetleri, dayanıklılıkları ve çok yönlü kullanımları nedeniyle ambalaj, inşaat, otomotiv, tıbbi, elektronik ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, belediye katı atıkları ve evsel ürünlerden kaynaklanan plastik atıkların birikimi önemli bir çevresel sorun hâline gelmiştir. Plastik atıklar, toprak, hava ve suyu kirletebilen zararlı maddeler içermeleri nedeniyle çevre üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır. Plastik atıklar içerisinde en büyük payı yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) oluşturmakta olup, bunları polietilen tereftalat (PET), polipropilen (PP) ve polistiren (PS) izlemektedir. Düzenli depolama ve yakma gibi geleneksel bertaraf yöntemleri çevresel kirliliğe yol açmakta ve insan sağlığı açısından çeşitli riskler oluşturmaktadır. Bu nedenle plastik atıkların geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanımı, son yıllarda hem hükümetler hem de çevre kuruluşları tarafından giderek daha fazla önem verilen bir konu hâline gelmiştir (Basha vd., 2020).

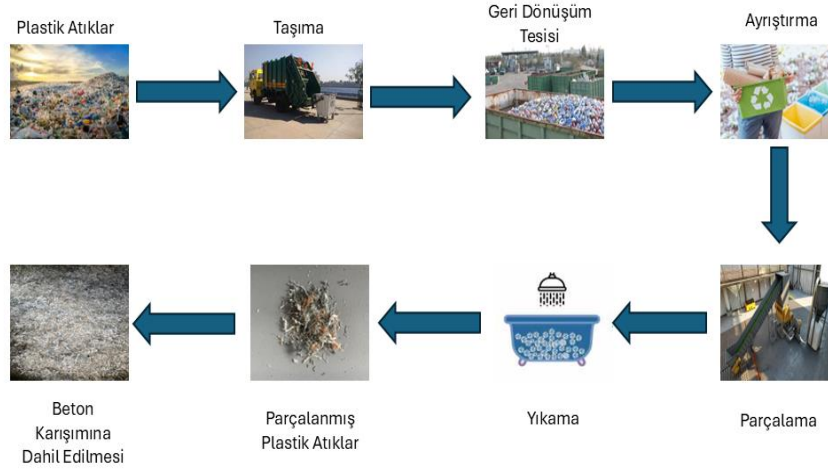
İnşaat sektörü, doğal kaynak tüketimini azaltmak ve çevresel etkileri en aza indirmek amacıyla sürdürülebilir çözümler geliştirmeye yönelmiştir. Bu kapsamda öne çıkan yaklaşımlardan biri, beton ve harçlarda doğal Agregaların geri dönüştürülmüş plastik malzemelerle kısmen ikame edilmesidir (Silva vd., 2013). Çeşitli çalışmalar, plastik esaslı hafif Agregaların betonun birim ağırlığını azaltabildiğini ve aynı zamanda ısı ve ses yalıtım özellikleri ile mekanik enerji yutma kapasitesini iyileştirebildiğini rapor etmiştir (Liguori vd., 2014). Bu özellikler nedeniyle plastik katkılı betonlar genellikle zemin dolgu betonları, sandviç paneller, prefabrike yapı elemanları ve gürültü bariyeri bileşenleri gibi taşıyıcı olmayan uygulamalar için önerilmektedir (Ruiz-Herrero vd., 2016). Bu tür malzemelerin davranışı, kullanılan plastik parçacıkların şekli, boyutu ve çimento matrisi içindeki dağılımından önemli ölçüde etkilenmektedir.

Genel olarak beton içerisine plastik atık ilavesi, özellikle yüksek ikame oranlarında, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerde azalmaya yol açmaktadır (Alhamad vd., 2022; Almeshal vd., 2020). Da Silva vd. (2014), PET agregası içeren harçların, PET parçacıkları ile çimento matrisi arasındaki zayıf aderans nedeniyle basınç ve eğilme dayanımlarında düşüş sergilediğini bildirmiştir. Benzer şekilde, Mustafa vd. (2019), kumun polikarbonat parçacıkları ile ikame edilmesinin betonun statik dayanımını azalttığını; ancak bu tür betonların darbe yükleri altında daha iyi performans ve daha yüksek enerji yutma kapasitesi gösterdiğini ortaya koymuştur.

2.2. Beton Uygulamalarında Plastik Atık Kullanımı

Plastik katkılı betonların yüksek sıcaklıklar altındaki davranışı da birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Islam (2022) PP agregası içeren betonlarda plastik içeriği arttıkça basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarının azaldığını ve özellikle 200°C'nin üzerindeki sıcaklıklara maruz kalındığında dayanım kayıplarının belirgin hâle geldiğini rapor etmiştir. Correia vd. (2014) ve diğer araştırmacılar ise 600°C ve üzerindeki sıcaklıklarda plastiklerin erimesi, termal bozulması ve iç yapıda artan porozite nedeniyle mekanik özelliklerde ciddi bozulmalar meydana geldiğini belirtmiştir. Genel olarak çekmeye bağlı mekanik özelliklerin, sıcaklık artışına karşı basınç dayanımına kıyasla daha hassas olduğu görülmüştür (Zalhaf vd., 2025). HDPE kullanımını silis dumanı gibi tamamlayıcı çimento esaslı malzemelerle birlikte ele alan çalışmalar, orta seviyedeki plastik içeriğinin ısı etki sonrasında dayanım korunmasını sınırlı ölçüde iyileştirebildiğini; buna karşın aşırı plastik ikamesinin yangın dayanımını ve mekanik performansı önemli ölçüde düşürdüğünü göstermiştir (Pasha vd., 2025). Genel olarak literatür, plastik atık kullanımının sürdürülebilirliği artırabildiğini ve betonun yoğunluğunu azaltabildiğini ortaya koymakla birlikte, özellikle yüksek sıcaklık koşullarında aşırı dayanım kaybını önlemek için kullanım oranlarının dikkatle kontrol edilmesi gerektiğini doğrulamaktadır (Biskri vd., 2024). Şekil 2.1'de plastik atıkların beton üretiminde değerlendirilmesine yönelik izlenen genel süreç şematik olarak sunulmaktadır. Bu süreç, çevreden toplanan plastik atıkların taşınarak geri dönüşüm tesislerine ulaştırılması ile başlamaktadır. Geri dönüşüm tesislerinde plastik atıklar türlerine göre ayrıştırılmakta, ardından mekanik parçalama işlemi uygulanarak istenilen boyutlara indirilmektedir. Parçalama işlemi takiben plastik atıklar, üzerlerinde

bulunabilecek toz, kir ve yabancı maddelerin uzaklaştırılması amacıyla yıkama işlemine tabi tutulmaktadır. Temizlenen ve parçalanmış plastik atıklar uygun boyut ve formda hazırlandıktan sonra beton karışımına dâhil edilerek doğal agregalarına kısmi bir alternatif olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, hem plastik atıkların çevreye verdiği olumsuz etkilerin azaltılmasına hem de beton üretiminde sürdürülebilir ve çevre dostu malzemelerin kullanımının teşvik edilmesine katkı sağlamaktadır.



Şekil 2.1. Geri dönüşüm süreci adımları

2.2.1. Basınç dayanımı

Plastik üretimi yüksek olup, çevrede uzun süre kalması nedeniyle ekosistem ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır. Bu nedenle plastik atıkların azaltılması, yeniden kullanımı ve geri dönüşümü büyük önem taşımaktadır (Pilapitiya ve Ratnayake, 2024). Düşük atık akışı içerisinde yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) en büyük payı oluşturmaktadır. Bunları sırasıyla polietilen tereftalat (PET), polipropilen (PP) ve polistiren (PS) takip etmektedir. Geçmişte yaygın olarak kullanılan düzenli depolama ve biyolojik olarak parçalanamayan atıkların yakılması gibi yöntemler, önemli çevresel kirliliğe ve yoğun duman oluşumuna neden olmakta ve sonuç olarak hem çevre hem de insanlık için küresel ölçekte bir tehdit oluşturmaktadır. Son yıllarda ise devlet kurumları ve çevre aktivistleri, çevresel kirlilik konusundaki endişeleri azaltmak amacıyla polimer esaslı atık malzemelerin geri dönüştürülmesine ve bu malzemelerin farklı uygulama alanlarında değerlendirilmesine odaklanmaktadır (Basha vd., 2020). Önceki araştırmaların sonuçları, plastik atıkların (PW) beton karışımlarında iri agreganın kısmi ikamesi olarak kullanılmasının etkinliğini ve sürdürülebilirlik açısından sağladığı faydaları ortaya koymaktadır. Bununla birlikte,

Agregaların %2,5'ten daha yüksek oranlarda plastik atık ile değiştirilmesi durumunda üretilen betonun basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımının önemli ölçüde ve sürekli şekilde azaldığı belirlenmiştir. Yapılan çalışmalara göre %2,5 oranında plastik atık içeren betonun basınç dayanımındaki azalma, kontrol betonu ile karşılaştırıldığında %1'i aşmamaktadır. Buna karşın %5 oranında plastik atık kullanılması durumunda basınç dayanımında yaklaşık %24 oranında bir düşüş meydana gelmektedir. Ayrıca %12,5 plastik atık içeren betonlarda eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımındaki maksimum azalma oranlarının sırasıyla %40 ve %32 olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle plastik atık içeren betonun özellikle %2,5'e kadar olan düşük oranlarda kullanılması durumunda mekanik dayanımını büyük ölçüde koruyabildiği ve yapısal uygulamalarda kullanılabileceği ifade edilmektedir (Mohamedsalih vd., 2024). Başka bir çalışmada ise kumun kısmi ikamesi olarak kullanılabilecek uygun plastik malzemenin belirlenmesi amacıyla on bir farklı beton karışımı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda beş farklı plastik malzeme bileşimi, üç farklı parçacık boyutu grubu, üç farklı en-boy oranı ve iki farklı kimyasal işlem yöntemi incelenmiştir. Araştırma sonuçları, kumun hacimce %10 oranında geri dönüştürülmüş plastik ile değiştirilmesinin uygulanabilir bir çözüm olduğunu ve bu yaklaşımın her yıl yaklaşık 820 milyon ton kum tasarrufu sağlayabilecek önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir (Thorneycroft vd., 2018). Bir diğer çalışmada doğal agreganın geri dönüştürülmüş plastik ile üç farklı oranda (%5, %10 ve %15) ikame edilmesi incelenmiştir. Bu ikame işlemi hacim esasına göre gerçekleştirilmiş ve yalnızca 1–2 mm boyut aralığındaki agrega fraksiyonunda uygulanmıştır. Çalışmada ayrıca plastik peletleri ve plastik pulları temsil eden iki farklı PET agrega türü olan PP ve PF Agregaları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, plastik Agregaların kullanılması bazı özelliklerde performans düşüşüne yol açsa da bazı durumlarda modifiye edilmiş harçların plastik içermeyen kontrol harcına kıyasla önemli performans iyileşmeleri gösterdiğini ortaya koymuştur. Basınç ve eğilme dayanımı sonuçları, referans harç ile karşılaştırıldığında daha belirgin farklılıklar göstermesi nedeniyle karar sürecinde önemli bir rol oynamıştır. Özellikle PF agregası içeren harçlarda mekanik dayanımın belirgin şekilde azaldığı, ancak %15 gibi en yüksek ikame oranına sahip modifiye harçların bazı özellikler açısından avantaj sağlayabildiği belirlenmiştir. PET Agregaların kullanılmasıyla darbe dayanımı gibi bazı özelliklerde iyileşme sağlandığı da rapor edilmiştir (Da Silva vd., 2014). Hafif beton (LWC), düşük yapısal ağırlık, gelişmiş ısı yalıtımı ve sürdürülebilirlik gibi önemli avantajları nedeniyle son yıllarda giderek artan bir ilgi görmektedir (Behera vd., 2025). Hafif beton, normal

betonla benzer dayanım özelliklerine sahip olmakla birlikte genellikle normal betondan %25–35 oranında daha hafiftir (Cavalline vd., 2017). Yeterli mekanik dayanımı düşük yapısal ağırlık ile birleştirme yeteneği sayesinde yapısal hafif agrega betonu, modern inşaat sektöründe değerli ve çok yönlü bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Ön gerilmeli veya prefabrik yapı elemanları, köprüler, açık deniz petrol platformları, çok katlı yapıların taşıyıcı sistemleri ve döşemeleri gibi pek çok farklı uygulama alanında kullanılabilir (Thienel vd., 2020).

Plastik atık agregası içeren betonun basınç dayanımı çeşitli faktörlerden olumsuz yönde etkilenebilmektedir. Bu faktörler arasında;

(1) PAA'nın hidrofobik yapısı nedeniyle çimento hidratasyon reaksiyonları için gerekli suyun sınırlı olması ve bunun sonucunda hidratasyon süreçlerinin kısıtlanması,

(2) çimento hamuru ile PAA yüzeyi arasındaki bağ dayanımının oldukça düşük olması (Cao vd., 2022).

(3) PAA içeren betonlarda gözeneklilik ve hava içeriğinin artması.

(4) PAA'nın elastisite modülünün doğal iri (CA) veya ince agregalarına (FA) kıyasla daha düşük olması.

(5) alkali ortam gibi çevresel koşullar altında PAA agregalarının olası bozulmaları yer almaktadır (Dehghan vd., 2017).

Araştırma bulguları, beton karışımlarında kullanılan plastik atık oranı arttıkça dayanım değerlerinde göreceli bir azalma meydana geldiğini göstermektedir. Bu azalma özellikle yüksek ikame oranlarında daha belirgin hale gelmekte ve %30 ikame oranında, 28 günlük kür süresi sonunda referans karışıma kıyasla yaklaşık %53'e kadar ulaşabilmektedir. Özellikle ince agreganın %5 oranında plastik atık ile ikame edildiği ve 28 gün kür uygulanan beton numunelerinde, aynı kür süresine sahip kontrol numunelerine kıyasla yaklaşık %1 oranında dayanım kaybı tespit edilmiştir (Jibrin et al., 2017). Batayneh vd. (2007), PAA'nın kum yerine kullanılması durumunda betonun basınç dayanımında önemli bir azalma meydana geldiğini bildirmiştir. Bu çalışmada %20 ikame oranının yaklaşık %72 dayanım kaybına, %5 PAA ikamesinin ise yaklaşık %23 dayanım kaybına yol açtığı belirtilmiştir. PET agregası içeriğinin artmasıyla birlikte betonun basınç dayanımında sürekli bir azalma gözlemlenmiştir. Bu dayanım kaybının beton içerisinde bal peteği boşluklarının oluşması ve farklı kırılma mekanizmalarının gelişmesi ile ilişkili olduğu ifade edilmektedir (Ahmad vd., 2022). Önceki çalışmalarda basınç dayanımına ilişkin elde edilen sonuçların özeti Çizelge 2.2'de sunulmaktadır.

Çizelge 2.1.Önceki çalışmalarda elde edilen basınç dayanımı sonuçlarının özeti

Yazarlar	Plastik Türü	İkame Türü	İkame Oranı	Plastik Atık Boyutu	Su-Çimento Oranı	Katkı Maddeleri	Kontrol (MPa)	Sonuçlar
(Rahim, Salleh uddin, vd., 2013)	HDP E	İri agrega	%10, %20 ve %30	5–10 mm	0,55	-	28,402	Sırasıyla %6,28, %19,03 ve %35,75 oranında azalmıştır.
(Kou vd., 2009)	PVC	İnce agrega	%5, %15, %30 ve %45	<5 mm	0,32	Süperakışkanlaştırıcı	40,8	Sırasıyla %9,1, %18,6, %21,8 ve %47,3 oranında azalmıştır.
(Bachtar vd., 2020)	PET	İri agrega	%25, %50, %75 ve %100	5–20 mm	0,48 ve 1,29	-	18,20	%25'te %28,15, %50'de %33,45, %75'te %42,36 ve %100'de %46,28 oranında azalmıştır.
(Akin yele vd., 2015)	PP	İnce agrega	%4, %8, %12 ve %16	<4,5 mm	0,75	-	19,07	Sırasıyla %14,63, %17,46, %34 ve %49,56 oranında azalmıştır.
(Mohammed vd., 2019)	PVC	İnce agrega	%5, %15, %30, %45, %65 ve %85	<2 mm	0,52	-	41,51	Sırasıyla %4,53, %8,77, %22,62, %42,03, %52,77 ve %60,48 oranında azalmıştır.
(Guedou, Debieb, Boukendak dji, vd., 2016)	LDP E	İnce agrega	%10, %20, %30 ve %40	1,5 mm	0,86	Süperakışkanlaştırıcı	20	%10'da %25, %20'de %30, %30'da %10 ve %40'ta %2,5 oranında artmıştır.

Çizelge 2.1. (devam). Önceki çalışmalarda elde edilen basınç dayanımı sonuçlarının özeti

(Geso glu vd., 2017)	PVC	Çimento	%5, %10, %15, %20 ve %25	<1 mm	93`0,35	Uçucu kül	60,4	Sırasıyla %5,18, %8,05, %11,51, %22,62 ve %24,60 oranında azalmıştır.
(Bada che vd., 2018)	HDP E	İnce agrega	%15, %30, %45 ve %60	<3,5 mm	0,5	Süperakışka nlaştırıcı	42	Sırasıyla %12,05, %24,10, %40,96 ve %50,60 oranında azalmıştır.
(Agra wal vd., 2024)	PE	İnce agrega	%5, %10, %15 ve %20	<5 mm	0,38	-	46	%5'te %6,52, %10'da %15,22 ve %15'te %41,30 oranında azalmıştır.
(Aatta che vd., 2013)	HDP E	İnce agrega	%2, %4 ve %6	<0,5 mm	0,45– 0,60	Süperakışka nlaştırıcı	37	%2'de %12 ve %4'te %4 oranında artmış, %6'da %12 oranında azalmıştır.
(Senh adji vd., 2019)	PVC	İnce agrega	%10, %30, %50 ve %70	0–4 mm	0,6	Süperakışka nlaştırıcı	38	Sırasıyla %5,26, %10,53, %21,05 ve %31,58 oranında azalmıştır.
(Rai vd., 2012)	PET	İnce agrega	%5, %10 ve %15	-	0,44	Süperakışka nlaştırıcı	42	Sırasıyla %2,38, %3,57 ve %4,76 oranında azalmıştır.
(Jadh av vd., 2022)	LDP E	İri agrega	%10 ve %20	-	-	-	69,85	Sırasıyla %45,81 ve %47,30 oranında azalmıştır.
(Hann awi vd., 2010)	PC	İnce agrega	%3, %10, %20 ve %50	1,6– 5 mm	0,5	-	52	%3'te %5,77, %10'da %11,54, %20'de %26,92 ve %50'de %63,46 oranında azalmıştır.

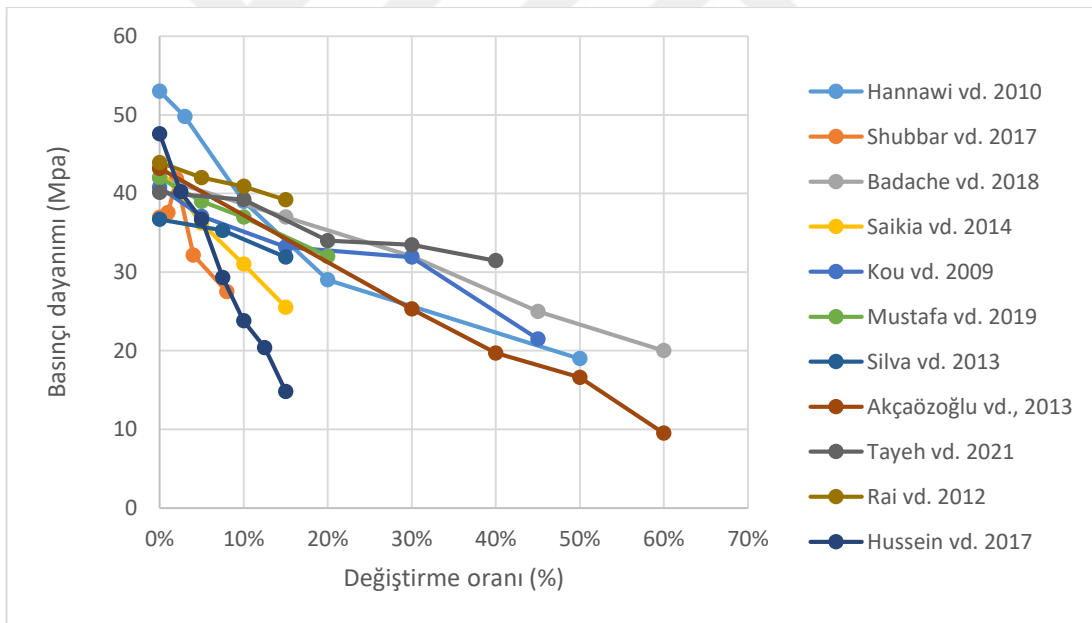
Çizelge 2.1.(devam). Önceki çalışmalarda elde edilen basınç dayanımı sonuçlarının özeti

(A.O. Sojobi, 2014)	LDP E	İnce agrega	%5, %10 ve %15	2 mm	0,5	-	30	Sırasıyla %16,67, %10 ve %33,33 oranında azalmıştır.
(Sadr momtazi vd., 2016)	PET	İnce agrega	%5, %10 ve %15	<4 mm	0,43	Silis dumanı ve uçucu kül	36,19	Sırasıyla %39,13, %44,06 ve %48,34 oranında azalmıştır.
(Colangelo vd., 2016)	PE and PP	İnce ve iri agrega	%10, %20 ve %30	<6 mm	0,6	Süperakışkanlaştırıcı	31	Sırasıyla %50,81, %61,86 ve %77,92 oranında azalmıştır.
(Dharmaraj ve Iyappan, 2016)	LDP E	İnce agrega	%5, %10, %15 ve %20	1-2 mm	0,48	-	23,56	Sırasıyla %1,53, %4,33, %9,64 ve %4,92 oranında artmıştır.
(Juki, Awan, Annas, Boon, Othman, binti Abdul Kadir, vd., 2013)	PET	İnce agrega	%25, %50 ve %75	0-5 mm	0,55	-	26,69	Sırasıyla %4,46, %23,67 ve %43,05 oranında azalmıştır.
(Islam vd., 2022)	PP	İri agrega	%10 ve %20	19 mm	0,35	Süperakışkanlaştırıcı	50	Sırasıyla %20 ve %21,8 oranında azalmıştır.
(Vivek vd., 2023)	LDP E	İnce agrega	%5, %10, %15 ve %20	2,36 mm	0,5	-	27,33	Sırasıyla %42,66, %52,4, %60,95 ve %71,93 oranında azalmıştır.

Şekil 2.2, plastik Agregaların farklı ikame oranları kullanılarak üretilen betonlarda 28 günlük basınç dayanımındaki değişimi göstermektedir (Adajar ve Ubay-Anongphouth, 2022; Akçaözoğlu vd., 2013; Almeshal vd., 2020; A.O. Sojobi and H.I. Owamah, 2014; Ashad vd., 2023; Basha vd., 2020; Belmokaddem vd., 2020; Blanco vd., 2020; Botchway vd., 2022; Habib vd., 2017; Hossain vd., 2016; Islam vd., 2016; Tamil

Selvi vd., 2021; Záleská vd., 2018). Literatürde yer alan çalışmalardan elde edilen referans beton numunelerinin basınç dayanımı yaklaşık olarak 17,76 MPa ile 50,20 MPa arasında değişmektedir. Az sayıda istisnai durum dışında, plastik atık oranı arttıkça betonun basınç dayanımının azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte, bazı çalışmalarda basınç dayanımında artış gözlenmiş olsa da bu artışın nedenleri ilgili araştırmalarda açık bir şekilde açıklanmamıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, beton karışımlarında %5 oranında plastik atık kullanılması durumunda basınç dayanımındaki ortalama azalma yaklaşık %11 olarak belirlenmiştir. Plastik atık oranı %20–30 aralığında olduğunda ise basınç dayanımındaki azalma yaklaşık %36 seviyesine ulaşmaktadır. Plastik atık oranının %50'ye çıkarılması durumunda ise basınç dayanımının ortalama olarak 0,29 seviyesine kadar önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, beton karışımlarında %20'den daha yüksek oranlarda plastik atık kullanımının betonun basınç taşıma kapasitesini önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir.



Şekil 2.2. Farklı plastik agrega ikame oranlarına bağlı olarak 28 günlük beton basınç dayanımındaki değişim.

2.2.2. Yarma çekme dayanımı

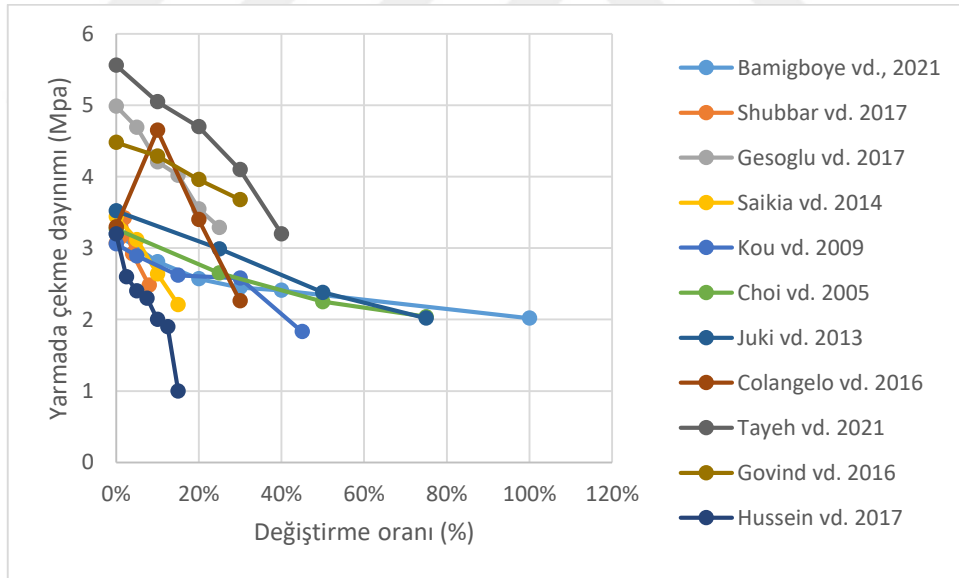
Yarmada çekme dayanımı, PAA'ın geleneksel beton bileşenlerinin yerine kullanıldığı durumlarda betonun kalite düzeyini değerlendirmek açısından önemli bir gösterge olarak kabul edilmektedir. Beton, gevrek yapısı nedeniyle doğal olarak düşük çekme dayanımına sahiptir ve bu durum çekme gerilmelerine maruz kaldığında çatlak oluşumunun kaçınılmaz olmasına neden olmaktadır. Yarmada çekme dayanımındaki değişim eğiliminin genel olarak eğilme dayanımı ile benzer bir davranış sergilediği görülmektedir (Bhardwaj ve Kumar, 2017). Önceki çalışmalarda elde edilen yarmada çekme dayanımı sonuçları Çizelge 2.2'te özetlenmiştir. Abu-Saleem vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, karışık geri dönüştürülmüş plastik içeren beton numunelerinde hem basınç dayanımının hem de yarmada çekme dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu dayanım kaybının, atık plastik yüzeyi ile çimento hamuru arasındaki bağ dayanımının zayıf olmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Basınç dayanımında gözlemlenen eğilime benzer şekilde, plastik Agregaların beton karışımına dahil edilmesiyle birlikte betonun çekme dayanımında da genel olarak bir azalma meydana gelmektedir. Bununla birlikte, basınç dayanımından farklı olarak, çekme dayanımı üzerinde parçacık boyutunun etkisi daha sınırlı kalmakta, bağ kalitesi daha belirleyici bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Bu bağ kalitesi ise plastik Agregaların şekli ve ikame oranı ile doğrudan ilişkilidir (Ferreira vd., 2012). Plastik agregaların şekli, yüzey dokusu ve ikame oranı, bu bağ kalitesini doğrudan etkileyen temel parametreler arasında yer almaktadır. Köşeli ve pürüzlü yüzeye sahip plastik parçacıkların çimento hamuru ile daha iyi mekanik kenetlenme sağladığı, buna karşılık düzgün ve yuvarlak yüzeyli plastiklerin aderans performansını olumsuz etkilediği bildirilmektedir. Ayrıca düşük oranlarda gerçekleştirilen plastik agrega ikamelerinde dayanım kayıplarının sınırlı kaldığı, ancak yüksek ikame oranlarında plastik agregaların beton içerisindeki süreksizlikleri artırarak çekme dayanımını önemli ölçüde düşürdüğü belirtilmektedir.

Bunun yanında, plastik agrega içeriğinin artmasıyla birlikte beton içerisindeki boşluk oranının yükseldiği ve mikro çatlak oluşumunun hızlandığı da ifade edilmektedir. Plastik agregaların düşük elastisite modülüne sahip olması nedeniyle yük altında deformasyon farklılıkları oluşmakta ve bu durum özellikle ara yüzey geçiş bölgesinde gerilme yoğunlaşmalarına neden olmaktadır.

Çizelge 2.2. Önceki çalışmalarda yarmada çekme dayanımına ilişkin elde edilen sonuçların özeti

Yazarlar	Plastik Türü	İkame Türü	İkame Oranı	Plastik Atık Boyutu	Su-Çimento Oranı	Katkı Maddeleri	Kontrol (MPa)	Sonuçlar
(Ali vd., 2023)	E-waste	İri agrega	%10, %15 ve %20	4,75–19 mm	0,4	Yok	4,5	%0 kontrol karışımına kıyasla %10'da %32,22, %15'te %33,33 ve %20'de %36,44 oranında azalmıştır.
(Choi vd., 2005)	PET	İnce agrega	%25, %50 ve %75	<4,75 mm	0,45	-	3,27	Kontrol karışımına kıyasla %25'te %18,96, %50'de %31,19 ve %75'te %37,61 oranında azalmıştır.
(Mohammed vd., 2019)	PVC	İnce agrega	%5, %15, %30, %45 ve %65	<4,75 mm	0,52	-	3,5	Kontrol karışımına göre %5'te %10, %15'te %2,29, %30'da %32,29, %45'te %37,43 ve %65'te %51,43 oranında azalmıştır.
(Kou vd., 2009)	PVC	İnce agrega	%5, %15, %30 ve %45	<5 mm	0,32	Süperakışkanlaştırıcı	3,5	Kontrol karışımına kıyasla %5'te %10,0, %15'te %17,2, %30'da %23,8 ve %45'te %34,6 oranında azalmıştır.
(Tayeh vd., 2021)	PET	İnce agrega	%10, %20, %30 ve %40	2–0,075 mm	0,51	Süperakışkanlaştırıcı	5,56	Sırasıyla %5,58, %7,73, %23,56 ve %25,00 oranında azalmıştır.
(Colangelo vd., 2016)	PE ve PP	İnce ve iri agrega	%10, %20 ve %30	<6 mm	0,6	Süperakışkanlaştırıcı	3,2	%10'da %76,92 ve %20'de %23,08 oranında artmış, %30'da %19,23 oranında azalmıştır.
(İpek vd., 2021)	LDP E	İri agrega	%10, %20, %30, %40 ve %50	4,5–9,5 mm	0,26–0,40	-	0,97	Agrega/çimento oranı 7 için %48, oran 6 için %60 azalma gözlenmiştir.
(Islam ve Shahjalal, 2021)	PP	İri agrega	%10, %20 ve %30	10–19 mm	0,55	-	2,05	%10'da %17,07, %20'de %2,44 ve %30'da %12,20 oranında artmıştır.

Şekil 2.3, farklı plastik agrega ikame oranlarına sahip betonlarda 28 günlük yarmada çekme dayanımındaki değişimi göstermektedir (Dharmaraj ve Iyappan, 2016; İpek vd., 2021; Islam vd., 2016; Islam ve Shahjalal, 2021; Kou vd., 2009; Mohammed vd., 2019; Rahim, Salehuddin, vd., 2013; Rai vd., 2012; Sojobi and Owamah, 2014; Suganthy vd., t.y.) Buna karşılık, Şekil 2.5’de (Bamigboye vd., 2021; Choi vd., 2005; Colangelo vd., 2016; Gesoglu vd., 2017; Govind vd., 2016; H. Hussein vd., 2017; Juki, Awang, Annas, Boon, Othman, Kadir, vd., 2013; Kou vd., 2009c; Saikia ve de Brito, 2014; Shubbar ve Al-Shadeedi, 2017; Tayeh vd., 2021) normalize edilmiş yarmada çekme dayanımı değerleri sunulmaktadır. Basınç dayanımında gözlemlenen eğilime benzer şekilde, çoğu durumda plastik atık oranı arttıkça yarmada çekme dayanımının azaldığı görülmektedir. Örneğin, Colangelo vd. (2016) plastik agrega ikame oranının %10 seviyesinde tutulduğu durumda çekme dayanımında belirli bir artış gözlemlemiştir. Araştırmacılar bu artışı, düşük miktarda kullanılan plastik agreganın lif benzeri bir davranış sergileyerek kırılma yüzeyleri arasında bir köprüleme etkisi oluşturmasına bağlamıştır.



Şekil 2.3. Farklı plastik agrega ikame oranlarına bağlı olarak 28 günlük beton yarmada çekme dayanımındaki değişim.

2.2.3. Eğilme dayanımı

Plastik atıkların beton içerisinde agrega olarak kullanılması, sürdürülebilirliğin artırılması ve atık yönetimi sorunlarının azaltılması potansiyeli nedeniyle son yıllarda önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Çizelge 2.3'te sunulan çeşitli çalışmalar, farklı plastik atık türlerinin betonun eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini incelemiş ve bu malzemelerin kullanımına ilişkin uygun koşullar hakkında önemli bilgiler sağlamıştır.

Abeyinghe vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen dikkat çekici bir çalışmada, geri dönüştürülmüş yüksek yoğunluklu polietilenin (HDPE) beton karışımlarında iri agreganın kısmi ikamesi olarak kullanımı araştırılmıştır. Bu çalışmada iri agreganın ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında değiştirilmesi incelenmiştir. Kullanılan HDPE Agregaların boyut aralığı 4–10 mm olarak belirlenmiştir. Araştırmacılar ayrıca beton performansını iyileştirmek amacıyla katkı maddesi olarak uçucu kül kullanmış ve su-çimento oranını 0,45 olarak sabit tutmuştur. Elde edilen eğilme dayanımı sonuçlarına göre, kontrol karışımı 5,2 MPa eğilme dayanımına ulaşırken, %10, %20 ve %30 HDPE ikame oranına sahip karışımlar sırasıyla 5,0 MPa, 4,8 MPa ve 4,5 MPa eğilme dayanımı göstermiştir. Bu sonuçlar, kontrol karışımına kıyasla sırasıyla %3,85, %7,69 ve %13,46 oranlarında bir azalmaya işaret etmektedir.

Bir diğer çalışmada Bahij vd. (2020), polietilen tereftalat (PET) atıklarının hem ince hem de iri Agregaların yerine kullanılmasını incelemiştir. Bu çalışmada ikame oranları %10, %20 ve %30 olarak belirlenmiştir. Kullanılan PET Agregaların boyut aralığı 1–10 mm arasında değişmektedir. Çalışmada herhangi bir ek katkı maddesi kullanılmamış ve su-çimento oranı 0,5 olarak belirlenmiştir. Kontrol karışımı 6,0 MPa eğilme dayanımı göstermiştir. Buna karşılık %10, %20 ve %30 PET içeren beton Karışımlarında eğilme dayanımı sırasıyla 5,8 MPa, 5,5 MPa ve 5,2 MPa olarak Ölçülmüştür. Bu değerler, kontrol karışımına kıyasla sırasıyla %3,33, %8,33 ve %13,33 oranlarında bir azalmayı göstermektedir.

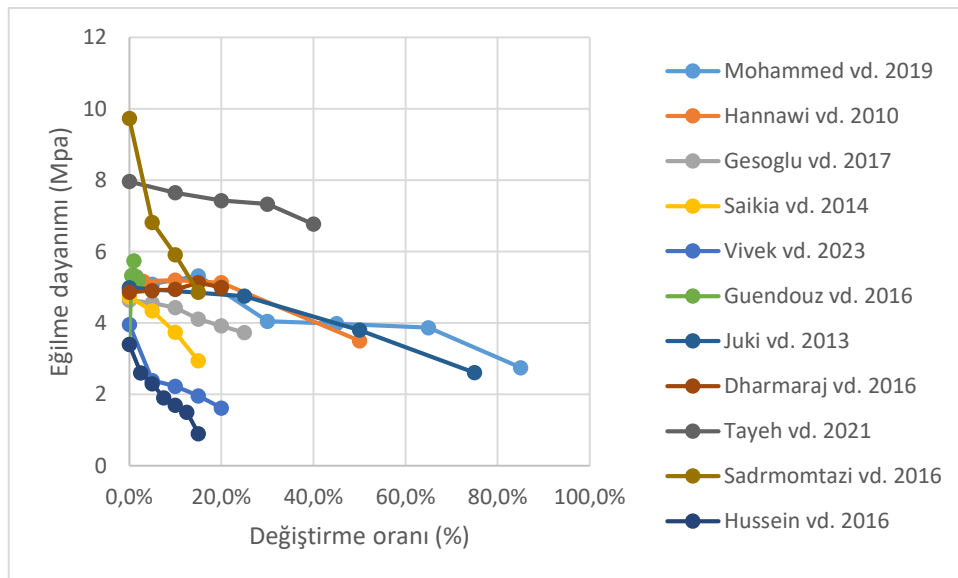
Çizelge 2.3. Önceki çalışmalarda eğilme dayanımına ilişkin elde edilen sonuçların özeti

Yazarlar	Plastik Türü	İkame Türü	İkame Oranı	Plastik Atık Boyutu	Su-Çimento Oranı	Katkı Maddeleri	Kontrol (MPa)	Sonuçlar
(Islam ve Shahjalal, 2021)	PP	İri agrega	% 10, %20 ve %30	<19 mm	0,45 ve 0,55	Süperakışkanlaştırıcı	5,8	%10'da %19,6 ve %20'de %6,6 oranında artmış, %30'da %20,5 oranında azalmıştır.
(Gravina vd., 2021)	HDP E	İri agrega	% 10 ve %20	1 mm	0,55	Süperakışkanlaştırıcı	4,5	%10'da %2 ve %20'de %15 oranında azalmıştır.
(Dharmaraj ve Iyappan, 2016)	LDP E	İnce agrega	%5, %10, %15 ve %20	1–1,15 mm	0,48	-	4,85	Kontrol karışımına göre %5'te %1,24, %10'da %1,65, %15'te %5,77 ve %20'de %1,44 oranında artmıştır.
(Rai vd., 2012)	PET	İnce agrega	%5, %10 ve %15	5–20 mm	0,44	Süperakışkanlaştırıcı	5,25	Kontrol karışımına kıyasla %5'te %22,86, %10'da %34,29 ve %15'te %40 oranında azalmıştır.
(Agrawal vd., 2024)	PE	İnce agrega	%5, %10, %15 ve %20	<5 mm	0,38	-	4,9	Kontrol karışımına göre %5'te %14,08, %10'da %41,84, %15'te %68,57 ve %20'de %80,82 oranında azalmıştır.

Çizelge 2.3. (devam). Önceki çalışmalarda eğilme dayanımına ilişkin elde edilen sonuçların özeti

(Sadr momtazi vd., 2016)	PET	İnce agrega	%5, %10 ve %15	<4 mm	0,43	Silis dumanı ve uçucu kül	9,73	Sırasıyla %29,91, %39,26 ve %49,02 oranında azalmıştır.
(Juki vd., 2013)	PET	İnce agrega	%25, %50 ve %75	0-5 mm	0,55	-	4,99	Sırasıyla %4,81, %23,85 ve %47,70 oranında azalmıştır.
(Tami I Selvi vd., 2021)	HDP E	İri agrega	%1, %2, %3, %4 ve %5	>4,7 5 mm	-	-	5,25	%1'de %1,52, %2'de %15,05, %3'te %25,71 ve %4'te %7,05 oranında artmış, %5'te %15,24 oranında azalmıştır.

Şekil 2.4 farklı kaynaklardan (Dharmaraj ve Iyappan, 2016; Gesoglu vd., 2017; Guendouz, Debieb, Kadri, vd., 2016; H. Hussein vd., 2017; Hannawi vd., 2010; Juki, vd., 2013; Mohammed vd., 2019; Sadrmomtazi vd., 2016; Saikia ve de Brito, 2014; Tayeh vd., 2021; Vivek vd., 2023) elde edilen veriler kullanılarak farklı plastik agrega ikame oranlarına bağlı olarak 28 günlük beton eğilme dayanımındaki değişimi göstermektedir.



Şekil 2.4. Farklı plastik agrega ikame oranlarına bağlı olarak 28 günlük beton eğilme dayanımındaki değişim.

2.3. Hafif Beton ve Donatılı Beton Kiriş Davranışı

Hafif agregaların, betonun birim ağırlığını azaltmak amacıyla geleneksel normal ağırlıklı Agregaların kısmen veya tamamen yerine kullanılmaktadır. Betonun birim ağırlığındaki azalmanın başlıca nedenlerinden biri, bu Agregaların yüksek iç gözenekliliğe ve düşük görünür yoğunluğa sahip olmasıdır. Geleneksel olarak pomza ve diatomit gibi doğal hafif agregaların ile geliştirilmiş perlit, şeyle ve arduaz gibi yapay hafif agregaların, yapısal ve yapısal olmayan hafif beton üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. (Akçaözoğlu vd., 2010).

Pomza taşı, dünyanın birçok bölgesinde bulunan volkanik kökenli bir kaya türüdür. Pomza taşı hem oldukça hafif hem de yeterli dayanım özelliklerine sahip olması nedeniyle hafif beton üretiminde kullanılan doğal hafif agregalarından biridir. Bu malzemenin hafifliği, yer kabuğunun derinliklerinden yüzeye çıkan erimiş lav içerisindeki gazların püskürme sırasında dışarı kaçması sonucunda oluşan gözenekli yapısından kaynaklanmaktadır. Sahip olduğu fiziksel özellikler nedeniyle pomza taşı, hafif bir kaya malzemesi olarak oldukça yaygın şekilde kullanılmakta ve yüzyıllardır dünya genelinde inşaat sektöründe önemli bir yapı malzemesi olarak değerlendirilmektedir (Mohan vd., 2020).

Karthika vd. (2021) geleneksel beton ile pomza agregalı hafif betonun (LWC) mekanik ve dayanıklılık özelliklerini değerlendirmek ve karşılaştırmak amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı deneylerinden elde edilen sonuçlar, iri agreganın %50 oranında pomza ile değiştirilmesinin en uygun performansı sağladığını göstermiştir. Son yıllarda yapılan çalışmalar ayrıca polimer esaslı atık malzemelerin beton içerisinde ince agrega olarak kullanımını incelemiş ve bu malzemelerin işlenebilirlik ile mekanik performans üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Elde edilen bulgular, plastik atık kullanımının etkinliğinin büyük ölçüde kullanılan polimer türüne ve ikame oranına bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Plastik parçacıklarının düşük rijitliğe ve pürüzsüz yüzey dokusuna sahip olması nedeniyle yüksek ikame oranları, dayanım gelişimini ve çimento matrisi ile agregaların arasındaki bağ oluşumunu olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle kabul edilebilir performansın korunabilmesi için önerilen ikame oranları genellikle düşük seviyelerde tutulmaktadır. Hafif ve sürdürülebilir beton üretimi için önerilen maksimum kullanım oranları yaklaşık olarak PET için %5, PP için %10, geliştirilmiş polistiren

(EPS) için %10 ve eritilmiş kırılmış plastik ince agregaların için yaklaşık %6 olarak belirtilmektedir (Sanusi vd., 2026).

Geri dönüştürülmüş plastik Agregaların (GDPA) doğal Agregaların kısmi veya tam ikamesi olarak kullanılması, plastik atıkların bertaraf edilmesi sorununa çözüm bulmak ve doğal agrega kaynaklarını korumak amacıyla araştırılan önemli bir yöntemdir. İlgili çalışmada beton karışımları; granül, pul ve lif formunda üç farklı geri dönüştürülmüş plastik kullanılarak %25, %50, %75 ve %100 ikame oranlarında hazırlanmış ve su/çimento oranı 0,40 ve 0,45 olarak belirlenmiştir.

Her iki su/çimento oranı için de plastik agrega oranı arttıkça basınç dayanımının kademeli olarak azaldığı görülmüştür. Su/çimento oranı 0,40 olan karışımlarda %25 ikame oranında basınç dayanımı yaklaşık 22–35 MPa aralığında iken, %75 ikame oranında yaklaşık 17–19 MPa seviyelerine düşmüş ve %100 ikame durumunda çok düşük dayanım değerleri elde edilmiştir. Benzer bir eğilim su/çimento oranı 0,45 olan karışımlarda da gözlenmiş ve dayanım değerleri %25 ikame oranında yaklaşık 20–27 MPa aralığından %75 ikame oranında yaklaşık 13–19 MPa seviyelerine düşmüştür. Eğilme dayanımı da plastik agrega oranı arttıkça benzer şekilde azalma eğilimi göstermiştir. %25 ikame oranında eğilme dayanımı değerleri yaklaşık 4,0–4,9 MPa ile geleneksel betona yakın seviyelerde iken, %50–75 ikame oranlarında yaklaşık 3,0–3,8 MPa seviyelerine düşmüş ve %100 ikame durumunda önemli ölçüde azalmıştır. Genel olarak granül formundaki plastik Agregaların, aynı ikame oranlarında pul ve lif formundaki plastik agregalarına kıyasla daha yüksek basınç ve eğilme dayanımı sağladığı belirlenmiştir. Bu bulgular, yüksek GDPA içeriklerinin mekanik performansını önemli ölçüde azalttığını; ancak sınırlı ikame oranlarının (\leq %25–50) düşük veya orta dayanımlı ya da hafif beton uygulamaları için uygun olabileceğini göstermektedir (Basha vd., 2020).

Agrega ikamesine ek olarak, hafif betonun özellikle yüksek sıcaklık koşulları altındaki mekanik performansını artırmak amacıyla lif kullanımı da araştırılmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen bir çalışmada, lif türü, lif uzunluğu ve kullanım oranının hafif beton karışımlarının yüksek sıcaklık davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada polipropilen (PP), poliamid ve cam lifleri hacimce %0, %0,25, %0,5 ve %0,75 oranlarında kullanılmış; PP liflerinin uzunlukları ise 3, 6 ve 12 mm olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, cam lif takviyeli karışımların 300 °C sıcaklıkta basınç dayanımını daha iyi koruduğunu, PP lif takviyeli karışımların ise 600 °C sıcaklıkta daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu durum, farklı lif türlerinin etkinliğinin sıcaklığa bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Yüksek sıcaklık direnci açısından

optimum lif oranı %0,25 olarak belirlenmiştir. Karışımlar, 0–5 mm boyut aralığında kırılmış kireçtaşı ince agregası ve 5–15 mm boyut aralığında pomza iri agregası kullanılarak hazırlanmış; optimum agrega hacim oranı ise %57 ince agrega ve %43 iri agrega olarak belirlenmiştir. PP lif takviyeli karışımların basınç dayanımı sonuçları sıcaklık seviyelerine göre karşılaştırıldığında; 25 °C’de (referans: 23,27 MPa) –%29 ile +%19 arasında, 300 °C’de (referans: 21,35 MPa) –%35 ile +%23 arasında, 600 °C’de (referans: 13,13 MPa) –%15 ile +%50 arasında ve 900 °C’de (referans: 4,22 MPa) –%30 ile +%4 arasında değişen dayanım değerleri elde edilmiştir. Bu bulgular, PP liflerinin özellikle orta seviyedeki sıcaklıklarda artık basınç dayanımını önemli ölçüde artırabildiğini göstermektedir. (Beytekin vd., 2025).

Bir başka çalışmada mikro polipropilen (mikro-PP) ve makro polipropilen (makro-PP) liflerin yapısal hafif betonun (SLWC) mekanik performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada 40 mm uzunluğundaki makro-PP lifleri tek başına veya 12 mm uzunluğundaki mikro-PP lifleri ile hibrit formda kullanılmış ve toplam lif hacim oranları %0,3 ve %0,6 olarak belirlenmiştir. 28 günlük deney sonuçlarına göre, %0,3 makro-PP lif içeren karışım yaklaşık 26,41 MPa basınç dayanımına ulaşmış ve bu değer kontrol betonunun (24,48 MPa) dayanımına oldukça yakın bulunmuştur. Makro-PP lif oranının %0,6’ya çıkarılması durumunda ise liflerin kümelenmesi ve boşluk oranının artması nedeniyle basınç dayanımı yaklaşık 22,11 MPa seviyesine düşmüştür. Hibrit lif sistemi bu davranışı iyileştirmiş ve %0,3 hibrit lif içeren karışım lif takviyeli betonlar arasında en yüksek basınç dayanımını (26,78 MPa) göstermiştir. %0,6 hibrit karışımın basınç dayanımı ise yaklaşık 23,37 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, özellikle hibrit lif kullanımında %0,3 lif oranının lif takviyesi ile basınç dayanımı gelişimi arasında uygun bir denge sağladığını göstermektedir. Buna karşılık lif kullanımı yarmada çekme dayanımını genellikle artırmaktadır. 28 günlük deney sonuçlarında kontrol karışımının yarmada çekme dayanımı 1,78 MPa iken, %0,3 makro-PP lif içeren karışımında bu değer 2,29 MPa’a ve %0,3 hibrit lif içeren karışımında 3,44 MPa’a yükselmiştir. Lif oranı %0,6 olduğunda da artış devam etmiş ve yarmada çekme dayanımı makro-PP lifler için 2,38 MPa, hibrit lif karışımı için ise maksimum 3,61 MPa olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, özellikle hibrit formda kullanılan PP liflerinin 28 günlük SLWC karışımlarında çekme performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir (Akbulut vd., 2024).

Plastik atık türleri, yoğunlukları ve kullanım alanlarına ilişkin bilgiler Çizelge 2.4’te sunulmuştur (Kumar vd., 2020).

Çizelge 2.4. Plastik atık türleri ve kaynakları

Plastik Türü	Yoğunluk (g/cm ³)	Kaynağı / Kullanım Alanı
PET-(Polietilen Tereftalat)	1,38–1,39	Meşrubat şişeleri, su şişeleri vb.
PP-(Polipropilen)	0,89–0,91	Mikrodalga kapları, bisküvi paketleri, deterjan paketleri vb.
PS-(Polistiren)	1,04–1,11	Şişe kapakları, yumurta kutuları, CD kutuları, tek kullanımlık ürünler, cetveller, şekillendirilmiş polistiren: gıda tepsileri vb.
HDPE – (Yüksek Yoğunluklu Polietilen)	0,93–0,97	Taşıma poşetleri, ev eşyaları, şişe kapakları vb.
LDPE – (Düşük Yoğunluklu Polietilen)	0,91–0,94	Taşıma poşetleri, süt poşetleri, çuvalar, kozmetik ve deterjan şişeleri vb.
PVC – (Polivinil Klorür)	1,20–1,45	Kredi kartları, gıda ambalajı (streç film), pencere profilleri, tıbbi ekipman vb.

Donatılı beton kirişler, eğilme ve kesme kuvvetlerine karşı direnç gösterebilmek için yetenekleri sayesinde modern yapıların en önemli taşıyıcı elemanları arasında yer almaktadır. Bununla birlikte beton doğası gereği gevrek bir malzeme olup çekme dayanımı nispeten düşüktür. Bu nedenle beton elemanlar eğilme gerilmelerine maruz kaldığında çatlak oluşumu kaçınılmazdır. Bu sınırlamayı gidermek amacıyla beton içerisine çelik donatı yerleştirilerek çekme dayanımı ve süneklik artırılmaktadır. Donatılı beton kirişlerin yapısal davranışı genel olarak beton dayanımı, donatı oranı, etriye aralığı ve agrega özellikleri gibi birçok faktöre bağlıdır. Önceki deneysel çalışmalar, malzeme bileşimi ve donatı detaylandırmasındaki değişimlerin donatılı beton kirişlerin yük taşıma kapasitesi, çatlak yayılımı, rijitliği ve sünekliği üzerinde önemli etkiler oluşturduğunu göstermektedir (Özkılıç vd., 2023).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada plastik atık, beton karışımlarında kısmi ikame malzemesi olarak farklı oranlarda kullanılmıştır. Betonun mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla küp, silindir ve prizma gibi standart numuneler %0, %1, %3, %5, %10, %15, %20, %25, %30, %40 ve %50 plastik atık ikame oranları ile hazırlanmıştır. Bu numuneler betonun temel mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla test edilmiştir. Yapısal davranışın incelenmesi kapsamında ise donatılı beton kiriş numuneleri, tüm ikame oranları yerine seçilmiş oranlarda hazırlanmış olup bu oranlar %0, %5, %10, %20 ve %30 olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşım sayesinde plastik atık kullanımının hem betonun malzeme özellikleri hem de donatılı beton kirişlerin yapısal performansı üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir.

3.1. Beton Numuneleri

Bu çalışmada, plastik atık katkılı betonun mekanik davranışını incelemek amacıyla farklı karışım oranlarına sahip beton numuneleri hazırlanmıştır. Deney programı kapsamında küp numuneler ve farklı sıcaklık koşulları altında test edilmiştir. Numunelerin hazırlanması, karışım oranları ve deney prosedürleri aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

3.1.1. Kullanılan malzemeler ve özellikleri

Bu çalışmada beton üretiminde çimento, su, pomza agregası ve plastik atık malzemeleri kullanılmıştır. Kullanılan tüm malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri ilgili standartlara uygun olarak belirlenmiş ve beton karışım tasarımında dikkate alınmıştır. Çalışmada kullanılan malzemeler ve özellikleri aşağıdaki alt başlıklarda ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

3.1.1.1. Çimento

Bu deneysel çalışmada bağlayıcı malzeme olarak 32,5 dayanım sınıfına sahip puzolanik çimento kullanılmıştır. Puzolanik çimentolar, klinkere ek olarak puzolanik katkı maddeleri içermeleri nedeniyle özellikle dayanıklılık, geçirimsizlik ve uzun dönem performans açısından avantaj sağlamaktadır. Çimentonun özgül ağırlığı 3,05 olarak belirlenmiş olup, bu değer literatürde bildirilen tipik puzolanik çimento aralığı ile uyumludur.

Çimentonun fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla özgül ağırlık, incelik, standart kıvam, priz süresi ve genleşme (hacim sabitliği) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler, TS EN 197-1 standardında belirtilen esaslara uygun olarak yapılmıştır. Bu standart, çimentonun beton üretiminde kullanılabilirliğini ve performansını güvence altına almak amacıyla gerekli sınır değerleri ve deney yöntemlerini tanımlamaktadır. Çimentonun standartlara uygunluğu, elde edilen deneysel sonuçların güvenilirliği ve tekrarlanabilirliği açısından büyük önem taşımaktadır (Ali O. Demirbaşı vd., 2024; Neville, 1995).

3.1.1.2. İri agreg

Agregaların, betonun hacimsel olarak en büyük bileşenini oluşturmakta olup, betonun mekanik özellikleri, dayanıklılığı ve ekonomik performansı üzerinde belirleyici bir role sahiptir. Agregaların sınıflandırılmasında, 4,75 mm elek açıklığı temel sınır değeri olarak kabul edilmektedir. Bu sınıra göre, 4,75 mm'den büyük tane çapına sahip agregaların iri agreg, daha küçük tane çapına sahip olanlar ise ince agreg olarak tanımlanmaktadır.

Bu çalışmada iri agreg olarak 5–13 mm tane boyut aralığında hafif agreg kullanılmıştır. Bu tane boyutu aralığı, betonun homojenliğini artırmak, boşluk oranını azaltmak ve yeterli mekanik dayanım elde etmek amacıyla tercih edilmiştir. İri agregaların, betonun ana yük taşıyıcı iskeletini oluşturmakta ve basınç dayanımının gelişiminde önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, iri Agregaların tane şekli, yüzey pürüzlülüğü ve granülometrik dağılımı, çimento hamuru ile aderansı doğrudan etkileyerek betonun dayanım ve çatlak davranışını belirlemektedir (Celik vd., 2014).

3.1.1.3. İnce agreg

Beton hacminin yaklaşık %60–75'ini agregaların oluşturduğundan, agreg özellikleri betonun mekanik ve fiziksel performansı üzerinde doğrudan etkilidir. İnce agreg, iri agregaların arasındaki boşlukları doldurarak betonun daha yoğun ve kompakt bir yapı kazanmasını sağlamaktadır. Bu durum, hafif betonun işlenebilirliği, dayanımı ve dayanıklılığı açısından büyük önem taşımaktadır.

İnce agregaların, tane çapı 4,75 mm'den küçük olan malzemeler olarak tanımlanmakta olup, bu çalışmada 0–4 mm tane boyut aralığında hafif ince agreg kullanılmıştır. İnce agreganın tane dağılımı ve yüzey özellikleri, çimento hamuru ile

etkileşimini belirleyerek hafif betonun işlenebilirliğini ve erken yaş dayanımlarını etkilemektedir. Uygun granülometrik dağılıma sahip ince agregaların, daha düşük boşluk oranı ve daha iyi bir hamur-agrega aderansı sağlayarak hafif betonun mekanik performansını iyileştirmektedir. Bu nedenle, ince agreganın seçimi hafif beton karışım tasarımında kritik bir parametre olarak değerlendirilmektedir (Rahmani vd., 2013).

3.1.1.4. Su

Su, hafif beton üretiminde vazgeçilmez bir bileşen olup çimentonun hidrasyon reaksiyonlarını başlatan ve sürdüren temel unsurdur. Hidrasyon süreci sonucunda oluşan bağlayıcı ürünler, çimento ile agrega taneleri arasında bağlanmayı sağlayarak hafif betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini belirlemektedir. Bu nedenle, hafif beton karışımında kullanılan suyun hem miktarı hem de kalitesi büyük önem taşımaktadır.

Hafif beton karışımında kullanılan su miktarının artması, işlenebilirliği artırmakla birlikte sertleşmiş hafif beton bünyesinde kapiler boşlukların oluşmasına neden olmaktadır. Bu boşluklar, hafif betonun basınç, çekme ve eğilme dayanımlarında azalmaya yol açmakta ve aynı zamanda dayanıklılık performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, hafif beton karışımlarında su/çimento oranı dikkatle kontrol edilmelidir. Kullanılan suyun zararlı tuzlar ve organik maddeler içermemesi ve TS EN 1008 standardında belirtilen şartları sağlaması gerekmektedir.

3.1.1.5. Plastik

Bu çalışmada, hafif beton karışımlarında ince agrega yerine kullanılmak üzere plastik atıklar kullanılmıştır. Söz konusu plastik atıklar, un, şeker ve pirinç gibi gıda ürünlerinin ambalajlanmasında kullanılan torbalardan elde edilmiştir. Deneylerde kullanılan plastik atıkların kesilmiş hâline ait görsel örnekler Şekil 3.1’de sunulmaktadır.

Hafif beton karışımında kullanılmadan önce plastik atıklar, yüzeylerindeki toz ve kirin giderilmesi amacıyla temiz su ile yıkanmış ve laboratuvar ortamında doğal olarak kurutulmuştur. Kurutma işlemini takiben plastikler mekanik yöntemlerle şeritler hâline getirilmiştir.

Plastik atıkların boyut dağılımını belirlemek amacıyla toplam 150 adet parça rastgele seçilmiş, uzunlukları ölçülerek 1–5 mm, 5–10 mm, 10–20 mm, 20–40 mm ve 40–80 mm aralıklarında sınıflandırılmıştır. Elde edilen dağılım sonuçları ilgili çizelge ve şekilde sunulmuştur.

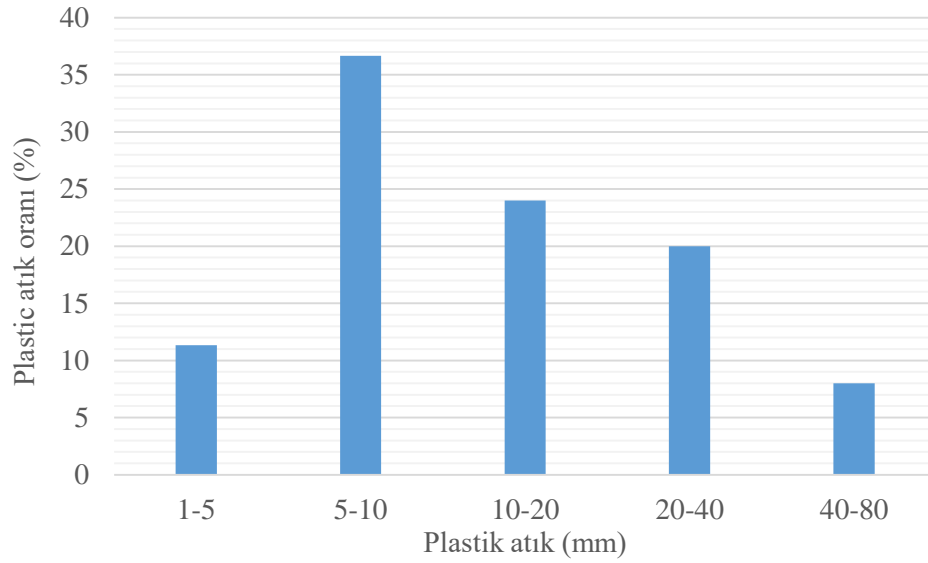
Hazırlanan plastik şeritler, hafif beton karışımlarında ince agreganın hacimsel olarak farklı oranlarda ikamesi şeklinde kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan kesilmiş plastik atıkların genel görünümü ve boyutlarının gösterimi

Plastik atıkların boyut dağılımı Şekil 4.8’de gösterildiği üzere, parçaların büyük bir kısmının 5–10 mm aralığında yoğunlaştığı (%36,67) görülmektedir. Bu aralığı sırasıyla 10–20 mm (%24,00) ve 20–40 mm (%20,00) boyut grupları takip etmektedir. Daha küçük boyutlu parçaların (1–5 mm) oranı %11,33 olarak belirlenirken, en büyük boyut aralığı olan 40–80 mm’deki parçaların oranı %8,00 seviyesinde kalmıştır. Bu sonuçlar, deneylerde kullanılan plastik atıkların ağırlıklı olarak orta boyutlu parçalardan oluştuğunu göstermektedir.

Bu durum, orta boyutlu plastik parçaların beton matrisi içerisinde daha dengeli bir dağılım sağlayabileceğini ve karışımın homojenliğini olumlu yönde etkileyebileceğini düşündürmektedir. Buna karşılık, daha küçük boyutlu parçaların dolgu etkisi oluşturabileceği, daha büyük boyutlu parçaların ise beton içerisinde süreksizlik oluşturma potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmektedir. Özellikle büyük boyutlu plastik parçaların çimento hamuru ile aderansının sınırlı olması nedeniyle, bu tür parçaların betonun mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etki oluşturabileceği literatürde de belirtilmektedir. Bu bağlamda, elde edilen boyut dağılımının plastik atıkların hafif beton içerisindeki davranışı üzerinde önemli bir parametre olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.2. Plastik atıkların boyut aralıklarına göre yüzde dağılımı

3.1.1.6. Karışım tasarımı

Bu çalışmada hafif beton karışımları, tüm deney gruplarında karşılaştırılabilir sonuçlar elde edebilmek amacıyla sabit bağlayıcı ve su içeriği esas alınarak hazırlanmıştır. Bu kapsamda, tüm hafif beton karışımlarında çimento miktarı 20 kg ve su miktarı 10 kg olarak sabit tutulmuştur. Su/çimento oranının sabitlenmesi, plastik atık ilavesinin hafif betonun taze ve sertleşmiş hâl özellikleri üzerindeki etkilerinin daha net bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Deney programında kullanılan beton karışımlarının oranları ve bileşen miktarları ayrıntılı olarak Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

İri agregası (CA) miktarı tüm karışımlar için 8 kg olarak sabit tutulurken, ince agregası (FA) miktarı plastik atık şeritlerin ilavesine bağlı olarak kademeli olarak azaltılmıştır. Bu yaklaşım, plastik atıkların ince agregası yerine kullanımının hafif beton performansı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla tercih edilmiştir. Plastik atıkların düşük yoğunluğa sahip olması nedeniyle, ikame işlemi ağırlık esasına göre değil, hacimsel esaslara dayalı olarak gerçekleştirilmiştir.

Plastik atık içermeyen referans karışım (REF), kontrol numunesi olarak hazırlanmış ve diğer tüm karışımların değerlendirilmesinde temel karşılaştırma noktası olarak kullanılmıştır. Plastik atık şeritlerin ikame oranları düşük seviyeden başlayarak kademeli biçimde artırılmıştır. Bu kapsamda plastik miktarı 0,00 kg’dan 0,50 kg’a kadar yükseltilmiş, buna karşılık ince agregası miktarı aynı hacim oranında azaltılarak karışım

dengesi korunmuştur. Deneysel çalışmada kullanılan iri pomza agregası, ince pomza agregası ve kesilmiş plastik atıkların genel görünümü Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Beton karışımlarında kullanılan kaba agrega, ince agrega ve plastik atık

Çizelge 3.1. Beton karışım oranları

P.A.A oranı (%)	Çimento (kg)	Su (kg)	İnce agrega (kg)	İri agrega (kg)	Plastik (kg)
0	20	10	10	8	0,00
1	20	10	9,9	8	0,01
3	20	10	9,7	8	0,03
5	20	10	9,5	8	0,05
10	20	10	9	8	0,10
15	20	10	8,5	8	0,15
20	20	10	8	8	0,20
25	20	10	7,5	8	0,25
30	20	10	7	8	0,30
40	20	10	6	8	0,40
50	20	10	5	8	0,50

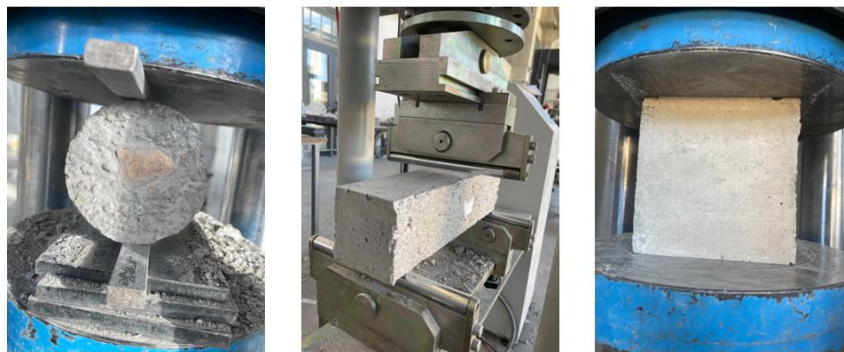
3.1.1.7. Numunelerin hazırlanması

Bu çalışmada, hafif betonun farklı mekanik özelliklerini değerlendirebilmek amacıyla üç farklı geometrik formda deney numuneleri hazırlanmıştır. Bu kapsamda, küp (15 × 15 × 15 cm), prizma (10 × 10 × 40 cm) ve silindir (10 × 20 cm) olmak üzere üç farklı numune tipi üretilmiştir. Tüm numuneler, her bir karışım için tek bir hafif beton partisinden elde edilerek karışım içi homojenliğin sağlanması ve deney sonuçlarının karşılaştırılabilirliğinin artırılması hedeflenmiştir.

Plastik atıklar, hafif beton karışımlarına numune başına %1 ile %50 arasında değişen dozajlarda ilave edilmiştir. Plastik atıkların dozaj aralığı, düşük ve yüksek ikame seviyelerinin hafif betonun taze ve sertleşmiş hâl özellikleri üzerindeki etkilerini sistematik olarak incelemek amacıyla belirlenmiştir. Liflerin karışım içerisinde homojen bir şekilde dağılabilmesi için, hafif beton dökümü öncesinde karışım süresi dikkatle kontrol edilmiş ve lif topaklanmasını önleyecek şekilde karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler, Şekil 3.3'te gösterildiği üzere ilgili kalıplara yerleştirilmiştir.

Numune üretiminde, hafif beton dökümünün ardından uygun sıkıştırma işlemleri uygulanarak kalıp içerisinde hava boşluklarının minimize edilmesi sağlanmıştır. Kalıplara yerleştirilen hafif beton, ilk priz sürecini tamamlamaları için laboratuvar ortam koşullarında bekletilmiş ve ardından kalıplarından çıkarılmıştır.

Küp numuneler, basınç dayanımı deneyleri öncesinde 28 gün boyunca standart kür koşullarında bekletilmiştir. Uygulanan kür yöntemleri ve numune hazırlama süreci, ilgili standartlarda belirtilen genel esaslara uygun olarak gerçekleştirilmiş olup elde edilen deney sonuçlarının güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini sağlamayı amaçlamaktadır.



Şekil 3.4. Basınç, yarmada çekme ve eğilme deney düzenekleri

3.2. Donatılı Beton Kirişler

Bu bölümde donatılı beton kirişlerin yapısal özellikleri, mekanik davranışları ve çalışmada kullanılan deneysel parametrelere ilişkin genel bilgiler sunulmaktadır.

3.2.1. Beton karışım tasarımı

Bu çalışmada kullanılan hafif beton karışımları, hedeflenen mekanik özellikleri elde etmek amacıyla tasarlanmıştır. Karışım tasarımı yapılırken çimento, pomza agregası, plastik atık ve su oranları dikkate alınmıştır. Pomza agregası hafif agrega olarak kullanılmış ve doğal agreganın yerine tamamen ikame edilmiştir. Plastik atık ise pomza ince agregasının belirli oranlarda yerine kullanılacak şekilde hazırlanmıştır.

Karışım oranları belirlenirken hafif betonun işlenebilirliği, dayanım özellikleri ve karışımın homojenliği göz önünde bulundurulmuştur. Hafif beton karışımları laboratuvar ortamında hazırlanmış ve karıştırma işlemi sırasında tüm bileşenlerin eşit şekilde dağılması sağlanmıştır. Karışım işlemi tamamlandıktan sonra taze hafif beton numuneleri farklı deneyler için kalıplara yerleştirilmiştir.

Hazırlanan küp numuneleri hafif betonun basınç dayanımını belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Numuneler, farklı sıcaklık koşullarının hafif beton üzerindeki etkisini incelemek amacıyla oda sıcaklığı, 150°C, 300°C, 450°C ve 600°C sıcaklık seviyelerine maruz bırakılmıştır. Daha sonra numuneler basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak sıcaklığın hafif beton dayanımı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Karışımlarda plastik atık oranı %0, %5, %10, %20 ve %30 olarak değiştirilmiştir. Çimento ve su miktarları tüm karışımlarda sabit tutulurken, plastik oranı arttıkça ince pomza agregası miktarı azaltılmıştır. Bu düzenleme, plastik atığın ince agreganın yerine kısmi ikame olarak kullanılmasının hafif beton özelliklerine etkisini incelemek amacıyla yapılmıştır.

Çizelge 3.2. Plastik atık ikame oranına göre hazırlanan numune sayıları ve uygulanan sıcaklık koşulları

P.A.A. Oranı (%)	Kiriş Numuneleri (Adet)	Küp Numuneleri (Adet)	Sıcaklık Koşulu (°C)
0	5	2	24, 150, 300, 450 ve 600
5	5	2	24, 150, 300, 450 ve 600
10	5	2	24, 150, 300, 450 ve 600
20	5	2	24, 150, 300, 450 ve 600
30	5	2	24, 150, 300, 450 ve 600

Bu Çizelge 3.2'de, çalışmada kullanılan karışım gruplarını, plastik atık ikame oranlarını, hazırlanan giriş ve küp numune sayılarını ve numunelerin maruz bırakıldığı sıcaklık seviyelerini göstermektedir. Her karışım için belirli sayıda giriş ve küp numune

hazırlanmış ve hafif betonun yüksek sıcaklıktaki davranışını incelemek amacıyla farklı sıcaklık koşullarında test edilmiştir.

Çizelge 3.3. Eğilme numunelerinin donatı detayları ve maruz kaldıkları sıcaklık koşulları.

No	Adı	Numune Sayısı	Basınç Donatısı	Çekme Donatısı	^a ρ	Sıcaklık
1	G1_T20	5	2 ϕ 8	2 ϕ 10	0,0121	24°C (Oda sıcaklığı)
2	G2_T150	5	2 ϕ 8	2 ϕ 10	0,0121	150°C
3	G3_T300	5	2 ϕ 8	2 ϕ 10	0,0121	300°C
4	G4_T450	5	2 ϕ 8	2 ϕ 10	0,0121	450°C
5	G5_T600	5	2 ϕ 8	2 ϕ 10	0,0121	600°C

^a ρ çekme donatısı oranıdır (A_s/b_w*d).

Bu Çizelge 3.3'te, eğilme numunelerinin donatı düzeni ve maruz kaldıkları sıcaklık koşulları özetlenmiştir. Tüm numunelerde basınç bölgesinde 2 ϕ 8, çekme bölgesinde ise 2 ϕ 10 donatı kullanılmış olup etriyeler ϕ 8 mm olarak seçilmiştir. Bu nedenle, çekme donatı oranı (ρ) tüm numuneler için sabit kalmıştır. Numuneler arasındaki temel fark, uygulanan sıcaklık seviyeleridir. Böylece, sıcaklığın hafif betonun mekanik davranışı üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

3.2.1. Deney numuneleri

Bu çalışmada hafif betonun mekanik özelliklerini ve hafif betonarme kirişlerin yapısal davranışını incelemek amacıyla küp ve kiriş numuneleri hazırlanmıştır. Küp numuneleri hafif betonun basınç dayanımını belirlemek amacıyla kullanılmış, kiriş numuneleri ise hafif betonarme elemanların eğilme davranışını incelemek amacıyla test edilmiştir. Numuneler laboratuvar ortamında hazırlanmış ve deney öncesinde uygun koşullarda bekletilmiştir. Deney programında kullanılan küp kalıpları ve donatılı kiriş kalıplarının genel görünümü Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Betonarme kiriş numuneleri için hazırlanan donatı kafeslerinin kalıplara yerleştirilmesi ve küp kalıpları

3.2.1.1. Küp numuneleri

Küp numuneleri hafif betonun basınç dayanımı deneyleri ilgili standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Taze hafif beton, standart küp kalıplara yerleştirilmiş ve hafif betonun homojen şekilde yerleşmesini sağlamak amacıyla vibrasyon uygulanmıştır. Deneylerde kullanılan hafif beton karışım oranları Çizelge 3.4'te gösterilmiştir. Hafif betonun priz almasının ardından numuneler yaklaşık 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler laboratuvar ortamında kürlenmiştir.

Yüksek sıcaklık etkisini incelemek amacıyla küp numuneleri belirlenen sıcaklık seviyelerine kirişler ile birlikte maruz bırakılmış ve daha sonra basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur.

Çizelge 3.4. Küp ve kiriş numuneleri için kullanılan hafif beton karışım oranları

P.A.A oranı (%)	Çimento (kg)	Su (kg)	İnce (kg)	İri (kg)	Plastik (kg)
0	20	10	10	8	0
5	20	10	9,5	8	0,05
10	20	10	9	8	0,1
20	20	10	8	8	0,2
30	20	10	7	8	0,3

3.2.1.2. Kiriş numuneleri

Hafif betonarme kiriş numuneleri, hafif betonun yapısal davranışını incelemek amacıyla hazırlanmıştır. Kiriş numuneleri, belirlenen boyutlara uygun kalıplar içerisinde yerleştirilen donatı kafesi üzerine hafif beton dökülerek üretilmiştir. Donatı düzeni, kirişlerin eğilme davranışını incelemek amacıyla tasarlanmıştır.

Hafif beton dökümü tamamlandıktan sonra numuneler belirli bir süre kalıplarda bekletilmiş ve daha sonra kalıplardan çıkarılmıştır. Deney öncesinde kiriş numuneleri laboratuvar ortamında muhafaza edilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan hafif betonarme kiriş numunelerinin numunesinin donatı düzeni Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Kiriş numuneleri 1000 mm uzunluğunda olup kesit boyutları 100 mm × 150 mm olarak tasarlanmıştır. Kirişlerde çekme bölgesinde 2Ø10 donatı, basınç bölgesinde ise 2Ø8 donatı kullanılmıştır. Kesme dayanımını sağlamak amacıyla Ø8 etriyeler belirli aralıklarla yerleştirilmiştir.



Şekil 3.6. Deneylerde kullanılan hafif betonarme kiriş numunesinin donatı düzeni

3.2.1.3. Yüksek sıcaklık deneyi prosedürü

Bu çalışmada hafif beton numunelerinin yüksek sıcaklık altındaki davranışını incelemek amacıyla küp ve kiriş numuneleri farklı sıcaklık seviyelerine maruz bırakılmıştır. Deney kapsamında numuneler oda sıcaklığı, 150°C, 300°C, 450°C ve 600°C olmak üzere farklı sıcaklık koşullarında incelenmiştir.

Küp ve kiriş numuneleri, yüksek sıcaklık uygulaması için kullanılan laboratuvar fırını içerisine yerleştirilmiştir. Numunelerin laboratuvar fırını içerisine yerleştirilmiş genel görünümü Şekil 3.6'te gösterilmektedir. Numuneler fırın içerisine yan yana yerleştirilmiş ve aynı anda ısıtılmıştır. Isıtma işlemi kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmiş ve numuneler hedef sıcaklığa ulaşmaya kadar ısıtılmıştır. Hedef sıcaklığa ulaşıldıktan sonra numuneler 1 saat bu sıcaklıkta bekletilmiştir.

Isıtma süresi tamamlandıktan sonra numuneler fırından çıkarılmış ve laboratuvar ortamında doğal olarak soğumaya bırakılmıştır. Soğuma işlemi tamamlandıktan sonra küp numuneleri hafif betonun basınç dayanımı deneyine, kiriş numuneleri ise eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları kullanılarak yüksek sıcaklığın hafif betonun mekanik özellikleri ve hafif betonarme kirişlerin davranışı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.



Şekil 3.7. Yüksek sıcaklık deneyi için fırın içerisine yerleştirilen küp ve kiriş numuneleri

3.2.1.4. Kiriş eğilme deneyi

Hafif betonarme kiriş numunelerinin eğilme davranışını incelemek amacıyla eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyler üniversal test makinesi kullanılarak yapılmıştır. Kiriş numunesi iki mesnet üzerine yerleştirilmiş ve yük kiriş açıklığının ortasına simetrik olarak iki noktadan uygulanmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.7'da gösterilmektedir.

Deney sırasında yük hidrolik sistem aracılığıyla kontrollü bir şekilde artırılmıştır. Yükleme süresince kiriş üzerinde oluşan çatlaklar gözlemlenmiş ve numunelerin göçme davranışı kaydedilmiştir. Deney sonucunda kirişlerin taşıma kapasitesi, çatlama davranışı ve yük–deplasman ilişkileri değerlendirilmiştir.



Şekil 3. 8. Betonarme kiriş numunesinin eğilme deneyi düzeneği

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde elde edilen deneysel sonuçlar sunulmakta ve ilgili bulgular tartışılmaktadır.

4.1. Beton Numuneleri

Bu bölümde beton numunelerine ait deneysel sonuçlar sunulmakta, plastik atık oranı ve sıcaklık etkisi altında elde edilen bulgular değerlendirilmektedir.

4.1.1. Basınç dayanımı

Şekil 4.1’de sunulan deneysel bulgular, kontrol karışımı (%0 ikame oranı) ile karşılaştırıldığında tüm sıcaklık seviyelerinde ikame oranı arttıkça betonun basınç dayanımının azaldığını açıkça göstermektedir. Yüksek sıcaklık deneyleri sırasında numuneler elektrikli bir fırına yerleştirilmiş ve termal şok oluşumunu önlemek amacıyla sıcaklık kademeli olarak 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C ve 600 °C hedef seviyelerine kadar yavaş bir şekilde yükseltilmiştir. Numunelerin yeterli ve homojen şekilde ısınmasını sağlamak amacıyla, her hedef sıcaklık seviyesinde numuneler bir saat süreyle fırında bekletilmiştir. Isıtma işlemi tamamlandıktan sonra fırın kapatılmış ve numunelerin deney öncesinde oda sıcaklığına kadar doğal olarak soğumasına izin verilmiştir.

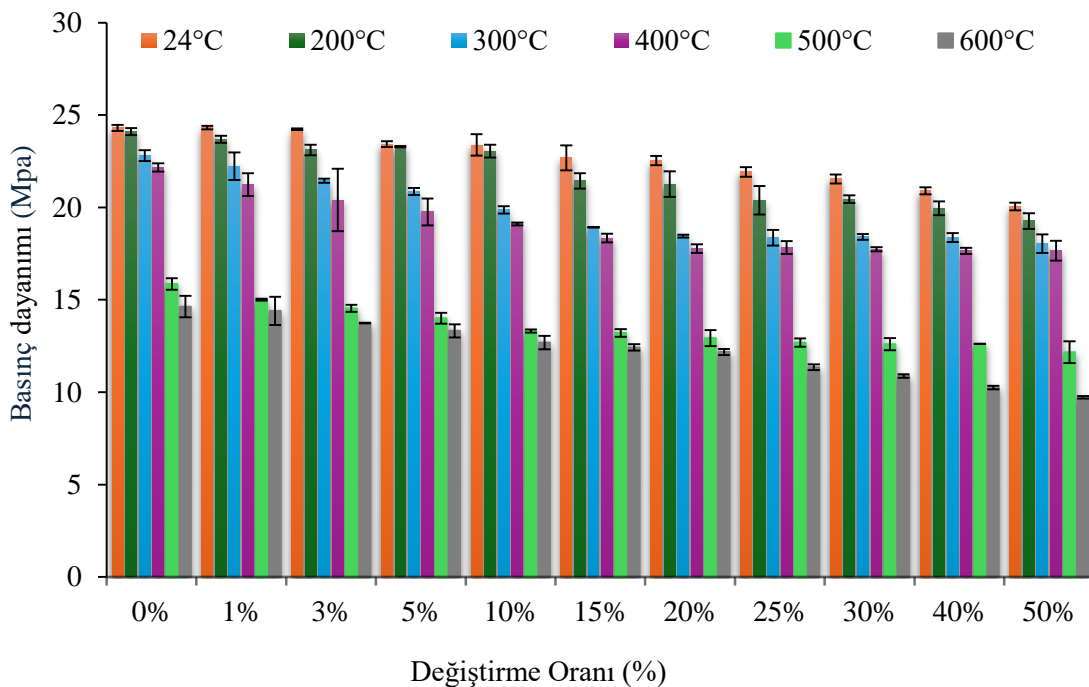
24 °C ortam sıcaklığında elde edilen sonuçlar incelendiğinde, düşük ikame oranlarında basınç dayanımında belirgin bir değişim olmadığı görülmektedir. Özellikle %1–3 aralığındaki ikame oranlarında dayanım değerlerinde kayda değer bir değişiklik gözlenmezken, %5–10 aralığında yaklaşık %3,6–3,8 oranında sınırlı bir azalma meydana gelmiştir. Bununla birlikte, ikame oranı arttıkça dayanım kaybının daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Basınç dayanımındaki azalma %15 ikame oranında yaklaşık %6,7, %20’de %7,3, %25’te %9,8, %30’da %11,4, %40’ta %14,0 ve %50 ikame oranında yaklaşık %17,5 seviyesine ulaşmıştır.

200 °C sıcaklık seviyesinde de benzer bir eğilim gözlenmiş ve artan ikame oranı ile birlikte basınç dayanımında kademeli bir azalma meydana gelmiştir. Bu sıcaklık seviyesinde dayanım kaybı %1–5 aralığında yaklaşık %2,5–4,5 olarak belirlenmiş, %10 ikame oranında yaklaşık %5,7, %15’te %11,0, %20’de %12,0, %25’te %15,4, %30’da %15,2, %40’ta %17,2 ve %50 ikame oranında yaklaşık %20,1 seviyesine ulaşmıştır.

Sıcaklığın 300 °C seviyesine yükselmesiyle birlikte dayanım kaybının daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Bu sıcaklık seviyesinde basınç dayanımı %1 ikame oranında yaklaşık %2,5, %3'te %6,0, %5'te %8,5, %10'da %12,9, %15'te %17,0, %20'de %19,1, %25'te %20,6, %30'da %20,9, %40'ta %21,1 ve %50 ikame oranında yaklaşık %21,1 oranında azalmıştır.

400 °C sıcaklık seviyesinde dayanım kaybı daha da artmış ve basınç dayanımı %1 ikame oranında yaklaşık %4,1, %3'te %7,8, %5'te %10,9, %10'da %13,8, %15'te %17,1, %20'de %19,8, %25'te %20,7, %30'da %21,3, %40'ta %21,7 ve %50 ikame oranında yaklaşık %22,0 oranında azalma göstermiştir.

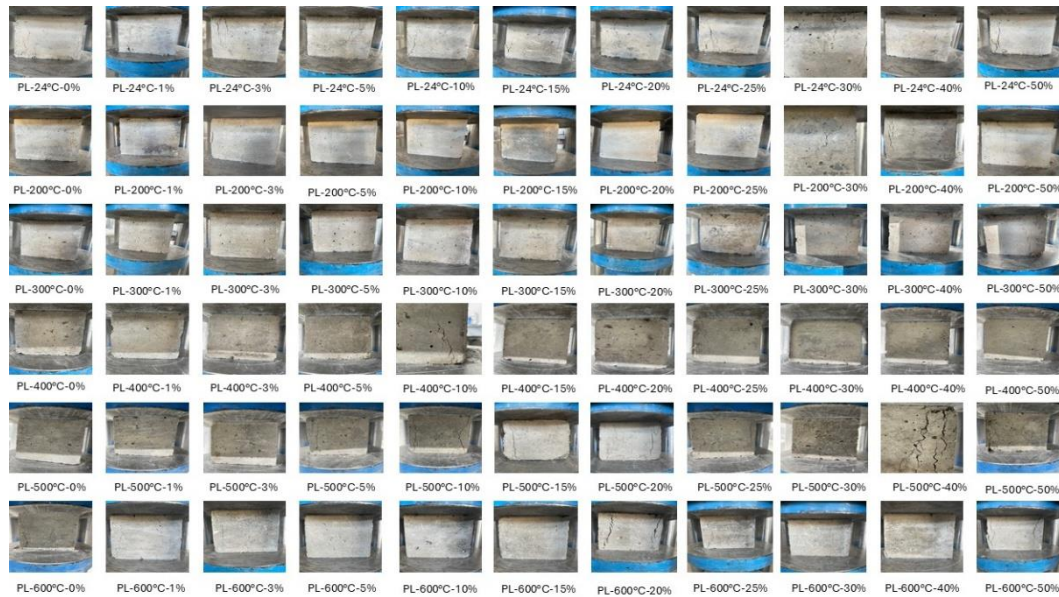
500 °C sıcaklık seviyesinde ise dayanım kaybının daha da şiddetlendiği görülmektedir. Bu sıcaklıkta basınç dayanımı %1 ikame oranında yaklaşık %5,4, %3'te %8,1, %5'te %11,7, %10'da %16,1, %15'te %18,5, %20'de %19,5, %25'te %20,3, %30'da %20,6, %40'ta %21,7 ve %50 ikame oranında yaklaşık %23,3 oranında azalma göstermiştir. En ciddi dayanım kayıpları ise 600 °C sıcaklık seviyesinde gözlemlenmiştir. Bu durumda basınç dayanımı %1 ikame oranında yaklaşık %1,6, %3'te %6,2, %5'te %9,3, %10'da %13,3, %15'te %14,5, %20'de %17,3, %25'te %22,4, %30'da %25,6, %40'ta %29,9 ve %50 ikame oranında yaklaşık %33,5 oranında azalmıştır.



Şekil 4.1. 24°C ile 600 °C arasındaki sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra, farklı değiştirme oranları içeren beton numunelerinin basınç dayanımı gelişimi

Elde edilen bu sonuçlar, ikame oranının artmasının betonun basınç dayanımını önemli ölçüde zayıflattığını açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca sıcaklık artışıyla birlikte bu olumsuz etkinin daha da belirgin hale geldiği görülmektedir. Bu durum hem kullanılan ikame malzemesinin miktarının hem de maruz kalınan sıcaklık seviyesinin betonun mekanik performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.2’de farklı plastik atık ikame oranlarına (%0–%50) sahip hafif beton küp numunelerinin çeşitli sıcaklık seviyelerine (24°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C ve 600°C) maruz bırakıldıktan sonra basınç deneyi sonucunda oluşan kırılma modelleri gösterilmektedir. Görüntüler incelendiğinde, sıcaklık ve plastik oranı arttıkça numunelerdeki hasar seviyesinin belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Oda sıcaklığındaki numunelerde kırılma genellikle daha sınırlı ve düzenli bir şekilde gerçekleşirken, yüksek sıcaklıklara maruz kalan numunelerde yüzey çatlakları, köşe kırılmaları ve parçalanma davranışlarının daha belirgin hâle geldiği gözlemlenmiştir. Özellikle 400°C ve üzerindeki sıcaklıklarda beton matrisinde ciddi bozulmalar meydana gelmiş ve numunelerin bütünlüğünde önemli kayıplar oluşmuştur. Ayrıca plastik atık oranının artmasıyla birlikte beton iç yapısında boşluk oluşumu ve aderans kaybı gibi etkilerin kırılma davranışını daha belirgin hâle getirdiği görülmektedir. Bu durum, yüksek sıcaklık ve plastik içeriğinin birlikte etkisi altında betonun basınç dayanımı ve kırılma mekanizmasının önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir.



Şekil 4.2. Değişen plastik içerik ve termal koşullara maruz kalan beton küp numunelerinin basınçlı kırılma modelleri

4.1.2. Yarmada çekme dayanımı

Şekil 4.3'te sunulan sonuçlar, ikame oranı ve sıcaklık arttıkça yarmada çekme dayanımının azaldığını açıkça göstermektedir. Daha yüksek ikame oranları, betonun çekme dayanımının düşmesine neden olmakta ve bu durum yüksek sıcaklığa maruz kalma ile daha da belirgin hale gelmektedir. 24 °C ortam sıcaklığında, düşük ikame oranlarında yarmada çekme dayanımında sınırlı artışlar gözlenmiştir. Kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında %1 ikame oranında yaklaşık %1,3, %3'te %4,7 ve %5'te %0,5 oranında artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte, bu seviyeden sonra dayanımda kademeli bir azalma görülmüş; %10 ikame oranında yaklaşık %1,5, %15'te %4,7, %20'de %7,1, %25'te %8,2, %30'da %17,7, %40'ta %19,0 ve %50 ikame oranında yaklaşık %19,8 oranında düşüş gerçekleşmiştir.

Numunelerin 200 °C sıcaklığa maruz bırakılmasının ardından, düşük ikame oranlarında çekme dayanımında yine sınırlı iyileşmeler gözlenmiştir. Bu sıcaklık seviyesinde dayanım %1 ikame oranında yaklaşık %3,5, %3'te %5,9 ve %5'te %1,5 oranında artış göstermiştir. Ancak daha yüksek ikame oranlarında dayanımda sürekli azalma meydana gelmiş; %10'da yaklaşık %2,0, %15'te %4,4, %20'de %6,7, %25'te %7,8, %30'da %17,0, %40'ta %19,0 ve %50 ikame oranında yaklaşık %20,0 oranında düşüş kaydedilmiştir.

300 °C sıcaklık seviyesinde yarmada çekme dayanımının neredeyse monoton bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu sıcaklıkta %1 ikame oranında yaklaşık %8,0 ve %3'te %10,1 oranında sınırlı artış gözlenmiş, ancak daha yüksek ikame oranlarında dayanım azalmaya başlamıştır. Buna göre dayanım %5 ikame oranında yaklaşık %3,6, %10'da %8,0, %15'te %9,7, %20'de %11,3, %25'te %9,0, %30'da %15,8, %40'ta %16,0 ve %50 ikame oranında yaklaşık %17,3 oranında azalmıştır.

400 °C sıcaklık seviyesinde çekme dayanımındaki bozulma daha belirgin hale gelmiştir. Bu sıcaklıkta yarmada çekme dayanımı %1 ikame oranında yaklaşık %1,9, %3'te %6,8, %5'te %3,1, %10'da %2,2, %15'te %7,1, %20'de %8,3, %25'te %11,5, %30'da %17,8, %40'ta %21,6 ve %50 ikame oranında yaklaşık %22,7 oranında azalmıştır.

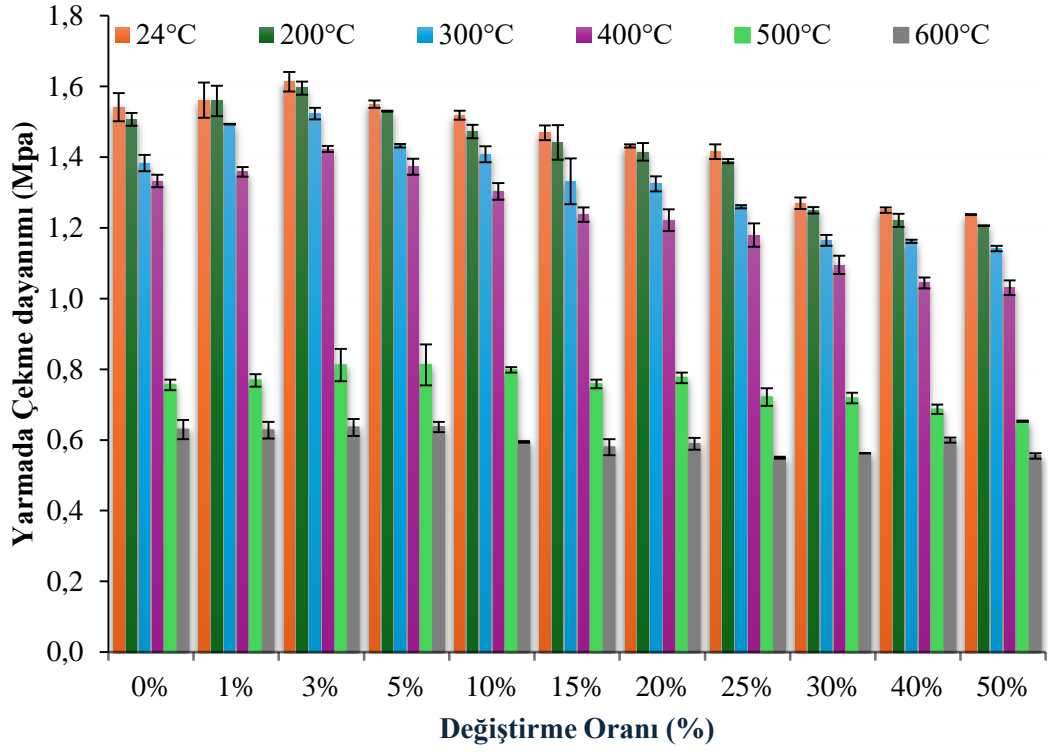
Numunelerin 500 °C sıcaklığa maruz bırakılmasının ardından yarmada çekme dayanımı genel olarak azalma eğilimi göstermiştir. Bu sıcaklıkta dayanım %1 ikame oranında yaklaşık %1,6 azalma gösterirken, %3 ve %5 ikame oranlarında yaklaşık %7,4 oranında sınırlı artışlar gözlenmiştir. Bununla birlikte, daha yüksek ikame oranlarında

dayanım yeniden azalmış ve %10'da yaklaşık %4,0, %15'te %0,3, %20'de %3,0, %25'te %4,6, %30'da %5,0, %40'ta %9,0 ve %50 ikame oranında yaklaşık %13,6 oranında düşüş gerçekleşmiştir.

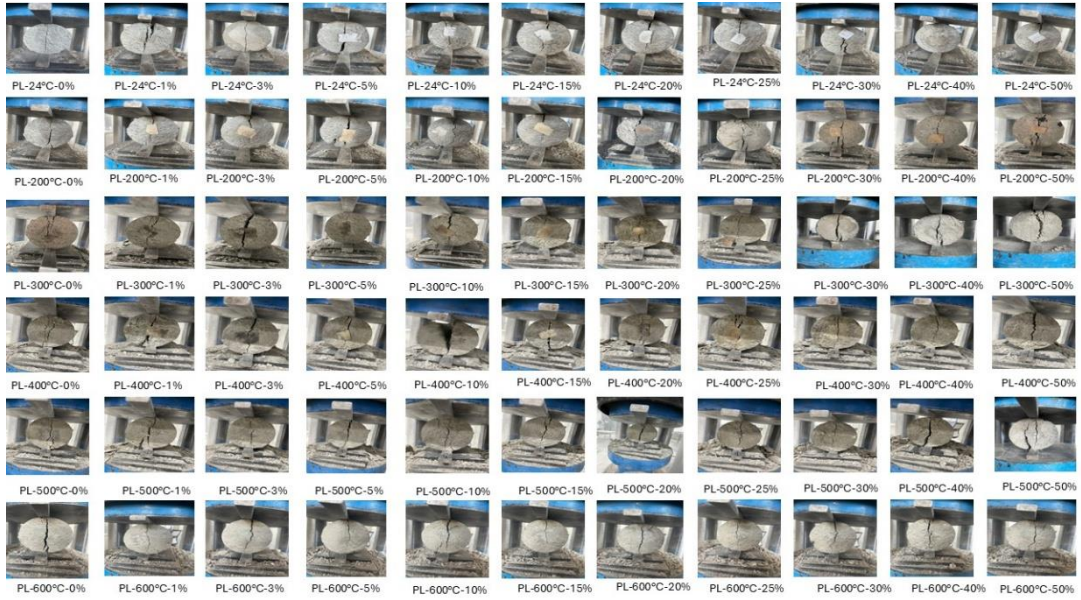
En ciddi dayanım kayıpları ise 600 °C sıcaklık seviyesinde gözlenmiştir. Bu durumda yarmada çekme dayanımı ikame oranının artmasıyla birlikte düzenli olarak azalmış; %1 ikame oranında yaklaşık %0,2, %3'te %1,1, %5'te %1,3, %10'da %5,4, %15'te %7,9, %20'de %6,5, %25'te %12,6, %30'da %10,7, %40'ta %4,7 ve %50 ikame oranında yaklaşık %11,8 oranında azalma meydana gelmiştir.

Elde edilen bu sonuçlar, ortam sıcaklığında çok düşük ikame oranlarında sınırlı çekme dayanımı artışlarının görülebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, ikame oranının artması ve numunelerin yüksek sıcaklıklara maruz bırakılması, beton matrisinin zayıflaması ve mikro çatlakların ilerlemesi gibi mekanizmalar nedeniyle yarmada çekme dayanımının kademeli olarak bozulmasına yol açmaktadır.

Şekil 4.4'te farklı plastik atık ikame oranlarına (%0–%50) sahip beton silindir numunelerinin çeşitli sıcaklık seviyelerine (24°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C ve 600°C) maruz bırakıldıktan sonra gerçekleştirilen yarma çekme deneyi sonucunda oluşan kırılma davranışları gösterilmektedir. Görseller incelendiğinde, numunelerde oluşan çatlakların çoğunlukla silindirin ortasından başlayarak dikey doğrultuda ilerlediği ve yarma çekme deneyine özgü tipik kırılma modelinin olduğu görülmektedir. Oda sıcaklığında test edilen numunelerde kırılma daha düzenli ve kontrollü gerçekleşirken, sıcaklık seviyesinin artmasıyla birlikte beton yüzeyinde daha belirgin çatlakların ve parçalanmaların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Özellikle 400°C ve üzerindeki sıcaklıklarda beton matrisinde bozulma artmış ve numunelerde daha geniş çatlaklar oluşmuştur. Ayrıca plastik atık oranının artmasıyla birlikte betonun iç yapısındaki aderansın azalması ve boşluk oranının artması, yarma çekme davranışını etkileyerek kırılma mekanizmasının daha belirgin hâle gelmesine neden olmuştur. Bu durum, yüksek sıcaklık ve plastik içeriğinin birlikte etkisi altında betonun çekme davranışında önemli değişiklikler meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 4.3. İkame oranı ve maruz kalma sıcaklığının 24–600 °C betonun yarma çekme dayanımı üzerindeki etkisi



Şekil 4.4. Çeşitli plastik içerik ve termal koşullarda beton silindirlerin yarma çekme özellikleri

4.1.3. Eğilme dayanımı

Şekil 4.5'te gösterildiği üzere, ikame oranındaki değişimler ve maruz kalınan sıcaklık seviyesi betonun eğilme dayanımını belirgin şekilde etkilemektedir. Oda sıcaklığında (24 °C), düşük ikame oranlarında eğilme dayanımında sınırlı bir artış gözlenmiştir. Kontrol karışımı (%0) ile karşılaştırıldığında, %1 ikame oranında yaklaşık %4,3, %3'te %5,1 ve %5'te %3,2 oranında artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte, daha yüksek ikame oranlarında bu olumlu etkinin giderek azaldığı ve dayanımın düşmeye başladığı görülmektedir. Bu bağlamda eğilme dayanımı %10 ikame oranında yaklaşık %0,2, %15'te %3,3, %20'de %5,8, %25'te %7,4, %30'da %7,7, %40'ta %12,0 ve %50 ikame oranında yaklaşık %13,4 oranında azalmıştır.

Numunelerin 200 °C sıcaklığa maruz bırakılmasının ardından eğilme dayanımı başlangıçta düşük ikame oranlarında artış göstermiştir. Bu sıcaklık seviyesinde dayanım %1 ikame oranında yaklaşık %3,8, %3'te %7,5 ve %5'te %6,7 oranında artmıştır. Bununla birlikte, daha yüksek ikame oranlarında dayanım kademeli olarak azalmış; %10'da yaklaşık %0,2, %15'te %5,3, %20'de %9,1, %25'te %13,3, %30'da %12,1, %40'ta %13,5 ve %50 ikame oranında yaklaşık %18,6 oranında düşüş meydana gelmiştir.

300 °C sıcaklık seviyesinde eğilme dayanımı ilk olarak düşük ikame oranlarında artış göstermiştir. Bu sıcaklıkta %1 ikame oranında yaklaşık %7,0, %3'te %10,5 ve %5'te %8,4 oranında artış gözlenmiştir. Ancak daha yüksek ikame oranlarında eğilme dayanımı yeniden azalma eğilimi göstermiş ve %10'da yaklaşık %3,3, %15'te %0,2, %20'de %9,5, %25'te %13,4, %30'da %16,9, %40'ta %18,0 ve %50 ikame oranında yaklaşık %17,4 oranında azalma kaydedilmiştir.

400 °C sıcaklık seviyesinde eğilme dayanımı, ikame oranının artmasıyla birlikte neredeyse monoton bir şekilde azalmıştır. Bu sıcaklıkta %1 ikame oranında yaklaşık %1,2 ve %3'te %5,4 oranında sınırlı artış gözlenirken, daha yüksek ikame oranlarında dayanım azalmıştır. Buna göre eğilme dayanımı %5 ikame oranında yaklaşık %1,4, %10'da %8,2, %15'te %11,5, %20'de %12,2, %25'te %17,7, %30'da %19,3, %40'ta %19,2 ve %50 ikame oranında yaklaşık %17,9 oranında düşüş göstermiştir.

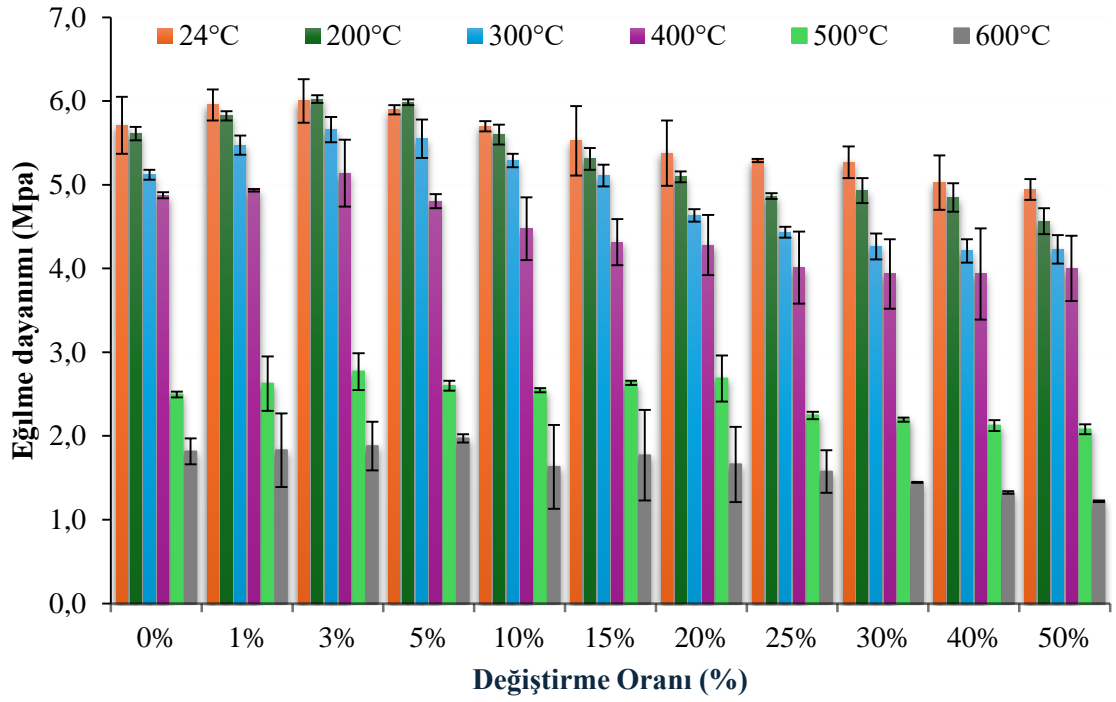
500 °C sıcaklık seviyesine maruz bırakılan numunelerde eğilme dayanımı yalnızca düşük ikame oranlarında sınırlı iyileşme göstermiştir. Bu sıcaklıkta %1 ikame oranında yaklaşık %5,2 ve %3'te %11,0 oranında artış gözlenmiştir. Ancak daha yüksek ikame oranlarında dayanım azalmış; %5'te yaklaşık %4,2, %10'da %2,0, %15'te %5,6,

%20'de %7,2, %25'te %10,0, %30'da %12,2, %40'ta %14,9 ve %50 ikame oranında yaklaşık %16,6 oranında düşüş meydana gelmiştir.

En yüksek dayanım kaybı ise 600 °C sıcaklık seviyesinde gözlenmiştir. Bu sıcaklıkta eğilme dayanımı ikame oranının artmasıyla birlikte düzenli olarak azalmış; %1 ikame oranında yaklaşık %0,8, %3'te %3,6 ve %5'te %8,5 oranında sınırlı artış görülmüş, ancak daha yüksek ikame oranlarında belirgin azalmalar meydana gelmiştir. Buna göre eğilme dayanımı %10 ikame oranında yaklaşık %10,7, %15'te %2,5, %20'de %8,5, %25'te %13,2, %30'da %20,4, %40'ta %27,0 ve %50 ikame oranında yaklaşık %32,8 oranında azalmıştır.

Elde edilen sonuçlar, düşük ikame oranlarının (yaklaşık %3–5'e kadar) oda sıcaklığında ve orta seviyedeki sıcaklıklarda eğilme dayanımında sınırlı bir iyileşme sağlayabileceğini göstermektedir.

Şekil 4.6'da farklı plastik atık ikame oranlarına (%0–%50) sahip beton kiriş numunelerinin çeşitli sıcaklık seviyelerine (24°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C ve 600°C) maruz bırakıldıktan sonra gerçekleştirilen eğilme deneyleri sonucunda oluşan kırılma davranışları gösterilmektedir. Görseller incelendiğinde, oda sıcaklığında test edilen numunelerde eğilme çatlaklarının genellikle kirişin orta bölgesinde oluştuğu ve kontrollü bir kırılma davranışı sergilediği görülmektedir. Sıcaklık seviyesinin artmasıyla birlikte beton matrisinde meydana gelen mikro yapısal bozulmalar nedeniyle çatlakların daha belirgin hâle geldiği ve bazı numunelerde parçalanma davranışının oluştuğu gözlemlenmiştir. Özellikle 400°C ve üzerindeki sıcaklıklarda kiriş numunelerinde çatlak genişliklerinin arttığı ve dayanım kaybının daha belirgin olduğu görülmektedir. Ayrıca plastik atık oranının artmasıyla birlikte beton iç yapısındaki aderansın azalması ve boşluk oranının artması, eğilme davranışını etkileyerek kiriş numunelerinde daha belirgin kırılma mekanizmalarının oluşmasına neden olmuştur. Bu durum, plastik içeriği ve yüksek sıcaklık etkisinin birlikte beton kirişlerin eğilme performansı üzerinde önemli değişikliklere yol açtığını göstermektedir.



Şekil 4.5. İkame oranı ve maruz kalma sıcaklığının 24°C ile 600 °C betonun eğilme dayanımı üzerindeki etkisi



Şekil 4.6. Çeşitli plastik içerik ve termal koşullarda beton eğilme özelliklerinin kırılma davranışı

4.1.4. Görsel gözlemler

Yüksek sıcaklık uygulaması sırasında, fırın duvarlarının opak yapıda olması nedeniyle deney numunelerinin doğrudan görsel olarak incelenmesi mümkün olmamıştır. Bu nedenle izlenen deney prosedüründe, fırın sıcaklığı önceden belirlenen hedef değerlere mümkün olan en kısa sürede ulaştırılmıştır. Hedef sıcaklığa ulaşıldıktan sonra, beton numunelerinin homojen bir şekilde ısı etkiye maruz kalmasını sağlamak amacıyla bu sıcaklıkta 1 saat süreyle bekletilmiştir. Bekleme süresinin tamamlanmasının ardından fırın kapatılmış ve numuneler fırın içerisinde doğal olarak oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır.

Soğuma işlemi tamamlandıktan sonra numuneler fırından çıkarılmış ve tüm beton numuneleri, ısı işleme tabi tutulmamış referans numuneler ile görsel olarak karşılaştırılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda, yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerde belirgin renk değişimleri gözlemlenmiştir. Özellikle 400°C ve 600°C sıcaklık seviyelerine maruz bırakılan numunelerde, 24°C, 200°C ve 300°C’de test edilen numunelere kıyasla daha koyu ve belirgin bir kahverengimsi renklenme meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu renk değişiminin, çimento hidrasyon ürünlerinin bozulması ve beton bünyesinde gerçekleşen kimyasal-fiziksel dönüşümlerle ilişkili olduğu değerlendirilmektedir.

Yarma çekme dayanımı deneylerinin gerçekleştirilmesinin ardından, tüm karışım türleri ve tüm sıcaklık seviyeleri için numunelerin tam kesit derinliği boyunca görsel inceleme yapılmıştır. Bu incelemelerde, özellikle yüksek sıcaklıklara maruz kalan numunelerde iç yapıya doğru ilerleyen çatlakların daha belirgin hâle geldiği ve hasarın yalnızca yüzeyle sınırlı kalmadığı gözlemlenmiştir. Yapılan görsel değerlendirmelere ilişkin örnek görüntüler Şekil 4.7’de sunulmaktadır.

Bu görsel bulgular, mekanik deneylerden elde edilen sonuçlarla uyumlu olup, sıcaklık artışına bağlı olarak betonun iç yapısında meydana gelen hasarın giderek arttığını ve bu durumun betonun mekanik performansını olumsuz yönde etkilediğini doğrulamaktadır.



Şekil 4.7. Farklı plastik içerik ve sıcaklık maruziyetleri yarma çekme testine maruz kalan tabi tutulan numunelerin kırılma görünümleri

4.2. Donatılı Beton Kirişler

Deneysel sonuçlar, yüksek sıcaklığın donatılı beton kirişlerin yapısal davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Bu çalışmada gözlenen yük taşıma kapasitesindeki kademeli azalma, esas olarak yüksek sıcaklık koşulları altında betonun mekanik özelliklerinin bozulması ve beton ile donatı arasındaki aderans performansının zayıflaması ile ilişkilendirilmektedir.

4.2.1. Küp numunelerde basınç dayanımı

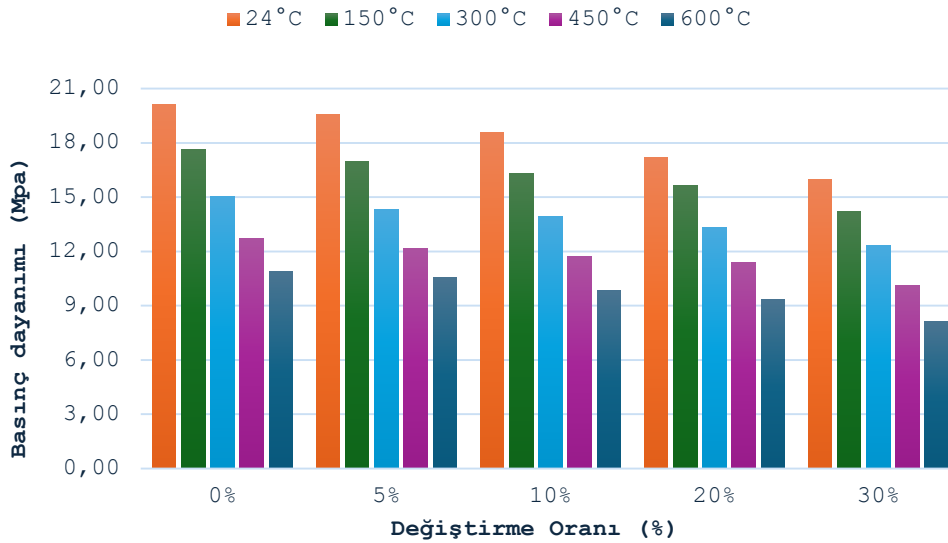
Şekil 4.8’de görüldüğü üzere, kiriş numuneleri ile birlikte aynı koşullarda hazırlanan küp numunelerinin basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde hem plastik atık ikame oranının hem de sıcaklık etkisinin betonun mekanik performansı üzerinde belirgin bir azalmaya neden olduğu görülmektedir.

Referans karışım (%0 plastik) dikkate alındığında, sıcaklık artışıyla birlikte basınç dayanımında kademeli bir düşüş meydana gelmiştir. 24°C’de 20,12 MPa olan dayanım, 150°C’de yaklaşık %12,4 azalarak 17,63 MPa’a, 300°C’de %25,2 azalarak 15,06 MPa’a, 450°C’de %36,7 azalarak 12,74 MPa’a ve 600°C’de %45,9 oranında azalarak 10,88

MPa'a düşmüştür. Bu sonuçlar, yüksek sıcaklık etkisinin betonun iç yapısında ilerleyici hasara yol açtığını açıkça göstermektedir.

Plastik atık ikame oranının etkisi incelendiğinde, tüm sıcaklık seviyelerinde basınç dayanımının referans karışıma göre azaldığı belirlenmiştir. 24°C ortam sıcaklığında, %5, %10, %20 ve %30 plastik içeren numunelerde dayanım sırasıyla %2,8, %7,8, %14,5 ve %20,5 oranında azalmıştır. Bu durum, plastik oranı arttıkça dayanım kaybının belirgin hâle geldiğini göstermektedir.

Yüksek sıcaklık ile plastik oranının birlikte etkisi değerlendirildiğinde, dayanım kayıplarının daha da arttığı görülmektedir. Özellikle 600°C sıcaklık seviyesinde, %5, %10, %20 ve %30 plastik içeren numunelerde dayanım kayıpları sırasıyla yaklaşık %47,4, %51,2, %53,7 ve %59,7 olarak hesaplanmıştır. En yüksek kayıp %30 plastik içeren numunede elde edilmiştir. Benzer şekilde, ara sıcaklık seviyelerinde de hem sıcaklık hem de plastik oranına bağlı olarak düzenli bir azalma eğilimi gözlenmiştir.



Şekil 4.8. Küp numunelerde basınç dayanımının sıcaklık ve plastik oranına bağlı değişimi

4.2.2. Yük–deplasman davranışı

Deneysel testler sonucunda elde edilen yük–sehim ilişkileri, farklı sıcaklık seviyelerine maruz bırakılan donatılı beton kirişlerin yapısal tepkisi hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Ortam sıcaklığında test edilen kirişler, ısıtılmış numunelerle karşılaştırıldığında en yüksek rijitlik ve yük taşıma kapasitesini göstermiştir.

24 °C sıcaklık seviyesinde kiriş, oldukça dik bir yük–sehim eğrisi sergilemiş ve bu durum yüksek rijitlik ile deformasyona karşı güçlü bir direncin göstergesi olmuştur.

Uygulanan yük arttıkça kirişte kademeli bir sehim artışı meydana gelmiş ve nihai yük değeri yaklaşık 66,84 kN seviyesinde gerçekleşmiştir.

Sıcaklığın 150 °C'ye yükselmesi durumunda rijitlikte sınırlı bir azalma gözlenmiştir. Genel davranış referans kirişe benzerlik göstermesine rağmen, yük–sehim eğrisi aynı yük seviyelerinde daha fazla deformasyon oluştuğunu ortaya koymuştur. Bu sıcaklık seviyesinde kirişin nihai yük kapasitesi yaklaşık 59,33 kN olarak belirlenmiştir.

300 °C sıcaklık seviyesinde kirişin rijitliğinde daha belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Yük–sehim eğrisinin daha yatık hale gelmesi, beton kesitinin rijitliğinin azaldığını göstermektedir. Maksimum yük yaklaşık 49,77 kN seviyesine düşmüş ve kiriş kırılma gerçekleşmeden önce daha büyük sehim değerleri göstermiştir.

450 °C sıcaklığa maruz bırakılan kirişlerde ise yapısal performanstaki bozulma daha belirgin hale gelmiştir. Yük–sehim eğrisi, daha düşük yük seviyelerinde dahi önemli deformasyonların meydana geldiğini göstermiştir. Bu durumda nihai yük yaklaşık 37,99 kN seviyesine düşmüş ve bu değer yapısal kapasitede önemli bir azalmaya işaret etmiştir.

En ciddi davranış değişimi 600 °C sıcaklığa maruz bırakılan kirişte gözlenmiştir. Bu kirişte elde edilen yük–sehim eğrisi, tüm numuneler arasında en düşük rijitlik ve en yüksek deformasyon değerlerini göstermiştir. Kiriş yaklaşık 27,41 kN seviyesinde kırılmaya ulaşmış ve bu durum yüksek sıcaklıkların betonun mekanik özelliklerini önemli ölçüde zayıflattığını ortaya koymuştur. Deneysel sonuçlar genel olarak sıcaklık artışının donatılı beton kirişlerin rijitliğinde, yük taşıma kapasitesinde ve yapısal dayanımında kademeli bir azalmaya yol açtığını göstermektedir.

4.2.3. Çatlak gelişimi ve göçme gözlemleri

Yüksek sıcaklığa (450 - 600 C) maruz kalan kirişler eğilme hasarından kesme hasarına dönüşmüştür. Deneysel çalışmalar sırasında donatılı beton kirişlerin çatlak oluşumları ve göçme mekanizmaları dikkatli bir şekilde incelenmiştir. Test edilen kirişlerde çatlak ilerlemesi ve nihai göçme durumunu gösteren görüntüler Şekil 4.9'de sunulmuştur. Bu görüntüler dört noktalı eğilme yüklemesi altında test edilen kirişlerdeki çatlak gelişimini açıkça ortaya koymaktadır.

Yüklemenin başlangıç aşamalarında, eğilme momentinin maksimum olduğu orta açıklık bölgesine yakın kiriş alt yüzeyindeki çekme bölgesinde ilk eğilme çatlakları oluşmuştur. Bu çatlaklar başlangıçta küçük ve düşey doğrultuda olup donatılı beton kirişlerin tipik eğilme çatlakları davranışını göstermektedir.

Uygulanan yük arttıkça çatlaklar yukarı doğru basınç bölgesine doğru ilerlemiş ve zamanla genişlemiştir. Kiriş açıklığı boyunca özellikle yükleme noktaları arasındaki saf eğilme bölgesinde ilave çatlaklar oluşmuştur. Deneysel görüntülerde orta açıklık bölgesi etrafında simetrik şekilde gelişen çok sayıda çatlak açıkça görülmektedir.

Yük seviyeleri daha da arttığında çatlak genişlikleri belirgin şekilde büyümüş ve bazı çatlaklar birleşerek özellikle yükleme noktası çevresinde daha büyük kırılma bölgeleri oluşturmuştur. Şekil 4.10'de gösterildiği gibi, görüntüler aynı zamanda yükleme noktasına yakın bölgelerde beton ezilmesi ve yerel hasar oluşumunu da ortaya koymaktadır. Bu durum kirişin nihai kapasitesine yaklaştığını göstermektedir. Bazı numunelerde yükleme plakası altında oluşan gerilme yoğunlaşması nedeniyle basınç bölgesindeki beton parçalarının dökülerek ayrıldığı gözlenmiştir.

Detaylı yakın çekim görüntüler, göçme sonrasında beton matrisinin iç kırılma yüzeylerini ortaya koymaktadır. Bu gözlemler, çatlakların harç matrisi içinden ve agrega parçacıklarının etrafından düzensiz bir şekilde ilerlediğini göstermekte ve betonun heterojen kırılma karakterini açıkça ortaya koymaktadır.

Deneysel gözlemler, test edilen kirişlerin büyük ölçüde eğilme göçmesi sergilediğini doğrulamaktadır. Bu göçme türü, çekme bölgesinde çatlakların oluşması, çatlakların yukarı doğru ilerlemesi ve son aşamada basınç bölgesinde betonun ezilmesi ile karakterize edilmektedir. Görüntülerde gözlenen çatlak dağılımları ve göçme şekilleri, eğilme yükleri altında çalışan donatılı beton kirişlerin beklenen yapısal davranışı ile uyumludur.



Şekil 4.9. Dört noktali eğilme deneyi sırasında donatılı beton kirişte çatlak gelişimi ve nihai göçme durumu



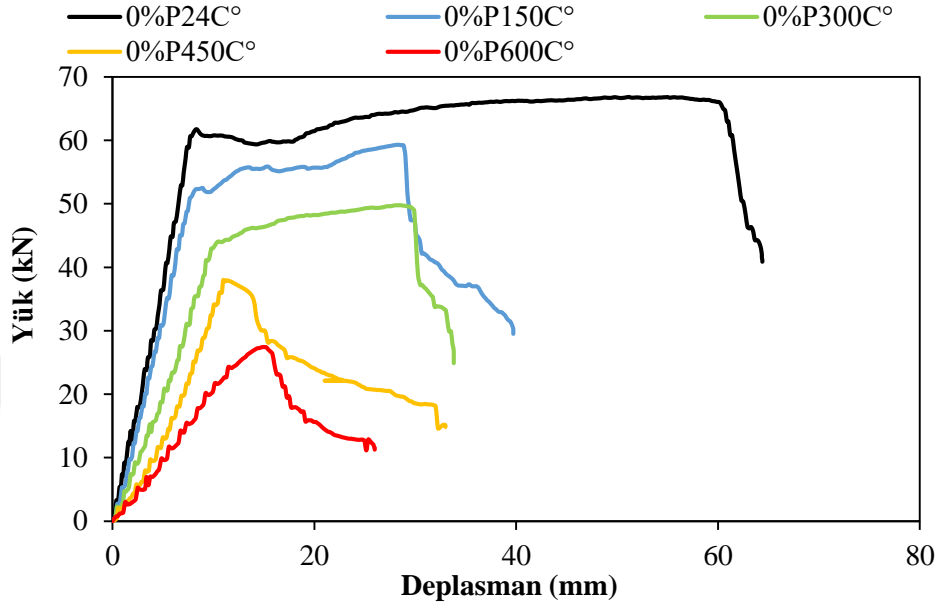
Şekil 4.10. Donatılı beton kirişin orta açıklık bölgesinde çatlak ilerlemesi

4.2.4. Sıcaklığın yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi

%0 Plastik

Oda sıcaklığında test edilen referans kiriş (0%P24°C) kontrol numunesi olarak kabul edildiğinde, sıcaklık arttıkça yük taşıma kapasitesinin kademeli olarak azaldığı görülmüştür. Sıcaklık 150°C'ye yükseldiğinde dayanım, kontrol numunesine kıyasla yaklaşık %11,24 oranında azalmıştır. 300°C sıcaklık seviyesinde bu azalma yaklaşık %25,54'e ulaşmıştır. Daha belirgin bir düşüş 450°C'de gözlenmiş ve dayanım yaklaşık %43,17 oranında azalmıştır. En ciddi azalma ise 600°C'de meydana gelmiş olup, oda

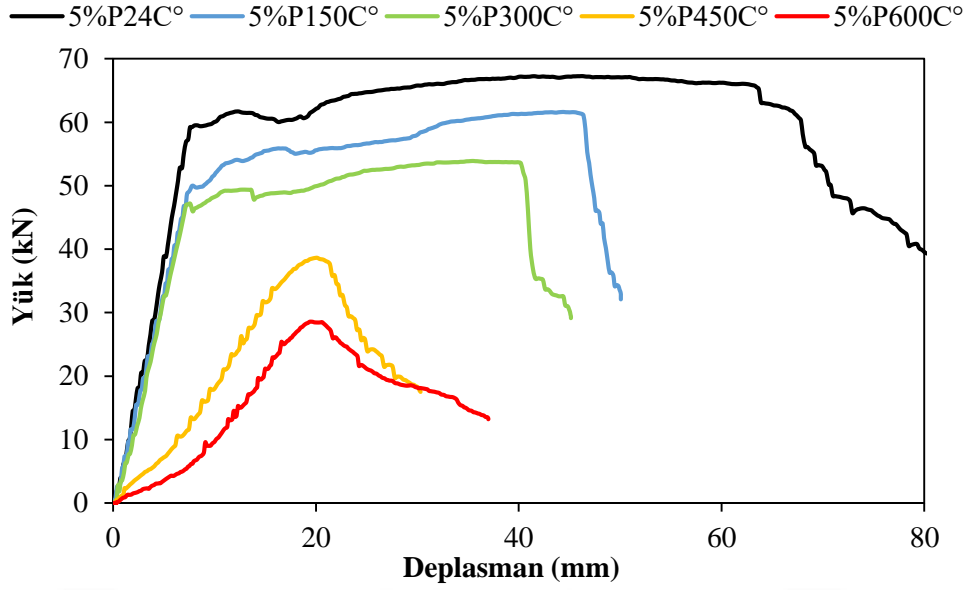
sıcaklığındaki referans kirişe kıyasla toplam dayanım kaybı yaklaşık %58,99 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, referans kirişin yapısal kapasitesinin sıcaklık artışıyla birlikte sürekli olarak azaldığını açıkça göstermektedir. Referans kirişe ait yük–yer değiştirme davranışı Şekil 4.11’de sunulmaktadır.



Şekil 4.11. %0 plastik içeren referans kirişin farklı sıcaklık seviyelerinde yük–deplasman davranışı

%5 plastik ikamesi

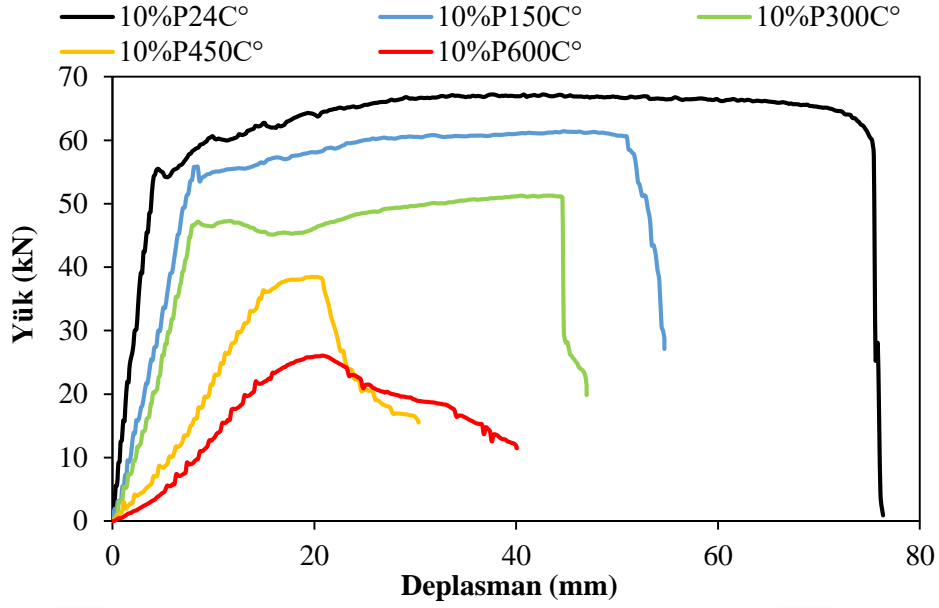
Oda sıcaklığında %5 plastik içeren kiriş (5%P24°C) kontrol numunesi olarak alındığında, sıcaklık arttıkça yük taşıma kapasitesinin kademeli olarak azaldığı görülmüştür. Sıcaklık 150°C'ye yükseldiğinde dayanım kontrol numunesine kıyasla yaklaşık %8,43 oranında azalmıştır. 300°C sıcaklık seviyesinde bu azalma yaklaşık %19,92'ye ulaşmıştır. Daha belirgin bir düşüş 450°C'de meydana gelmiş ve dayanım yaklaşık %42,57 oranında azalmıştır. En büyük azalma ise 600°C'de gözlenmiş olup, oda sıcaklığındaki numuneye göre toplam dayanım kaybı yaklaşık %57,51 olarak belirlenmiştir. %5 plastik ikamesi içeren kirişe ait yük–yer değiştirme davranışı Şekil 4.12'te gösterilmektedir.



Şekil 4.12. %5 plastik içeren referans kirişin farklı sıcaklık seviyelerinde yük–deplasman davranışı

%10 plastik ikamesi

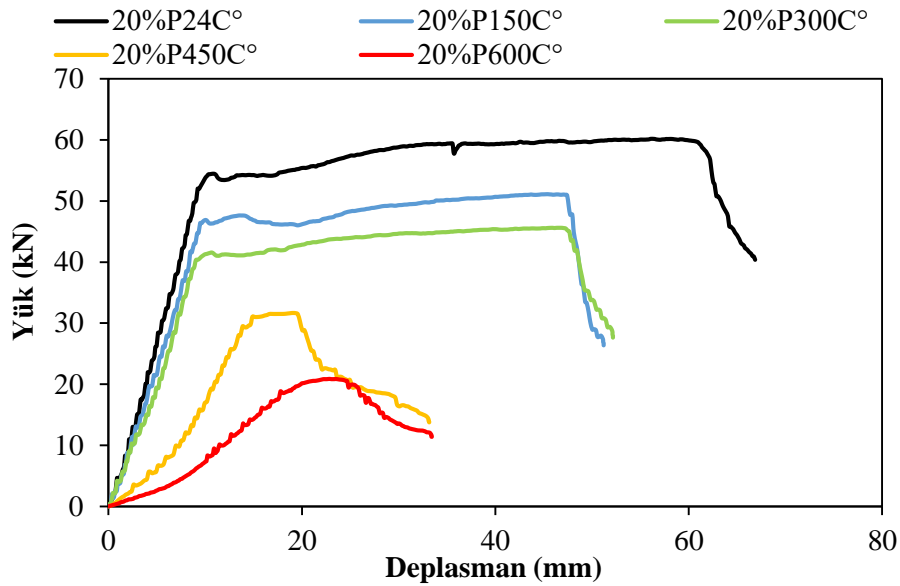
Oda sıcaklığında %10 plastik içeren kiriş (10%P24°C) kontrol numunesi olarak kabul edildiğinde, sıcaklık artışıyla birlikte yük taşıma kapasitesinin kademeli olarak azaldığı belirlenmiştir. Sıcaklık 150°C'ye yükseldiğinde dayanım kontrol numunesine göre yaklaşık %8,66 oranında azalmıştır. 300°C'de bu azalma yaklaşık %23,75 seviyesine ulaşmıştır. 450°C'de ise daha belirgin bir düşüş meydana gelmiş ve dayanım yaklaşık %42,81 oranında azalmıştır. En yüksek dayanım kaybı 600°C'de gözlenmiş olup, oda sıcaklığındaki numuneye kıyasla toplam azalma yaklaşık %61,24 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, %10 plastik içeren kirişin yapısal kapasitesinin sıcaklık artışıyla birlikte sürekli olarak azaldığını göstermektedir. İlgili yük–yer değiştirme eğrileri Şekil 4.13'te sunulmaktadır.



Şekil 4.13. %10 plastik içeren referans kirişin farklı sıcaklık seviyelerinde yük–deplasman davranışı

%20 plastik ikamesi

Oda sıcaklığında %20 plastik içeren kiriş (20%P24°C) kontrol numunesi olarak kabul edildiğinde, sıcaklık arttıkça yük taşıma kapasitesinin sürekli olarak azaldığı gözlenmiştir. Sıcaklık 150°C'ye yükseldiğinde dayanım kontrol numunesine kıyasla yaklaşık %15,06 oranında azalmıştır. 300°C'de bu azalma yaklaşık %24,15 seviyesine ulaşmıştır. 450°C'de daha belirgin bir düşüş meydana gelmiş ve dayanım yaklaşık %47,39 oranında azalmıştır. En büyük dayanım kaybı ise 600°C'de gerçekleşmiş olup, oda sıcaklığındaki numuneye göre toplam azalma yaklaşık %65,33 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, %20 plastik içeren kirişin maruz kaldığı sıcaklık arttıkça yapısal kapasitesinde önemli bir azalma meydana geldiğini göstermektedir. Bu karışıma ait yük–yer değiştirme davranışı Şekil 4.14'te sunulmaktadır.

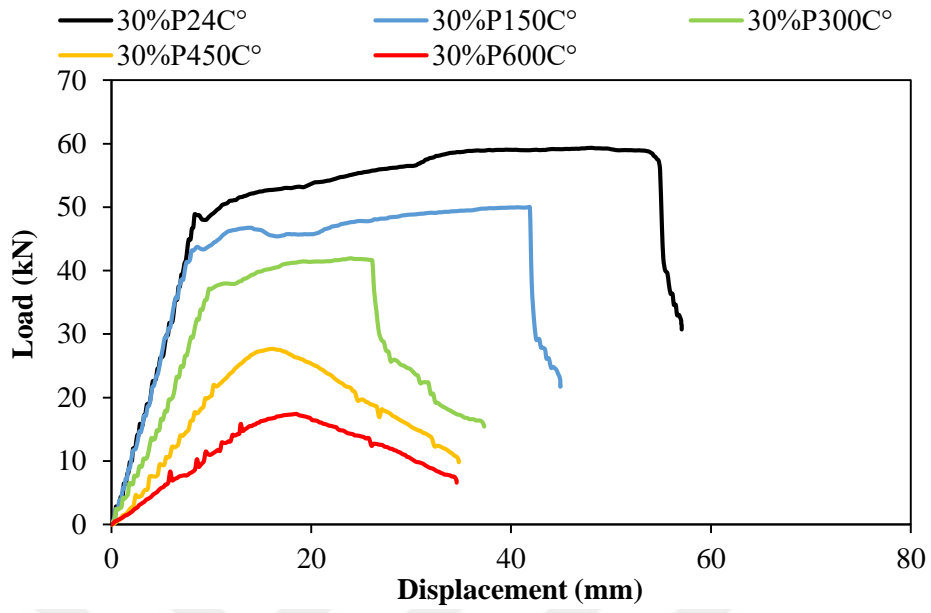


Şekil 4.14. %20 plastik içeren referans kirişin farklı sıcaklık seviyelerinde yük-deplasman davranışı

%30 plastik ikamesi

Oda sıcaklığında %30 plastik içeren kiriş (30%P24°C) kontrol numunesi olarak alındığında, sıcaklık arttıkça yük taşıma kapasitesinin kademeli olarak azaldığı belirlenmiştir. Sıcaklık 150°C'ye yükseldiğinde dayanım kontrol numunesine göre yaklaşık %15,75 oranında azalmıştır. 300°C'de bu azalma yaklaşık %29,29 seviyesine ulaşmıştır. 450°C'de ise çok daha belirgin bir düşüş meydana gelmiş ve dayanım yaklaşık %53,36 oranında azalmıştır. En ciddi azalma 600°C'de gözlenmiş olup, oda sıcaklığındaki numuneye göre toplam dayanım kaybı yaklaşık %70,69 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, yüksek sıcaklık etkisine en fazla maruz kalan kirişin %30 plastik içeren numune olduğunu ve bu karışımın yük taşıma kapasitesinde en büyük kaybı gösterdiğini ortaya koymaktadır. İlgili yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 4.15'te gösterilmektedir.

Elde edilen sonuçlar, tüm donatılı beton kirişlerin yük taşıma kapasitesinin maruz kalınan sıcaklık arttıkça önemli ölçüde azaldığını açıkça ortaya koymaktadır. Yapısal kapasitedeki bu azalma özellikle 300 °C üzerindeki sıcaklıklarda daha belirgin hale gelmiştir; çünkü bu sıcaklık seviyelerinde betonun mekanik özelliklerinde meydana gelen bozulma, kiriş dayanımında önemli kayıplara neden olmaktadır. Ayrıca sonuçlar, plastik ikame oranı arttıkça kirişlerin yüksek sıcaklıklara karşı daha hassas hale geldiğini ve yüksek plastik içeriğine sahip kirişlerin yüksek sıcaklık altında daha fazla dayanım kaybı yaşadığını göstermektedir.



Şekil 4.15. %30 plastik içeren referans kirişin farklı sıcaklık seviyelerinde yük-deplasman davranışı

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde çalışmadan elde edilen genel sonuçlar sunulmakta ve öneriler verilmektedir.

5.1. Numune Sonuçları

Araştırma kapsamında, plastik atıkların ince agrega yerine farklı oranlarda (%1, %3, %5, %10, %15, %20, %25, %30, %40 ve %50) kullanılmasıyla üretilen hafif beton numunelerinin farklı sıcaklık seviyeleri (24°C, 200°C, 300°C, 400°C ve 600°C) altındaki mekanik davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre plastik atık oranının artması, tüm sıcaklık seviyelerinde betonun basınç dayanımında belirgin bir azalmaya neden olmuştur. Bu azalma özellikle 300°C ve üzerindeki sıcaklıklarda daha belirgin hâle gelmiş, 600°C sıcaklık seviyesinde ise ciddi dayanım kayıpları gözlemlenmiştir.

Yarma çekme dayanımı sonuçları incelendiğinde, plastik atık ilavesine ve sıcaklık artışına karşı bu dayanım türünün basınç dayanımına kıyasla daha hassas bir davranış sergilediği görülmüştür. Plastik oranının artmasıyla birlikte tüm sıcaklık seviyelerinde çekme dayanımı azalmış ve özellikle 300°C ve üzerindeki sıcaklıklarda numunelerde yaygın çatlak oluşumları gözlemlenmiştir.

Eğilme dayanımı sonuçları da benzer şekilde plastik atık oranının artmasıyla birlikte tüm sıcaklık seviyelerinde azalma eğilimi göstermiştir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda, 400°C ve 600°C seviyelerinde eğilme dayanımındaki kayıpların oldukça belirgin hâle geldiği tespit edilmiştir. Bu durum, plastik parçacıkları ile çimento hamuru arasındaki bağın zayıflaması ve beton matrisinde oluşan mikro çatlakların artması ile ilişkilendirilmektedir.

Yapılan görsel incelemeler de mekanik deney sonuçlarını destekler niteliktedir. 300°C sıcaklık seviyesinden itibaren beton yüzeyinde renk değişimleri ve çatlak oluşumları gözlemlenmiş, 400°C ve 600°C sıcaklık seviyelerinde ise bu hasarların hem yüzeyde hem de betonun iç yapısında daha belirgin hâle geldiği belirlenmiştir. Plastik atıkların yüksek sıcaklıklarda yumuşaması veya erimesi, beton ile çimento hamuru arasındaki aderansın zayıflamasına neden olarak betonun mekanik performansının azalmasına katkı sağlamıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, plastik atık oranının artması ve maruz kalınan sıcaklık seviyesinin yükselmesi beton numunelerinin mekanik performansında belirgin

bir azalmaya neden olmuştur. Bu etkinin özellikle çekme ve eğilme davranışlarında daha belirgin olduğu görülmüştür.

5.2. Kiriş Sonuçları

Donatılı beton kirişler üzerinde gerçekleştirilen dört noktalı eğilme deneyleri, plastik atık içeren betonların yapısal davranışının hem plastik oranından hem de yüksek sıcaklık etkisinden önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Plastik atık içeren kirişlerin yük taşıma kapasiteleri referans kirişe (%0 plastik) kıyasla daha düşük bulunmuştur. Plastik oranının artmasıyla birlikte kirişlerin nihai yük taşıma kapasitesinde ve rijitliğinde belirgin bir azalma meydana gelmiştir.

Yük– deplasman incelendiğinde, yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan kirişlerin özellikle 400°C ve 600°C sıcaklık seviyelerinde daha düşük rijitlik ve daha erken göçme davranışı sergilediği gözlemlenmiştir. Artan sıcaklık seviyeleri beton içerisinde mikro çatlak oluşumunu artırarak kirişlerin taşıma kapasitesinin azalmasına neden olmuştur.

Çatlak gelişimi incelendiğinde, referans kirişlerde çatlakların daha düzenli ve kontrollü bir şekilde ilerlediği görülürken, plastik atık oranının artmasıyla birlikte çatlakların daha erken oluştuğu ve daha hızlı yayıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan kirişlerde çatlakların sayısı ve genişliği belirgin şekilde artmıştır. Bu durum, yüksek sıcaklığın betonun iç yapısında meydana getirdiği hasarların yapısal davranış üzerinde önemli etkiler oluşturduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, plastik atık oranının artması ve yüksek sıcaklık etkisi, donatılı beton kirişlerin hem rijitlik hem de yük taşıma kapasitesinde belirgin azalmaya yol açmaktadır.

5.3. Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar doğrultusunda aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- Plastik atık içeren betonların, yüksek sıcaklık veya yangın riski bulunan taşıyıcı elemanlarda kullanımı dikkatle değerlendirilmelidir. Özellikle yüksek ikame oranları yapısal uygulamalar için uygun görülmemektedir.

- Plastik atıkların beton içerisindeki olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla, düşük ikame oranları ile sınırlı kullanım tercih edilmeli veya yüksek ikame oranlı betonlar daha çok taşıyıcı olmayan veya ikincil yapı elemanlarında değerlendirilmelidir.

- Gelecek çalışmalarda, plastik atıkların lif formu, yüzey pürüzlendirme veya kimyasal kaplama gibi yöntemlerle beton–hamur aderansının iyileştirilmesi araştırılabilir.

- Yüksek sıcaklık etkisinin daha ayrıntılı incelenebilmesi için, mikro yapısal analizler (SEM, XRD, TGA gibi) ile mekanik sonuçlar desteklenmelidir.

- Donatılı beton kiriş deneyleri de plastik atık kullanımının yapısal davranış üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, gelecekte yapılacak çalışmalarda plastik atık içeren betonların farklı betonarme elemanlardaki (kolon ve döşeme gibi) davranışlarının daha ayrıntılı olarak incelenmesi önerilmektedir.



6. KAYNAKLAR

- Aattache, A., Mahi, A., Soltani, R., Mouli, M., ve Benosman, A. S. (2013). Experimental study on thermo-mechanical properties of Polymer Modified Mortar. *Materials ve Design* (1980-2015), 52, 459-469. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.055>
- Abdullah, A., Ku Yin, K. A. R., Al Bakri Abdullah, M. M., Kamarudin, H., ve Tran, M. Van. (2015). Comparison of Mechanical Properties of Fly Ash Artificial Geopolymer Aggregates with Natural Aggregate. *Applied Mechanics and Materials*, 754-755, 290-295. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.754-755.290>
- Abeyasinghe, D. T., Kumara, K. A. H., Kaushalya, K. A. D., Chandrika, U. G., ve Alwis, D. D. D. H. (2021). Phytochemical screening, total polyphenol, flavonoid content, in vitro antioxidant and antibacterial activities of Sri Lankan varieties of *Murraya koenigii* and *Micromelum minutum* leaves. *Heliyon*, 7(7), e07449. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2021.E07449>
- Abu-Saleem, M., Zhuge, Y., Hassanli, R., Ellis, M., Rahman, M. M., ve Levett, P. (2021). Stress-Strain Behaviour and Mechanical Strengths of Concrete Incorporating Mixed Recycled Plastics. *Journal of Composites Science*, 5(6), 146. <https://doi.org/10.3390/jcs5060146>
- Adajar, M. A., ve Ubay-Anongphouth, I. O. (2022). Effects of polyethylene terephthalate (PET) plastics on the mechanical properties of fly ash concrete. *International Journal of GEOMATE*, 23(95), 162–167. <https://doi.org/10.21660/2022.95.1576>
- Agrawal, Y., Gupta, T., ve Sharma, R. K. (2024). Effect of compaction technique on single used polythene bag waste concrete paver blocks: mechanical and durability performance. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 26(1), 184-196. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01814-5>
- Ahmad, J., Majdi, A., Babeker Elhag, A., Deifalla, A. F., Soomro, M., Isleem, H. F., ve Qaidi, S. (2022). A Step towards Sustainable Concrete with Substitution of Plastic Waste in Concrete: Overview on Mechanical, Durability and Microstructure Analysis. *Crystals*, 12(7), 944. <https://doi.org/10.3390/cryst12070944>
- Akbulut, Z. F., Kuzielová, E., Tawfik, T. A., Smarzewski, P., ve Guler, S. (2024). Synergistic effects of polypropylene fibers and silica fume on structural lightweight concrete: analysis of workability, thermal conductivity, and strength properties. *Materials*, 17(20), 5042.
- Akçaözöğlü, S., Akçaözöğlü, K., ve Atış, C. D. (2013). Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste PET lightweight aggregate (WPLA). *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 721-726. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.012>

- Akçaözoğlu, S., Atiş, C. D., ve Akçaözoğlu, K. (2010). An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste management*, 30(2), 285-290.
- Akinyele, J. O., Salim, R. W., ve Oyeti, G. (2015). Use of recycled polypropylene grains as partial replacement of fine aggregate in reinforced concrete beams. *Engineering Structures and Technologies*, 6(4), 184–190. <https://doi.org/10.3846/2029882X.2015.1070697>
- Alhamad, A., Yehia, S., Lublóy, É., ve Elchalakani, M. (2022). Performance of Different Concrete Types Exposed to Elevated Temperatures: A Review. *Materials*, 15(14), 5032. <https://doi.org/10.3390/ma15145032>
- Ali, K., Saingam, P., Qureshi, M. I., Saleem, S., Nawaz, A., Mehmood, T., Maqsoom, A., Malik, M. W., ve Suparp, S. (2023). Influence of Recycled Plastic Incorporation as Coarse Aggregates on Concrete Properties. *Sustainability (Switzerland)*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/su15075937>
- Ali O. Demirbaş, Emircan Özçelikci ve Mustafa Şahmaran (2024). Hazır beton dergisi makale: geri dönüştürülmüş yapı malzemeleri içeren çimento (TS EN 197-6).
- Al-Khaiat, H., ve Haque, M. N. (1998). Effect of initial curing on early strength and physical properties of a lightweight concrete. *Cement and concrete research*, 28(6), 859-866.
- Almeshal, I., Tayeh, B. A., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., ve Mohamed, A. M. (2020). Eco-friendly concrete containing recycled plastic as partial replacement for sand. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 4631-4643. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.090>
- A.O. Sojobi ve H.I. Owamah (2014). Evaluation of suitability of low (C. 33, Sayı 3).
- Arioz, O. (2007). Effects of elevated temperatures on properties of concrete. *Fire Safety Journal*, 42(8), 516-522. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2007.01.003>
- Ashad, H., Ismail, M. S., Utina, T., Burhanuddin, M. S., Masdiana, ve Diana, R. (2023). STUDY ON EXPERIMENTAL BEHAVIOUR OF CONCRETE WITH TOOTHBRUSH PLASTIC WASTE AS COARSE AGGREGATE. *International Journal of GEOMATE*, 25(112), 131-138. <https://doi.org/10.21660/2023.112.4182>
- Bachtiar, E., Mustaan, Jumawan, F., Artayani, M., Tahang, Rahman, M. J., Setiawan, A., ve Ihsan, M. (2020). Examining polyethylene terephthalate (Pet) as artificial coarse aggregates in concrete. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 6(12), 2416-2424. <https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091626>
- Badache, A., Benosman, A. S., Senhadji, Y., ve Mouli, M. (2018). Thermo-physical and mechanical characteristics of sand-based lightweight composite mortars with recycled high-density polyethylene (HDPE). *Construction and Building Materials*, 163, 40-52. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.069>

- Bahij, S., Omary, S., Feugeas, F., ve Faqiri, A. (2020). Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste – A review. *Waste Management*, 113, 157-175. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2020.05.048>
- Bamigboye, G. O., Tarverdi, K., Umoren, A., Bassey, D. E., Okorie, U., ve Adediran, J. (2021). Evaluation of eco-friendly concrete having waste PET as fine aggregates. *Cleaner Materials*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100026>
- Basha, S. I., Ali, M. R., Al-Dulaijan, S. U., ve Maslehuddin, M. (2020). Mechanical and thermal properties of lightweight recycled plastic aggregate concrete. *Journal of Building Engineering*, 32, 101710.
- Batayneh, M., Marie, I., ve Asi, I. (2007). Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste Management*, 27(12), 1870-1876. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.026>
- Behera, D., Liu, K.-Y., Rachman, F., ve Worku, A. M. (2025). Innovations and applications in lightweight concrete: review of current practices and future directions. *Buildings*, 15(12), 2113.
- Belmokaddem, M., Mahi, A., Senhadji, Y., ve Pekmezci, B. Y. (2020). Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate. *Construction and Building Materials*, 257. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119559>
- Beytekin, H. E., Kaya, Y., Mardani, A., ve Sezer, F. Ş. (2025). Improving fire resistance of lightweight concrete facade elements by using fibers. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 25(2), 70.
- Bhardwaj, B., ve Kumar, P. (2017). Waste foundry sand in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 156, 661-674. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.010>
- Biskri, Y., Babouri, L., Benzerara, M., Anas, S. M., Dehas, O., Saidani, M., ve Belouettar, R. (2024). Mitigating high-temperature vulnerabilities in concrete: utilizing waste plastic fibers for enhanced mechanical resilience and environmental sustainability. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(7), 252. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01571-w>
- Blanco, I., Ingrao, C., ve Siracusa, V. (2020). Life-Cycle Assessment in the Polymeric Sector: A Comprehensive Review of Application Experiences on the Italian Scale. *Polymers*, 12(6), 1212. <https://doi.org/10.3390/polym12061212>
- Botchway, D. N.-L., Bentil, J., ve Henaku, C. Y. (2022). Effect of Partial Replacement of Coarse Aggregate with Electronic Waste Plastic in Light Weight Concrete. *Journal of Management Science ve Engineering Research*, 5(2), 38-44. <https://doi.org/10.30564/jmser.v5i2.4801>

- Bouvet de Maisonneuve, C., Bachmann, O., ve Burgisser, A. (2009). Characterization of juvenile pyroclasts from the Kos Plateau Tuff (Aegean Arc): Insights into the eruptive dynamics of a large rhyolitic eruption. *Bulletin of Volcanology*, 71(6), 643-658. <https://doi.org/10.1007/s00445-008-0250-x>
- Cao, Y., Wang, Y., Zhang, Z., ve Wang, H. (2022). Recycled sand from sandstone waste: A new source of high-quality fine aggregate. *Resources, Conservation and Recycling*, 179, 106116. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106116>
- Cavalline, T. L., Castrodale, R. W., Freeman, C., ve Wall, J. (2017). Impact of Lightweight Aggregate on Concrete Thermal Properties. *ACI Materials Journal*, 114(6).
- Celik, K., Jackson, M. D., Mancio, M., Meral, C., Emwas, A.-H., Mehta, P. K., ve Monteiro, P. J. M. (2014). High-volume natural volcanic pozzolan and limestone powder as partial replacements for portland cement in self-compacting and sustainable concrete. *Cement and Concrete Composites*, 45, 136-147. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.003>
- Choi, Y.-W., Moon, D.-J., Chung, J.-S., ve Cho, S.-K. (2005). Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 776-781. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.014>
- Colangelo, F., Cioffi, R., Liguori, B., ve Iucolano, F. (2016). Recycled polyolefins waste as aggregates for lightweight concrete. *Composites Part B: Engineering*, 106, 234-241. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.041>
- Copetti Callai, S., Tataranni, P., De Rose, M., Natali Murri, A., Vaiana, R., ve Sangiorgi, C. (2022). A Preliminary Laboratory Evaluation of Artificial Aggregates from Alkali-Activated Basalt Powder. *Sustainability (Switzerland)*, 14(24). <https://doi.org/10.3390/su142416653>
- Da Costa, J. P., Santos, P. S. M., Duarte, A. C., ve Rocha-Santos, T. (2016). (Nano) plastics in the environment—sources, fates and effects. *Science of the total environment*, 566, 15-26.
- Da Silva, A. M., De Brito, J., ve Veiga, R. (2014). Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars. *Construction and Building Materials*, 71, 226-236.
- Dehghan, A., Peterson, K., ve Shvarzman, A. (2017). Recycled glass fiber reinforced polymer additions to Portland cement concrete. *Construction and Building Materials*, 146, 238-250. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.011>
- Dharmaraj, R., ve Iyappan, G. (2016). Suitability of Partial Replacement of Pulverized Plastic as Fine Aggregate in Cement Concrete. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(23). <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i23/95856>

- Faraj, R. H., Hama Ali, H. F., Sherwani, A. F. H., Hassan, B. R., ve Karim, H. (2020). Use of recycled plastic in self-compacting concrete: A comprehensive review on fresh and mechanical properties. *Journal of Building Engineering*, 30, 101283. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101283>
- Ferreira, L., de Brito, J., ve Saikia, N. (2012). Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate. *Construction and Building Materials*, 36, 196-204. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.098>
- Gaurav, G., Kotoky, N., Jittin, V., ve Bahurudeen, A. (2023). Performance assessment of recycled aggregate concrete and its variability. *Structural Concrete*, 24(5), 6239-6250. <https://doi.org/10.1002/suco.202200794>
- Gesoglu, M., Güneyisi, E., Hansu, O., Etili, S., ve Alhassan, M. (2017). Mechanical and fracture characteristics of self-compacting concretes containing different percentage of plastic waste powder. *Construction and Building Materials*, 140, 562-569. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.139>
- Govind, M., Dhanani, V., Priyank, M., ve Bhimani, D. (2016). Effect of Use Plastic Aggregates as Partial Replacement of Natural Aggregates in Concrete with Plastic Fibres. *International Research Journal of Engineering and Technology*. www.irjet.net
- Gravina, R. J., Xie, T., Bennett, B., ve Visintin, P. (2021). HDPE and PET as Aggregate Replacement in Concrete: Life-cycle assessment, Material Development and a case study. *Journal of Building Engineering*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103329>
- Guendouz, M., Debieb, F., Kadri, E.-H., Guendouz, M., Debieb, F., Boukendakdji, O., Kadri, E. H., Bentchikou, M., ve Soualhi, H. (2016). Use of plastic waste in sand concrete. *J. Mater. Environ. Sci*, 7(2), 382-389. <https://www.researchgate.net/publication/298076109>
- Güçlüer, K. (2021). An investigation of the effect of different aggregate types on concrete properties with thin section and nondestructive methods. *Journal of Engineering Research (Kuwait)*, 9(3), 15-24. <https://doi.org/10.36909/jer.v9i3B.9733>
- H. Hussein, H., A. Eedan, O., ve K. Ahmed, M. (2017). Mechanical, thermal and acoustical properties of concrete with fine Polyvinyl chloride (PVC). *Iraqi Journal of Civil Engineering*, 11(2), 81-91. <https://doi.org/10.37650/ijce.2017.138565>
- Habib, M. Z., Alom, M. M., ve Hoque, M. M. (2017). Concrete production using recycled waste plastic as aggregate. *İçinde Journal of Civil Engineering (IEB) (C. 45, Sayı 1)*.
- Hannawi, K., Kamali-Bernard, S., ve Prince, W. (2010). Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste Management*, 30(11), 2312-2320. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.028>

- Hossain, M. B., Bhowmik, P., ve Shaad, K. M. (2016). Use of waste plastic aggregation in concrete as a constituent material. *Çinde Progressive Agriculture (C. 27, Sayı 3)*.
- Huo, Y., Huang, J., Han, X., Sun, H., Liu, T., Zhou, J., ve Yang, Y. (2023). Mass GGBFS concrete mixed with recycled aggregates as alkali-active substances: Workability, temperature history and strength. *Materials*, 16(16), 5632.
- Ibañez, C., Romero, M. L., Espinos, A., Portolés, J. M., ve Albero, V. (2017). Ultra-high Strength Concrete on Eccentrically Loaded Slender Circular Concrete-filled Dual Steel Columns. *Structures*, 12, 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2017.07.005>
- İpek, S., Diri, A., ve Mermerdaş, K. (2021). Recycling the low-density polyethylene pellets in the pervious concrete production. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(1), 272-287. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01127-x>
- Islam, M. J. (2022). Comparative Study of Concrete With Polypropylene and Polyethylene Terephthalate Waste Plastic as Partial Replacement of Coarse Aggregate. *Advances in Civil Engineering*, 2022(1). <https://doi.org/10.1155/2022/4928065>
- Islam, M. J., Meherier, M. S., ve Islam, A. K. M. R. (2016). Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and harden properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 125, 946-951. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.128>
- Islam, M. J., ve Shahjalal, M. (2021). Effect of polypropylene plastic on concrete properties as a partial replacement of stone and brick aggregate. *Case Studies in Construction Materials*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00627>
- Islam, Md. J., Shahjalal, Md., ve Haque, N. M. A. (2022). Mechanical and durability properties of concrete with recycled polypropylene waste plastic as a partial replacement of coarse aggregate. *Journal of Building Engineering*, 54, 104597. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104597>
- Jadhav, S., Desai, P., Patil, A., Kumbhar, V., Patil, B., Thorat, S., ve Kumbhar, A. (2022). Study of concrete by total replacement of coarse aggregate with recycled plastic waste or low density poly-ethylene (LDPE) 10%, 20%. *International Research Journal of Engineering and Technology*. www.irjet.net
- Javadabadi, M. T., Kristiansen, D. D. L., Redie, M. B., ve Baghban, M. H. (2019). Sustainable concrete: A review. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 8(2), 126-132.
- Jiang, Y., ve Xia, Q. (2011). Hydration of water entrained cement paste under saturated condition. *Applied Mechanics and Materials*, 44-47, 2249-2253. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.44-47.2249>
- Jibrin et al. (2017). Use of Waste Plastics in Cement-Based Composite for Lightweight Concrete Production. <http://www.ijretjournal.org>

- Jnr, A. K.-L., Yunana, D., Kamsouloum, P., Webster, M., Wilson, D. C., ve Cheeseman, C. (2018). Recycling waste plastics in developing countries: Use of low-density polyethylene water sachets to form plastic bonded sand blocks. *Waste management*, 80, 112-118.
- Juki, M. I., Awang, M., Annas, M. M. K., Boon, K. H., Othman, N., binti Abdul Kadir, A., Roslan, M. A., ve Khalid, F. S. (2013). Relationship between Compressive, Splitting Tensile and Flexural Strength of Concrete Containing Granulated Waste Polyethylene Terephthalate (PET) Bottles as Fine Aggregate. *Advanced Materials Research*, 795, 356-359. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.795.356>
- KA, S. (2021). Proportional Examination of Pf Mechanical Composition of Concrete Produced with Washed and Unwashed Gravel. *Current Trends in Civil ve Structural Engineering*, 7(1). <https://doi.org/10.33552/ctcse.2021.07.000652>
- Kandiri, A., Sartipi, F., ve Kioumars, M. (2021). Predicting compressive strength of concrete containing recycled aggregate using modified ann with different optimization algorithms. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(2), 1-19. <https://doi.org/10.3390/app11020485>
- Karthika, R. B., Vidyapriya, V., Sri, K. V. N., Beaula, K. M. G., Harini, R., ve Sriram, M. (2021). Experimental study on lightweight concrete using pumice aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1606-1613.
- Kilinçarslan, S. (2015). Investigation of heavy concretes produced with heavy artificial aggregates. *Acta Physica Polonica A*, 128(2), 469-470. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.128.B-469>
- Kou, S. C., Lee, G., Poon, C. S., ve Lai, W. L. (2009). Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. *Waste Management*, 29(2), 621-628. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.014>
- Kumar, R., Kumar, M., Kumar, I., ve Srivastava, D. (2020). A review on utilization of plastic waste materials in bricks manufacturing process. *Materials Today: Proceedings*, 46, 6775-6780. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.337>
- Li, L. Y. (2017). Editorial: Fire safety engineering design of concrete structures. *Çinde Magazine of Concrete Research (C. 69, Sayı 7, ss. 325-326)*. ICE Publishing. <https://doi.org/10.1680/jmacr.2017.69.7.325>
- Li, W., Lin, X., Bao, D. W., ve Min Xie, Y. (2022). A review of formwork systems for modern concrete construction. *Çinde Structures (C. 38, ss. 52-63)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.089>
- Liguori, B., Iucolano, F., Capasso, I., Lavorgna, M., ve Verdolotti, L. (2014). The effect of recycled plastic aggregate on chemico-physical and functional properties of composite mortars. *Materials ve Design*, 57, 578-584. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.006>

- Liu, R., ve Yan, P. (2013). Study on hydration degree of portland cement-slag complex binders. *Key Engineering Materials*, 539, 172-177. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.539.172>
- Meng, J., Xu, Z., Liu, Z., Chen, S., Wang, C., Zhao, B., ve Zhou, A. (2022). Experimental Study on the Mechanics and Impact Resistance of Multiphase Lightweight Aggregate Concrete. *Sustainability (Switzerland)*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/su14159606>
- Mohamed, S. H., Asran, A. G., Noman, M. T., ve Azim, M. A. (2022). Properties of structural lightweight high strength self-compacting concrete. *International Journal of GEOMATE*, 23(96), 50–60. <https://doi.org/10.21660/2022.96.3292>
- Mohamedsalih, M. A., Radwan, A. E., Alyami, S. H., ve Abd El Aal, A. K. (2024). The use of plastic waste as replacement of coarse aggregate in concrete industry. *Sustainability*, 16(23), 10522.
- Mohammed, A. A., Mohammed, I. I., ve Mohammed, S. A. (2019). Some properties of concrete with plastic aggregate derived from shredded PVC sheets. *Construction and Building Materials*, 201, 232-245. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.145>
- Mohan, A., Karthika, S., Ajith, J., ve Tholkapiyan, M. (2020). Investigation on ultra high strength slurry infiltrated multiscale fibre reinforced concrete. *Materials Today: Proceedings*, 22, 904-911.
- Monteiro, P. (2006). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Publishing.
- Monteiro, P. J. M., Miller, S. A., ve Horvath, A. (2017). Towards sustainable concrete. *Nature materials*, 16(7), 698-699.
- Moreno, D., Martinez, P., ve Lopez, M. (2014). Practical approach for assessing lightweight aggregate potential for concrete performance. *ACI Materials Journal*, 111(2), 123.
- Muhammad Riski, Febrina Dian Kurniasari, ve Bunyamin. (2021). The Effect of Mixing Natural Aggregates with Artificial Aggregates on Marshall Parameters. *Jurnal Inotera*, 6(1), 10-19. <https://doi.org/10.31572/inotera.vol6.iss1.2021.id135>
- Mustafa, M. A. T., Hanafi, I., Mahmoud, R., ve Tayeh, B. A. (2019). Effect of partial replacement of sand by plastic waste on impact resistance of concrete: experiment and simulation. *Structures*, 20, 519-526. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.06.008>
- Nadigatla, N. K. (2023). Experimental investigation and comparison between demolished aggregates and original aggregates. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, 7(10), 1–11. <https://doi.org/10.55041/ijsrem25950>

- Nayanathara Thathsarani Pilapitiya, P. G. C., ve Ratnayake, A. S. (2024). The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*, 11, 100220.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete* (vol. 4): Longman london.
- Nili, M., Sasanipour, H., ve Aslani, F. (2019). The effect of fine and coarse recycled aggregates on fresh and mechanical properties of self-compacting concrete. *Materials*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/ma12071120>
- Özkan, H., Kabay, N., ve Miyan, N. (2022). Properties of Cold-Bonded and Sintered Aggregate Using Washing Aggregate Sludge and Their Incorporation in Concrete: A Promising Material. *Sustainability (Switzerland)*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/su14074205>
- Özkılıç, Y. O., Karalar, M., Aksoylu, C., Beskopylny, A. N., Stel'makh, S. A., Shcherban, E. M., Qaidi, S., da SA Pereira, I., Monteiro, S. N., ve Azevedo, A. R. G. (2023). Shear performance of reinforced expansive concrete beams utilizing aluminium waste. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 5433-5448.
- Pasha, M. S., Aslam, M. F., Hamza, M., Bilal, M., Tammar, M., ve Khan, F. (2025). Fire-resistant and eco-friendly concrete: investigating HDPE plastic and silica fume as partial replacements. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 11(1), 11. <https://doi.org/10.1007/s41024-025-00687-5>
- Petrounias, P., Giannakopoulou, P. P., Rogkala, A., Stamatis, P. M., Tsikouras, B., Papoulis, D., Lampropoulou, P., ve Hatzipanagiotou, K. (2018). The influence of alteration of aggregates on the quality of the concrete: A case study from serpentinites and andesites from central Macedonia (North Greece). *Geosciences (Switzerland)*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/geosciences8040115>
- Pimentel. (2022). *Plastics statistics: production, recycling, and market data. İçinde Recycled materials for construction applications: plastic products and composites* (ss. 103-113). Springer.
- Rahim, N. L., Salehuddin, S., Ibrahim, N. M., Amat, R. C., ve Ab Jalil, M. F. (2013). Use of plastic waste (high density polyethylene) in concrete mixture as aggregate replacement. *Advanced Materials Research*, 701, 265-269. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.701.265>
- Rahim, N. L., Sallehuddin, S., Ibrahim, N. M., Amat, R. C., ve Ab Jalil, M. F. (2013). Use of Plastic Waste (High Density Polyethylene) in Concrete Mixture as Aggregate Replacement. *Advanced Materials Research*, 701, 265-269. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.701.265>
- Rahmani, E., Dehestani, M., Beygi, M. H. A., Allahyari, H., ve Nikbin, I. M. (2013). On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*, 47, 1302-1308. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041>

- Rai, B., Rushad, S. T., Kr, B., ve Duggal, S. K. (2012). Study of Waste Plastic Mix Concrete with Plasticizer. *ISRN Civil Engineering*, 2012, 1-5. <https://doi.org/10.5402/2012/469272>
- Ruiz-Herrero, J. L., Velasco Nieto, D., López-Gil, A., Arranz, A., Fernández, A., Lorenzana, A., Merino, S., De Saja, J. A., ve Rodríguez-Pérez, M. Á. (2016). Mechanical and thermal performance of concrete and mortar cellular materials containing plastic waste. *Construction and Building Materials*, 104, 298-310. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.005>
- Sadromomtazi, A., Dolati-Milehsara, S., Lotfi-Omran, O., ve Sadeghi-Nik, A. (2016). The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2363-2373. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.107>
- Saikia, N., ve 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.
- Saikia, N., ve de Brito, J. (2014). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*, 52, 236-244. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049>
- Sanusi, A., Ndububa, E. E., Amuda, A. G., Obianyo, I. I., Ahmed, A., Adeleke, W. A., Gunat, M. B., Abidemi, S. O., ve Mambo, A. D. (2026). Replacing river sand in concrete: a review of emerging sustainable fine aggregate materials. *Discover Sustainability*.
- Saremi, S., ve Goulias, D. (2023). Non-Destructive Testing in Concrete Maturity Modeling and Master Curve Development. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/app13137770>
- Sbahieh, S., McKay, G., ve Al-Ghamdi, S. G. (2023). Comprehensive analysis of geopolymer materials: Properties, environmental impacts, and applications. *Materials*, 16(23), 7363.
- Senhadji, Y., Siad, H., Escadeillas, G., Benosman, A. S., Chihaoui, R., Mouli, M., ve Lachemi, M. (2019). Physical, mechanical and thermal properties of lightweight composite mortars containing recycled polyvinyl chloride. *Construction and Building Materials*, 195, 198-207. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.070>
- Shubbar, S. D. A. & Al-Shadeedi, A. S. (2017). Utilization of waste plastic bottles as fine aggregate in concrete. *Kufa Journal of Engineering*, 8(2).
- Silva, R. V, de Brito, J., ve Saikia, N. (2013). Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste

- aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 23-31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.017>
- Sojobi, A. O. & Owamah, H. I. (2014). Evaluation of the suitability of low-cost materials for sustainable waste management. *Nigerian Journal of Technology*, 33(3).
- Stratoura, M., Iaz, D. R., ve Badogiannis, E. (2018). Chloride Penetration in Lightweight Aggregate Mortars Incorporating Supplementary Cementing Materials. *Advances in Civil Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9759167>
- Suganthy, P., Chandrasekar, D., Kumar K, S. P., ve Professor, A. (t.y.). Utilization of pulverized plastic in cement concrete as fine aggregate. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*.
- Tamil Selvi, M., Dasarathy, A. K., ve Ponkumar Ilango, S. (2021). Mechanical properties on light weight aggregate concrete using high density polyethylene granules. *Materials Today: Proceedings*, 81(2), 926-930. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.302>
- Tayeh, B. A., Almeshal, I., Magbool, H. M., Alabduljabbar, H., ve Alyousef, R. (2021). Performance of sustainable concrete containing different types of recycled plastic. *Journal of Cleaner Production*, 328, 129517. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129517>
- Thienel, K.-C., Haller, T., ve Beuntner, N. (2020). Lightweight concrete—From basics to innovations. *Materials*, 13(5), 1120.
- Thorneycroft, J., Orr, J., Savoikar, P., ve Ball, R. J. (2018). Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. *Construction and Building Materials*, 161, 63-69.
- Toktamış, D. (2023). Thermoluminescence in pumice stone collected from the Mediterranean coast. *Luminescence*, 38(3), 318-325. <https://doi.org/10.1002/bio.4452>
- Topçu, İ. B. (1997). Semi lightweight concretes produced by volcanic slags. *Cement and concrete research*, 27(1), 15-21.
- Turner, S., Graham, E., Macphail, R., Duncan, L., Rose, N. L., Yang, H., Whittet, R., ve Rosique-Esplugas, C. (2021). Mercury enrichment in anthrosols and adjacent coastal sediments at a Classic Maya site, Marco Gonzalez, Belize. *Geoarchaeology*, 36(6), 875-896. <https://doi.org/10.1002/gea.21868>
- Vivek, S., Hari Krishna, P., ve Gunneswara Rao, T. D. (2023). A study on the mechanical behavior of concrete made with partial replacement of fine aggregate with waste plastic (LDPE). *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.059>

- Wang, H., Shu, L., Ma, K., ve He, X. (2024). Durability Improvement of Pumice Lightweight Aggregate Concrete by Incorporating Modified Rubber Powder with Sodium Silicate. *Materials*, 17(4). <https://doi.org/10.3390/ma17040786>
- Wattanachai, P., Otsuki, N., Saito, T., ve Nishida, T. (2009). A study on chloride ion diffusivity of porous aggregate concretes and improvement method.
- Záleská, M., Pavlíková, M., Pokorný, J., Jankovský, O., Pavlík, Z., ve Černý, R. (2018). Structural, mechanical and hygrothermal properties of lightweight concrete based on the application of waste plastics. *Construction and Building Materials*, 180, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.250>
- Zalhaf, N., Altobgy, M. A., ve Zakaria, M. H. (2025). Mechanical and post-fire properties of sustainable concrete containing recycled PET and aluminum fibers. *Construction and Building Materials*, 483, 141783. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141783>
- Zeyad, A. M. (2023). Sustainable concrete Production: Incorporating recycled wastewater as a green building material. *Construction and Building Materials*, 407, 133522.
- Zulkarnain, F., ve Ramli, M. (2008). Durability performance of lightweight aggregate concrete for housing construction. *Proceedings from ICBEDC*, 8, 541-551.