



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON
AGREGALARININ BOYUT VE
DAYANIMININ BETON DAVRANIŞI
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Mohamed Abdikarin MOHAMUD

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Nisan-2026
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mohamed Abdikarin MOHAMUD tarafından hazırlanan “Geri Dönüştürülmüş Beton Agregalarının Boyut ve Dayanımının Beton Davranışı Üzerindeki Etkileri” 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 çalışma, Necmettin Erbakan Üniversitesi tarafından 24YL19005 kodlu proje kapsamında 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.

İmza

Mohamed Abdikarin MOHAMUD

Tarih: Nisan-2026

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON AGREGALARININ BOYUT VE DAYANIMININ BETON DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Mohamed Abdikarin MOHAMUD

NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Doç. Dr. Yasin Onuralp ÖZKILIÇ

2026, 100 Sayfa

Jüri

Danışman: Doç. Dr. Yasin Onuralp ÖZKILIÇ
Dr. Öğr. Üyesi Nebi ÖZDÖNER
Prof. Dr. Sadık Alper YILDIZEL

Bu çalışma, farklı dayanım sınıflarına ve tane boyutlarına sahip geri dönüştürülmüş beton agregalarının (GDBA) betonun mekanik ve yapısal davranışı üzerindeki etkilerini incelemektedir. Geleneksel malzeme ölçekli deneylere ek olarak, GDBA içeren betonarme döşeme numunelerinin performansı yüksek sıcaklık koşulları altında değerlendirilmiştir. Farklı dayanım seviyelerine sahip betonlardan elde edilen ve farklı tane boyutu fraksiyonlarına ayrılan geri dönüştürülmüş agregalar kullanılarak kapsamlı bir deney programı yürütülmüştür. Bu agregalar, farklı ikame oranlarında doğal agregaların kısmi ikamesi olarak kullanılmıştır. Betonun mekanik özellikleri; basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı deneyleri ile değerlendirilmiştir. Ayrıca, betonarme döşeme numuneleri 150 °C ile 600 °C arasındaki sıcaklıklarda test edilerek yük-deplasman davranışı, hasar türleri ve termal tepkileri incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, GDBA içeriğinin artmasının genel olarak mekanik özelliklerde azalmaya yol açtığını göstermektedir. Bu durum, geri dönüştürülmüş agregaların daha yüksek gözenekliliğe sahip olması ve daha zayıf ara yüz geçiş bölgeleri oluşturması ile ilişkilendirilmektedir. Bununla birlikte, orta düzeyde GDBA ikame oranına sahip betonların (yaklaşık %30–50'ye kadar) yapısal uygulamalar için kabul edilebilir mekanik performans sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca, GDBA'nın tane boyutu ve kaynak beton dayanımının beton davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, daha yüksek kaliteli kaynak agregaların daha iyi performans sağladığı tespit edilmiştir. Yapısal ölçekte ise, döşeme numunelerinde GDBA oranı ve sıcaklık artışı ile birlikte yük taşıma kapasitesi ve rijitlikte azalma gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisi altında daha büyük deplasmanlar, daha düşük maksimum yük değerleri ve artan çatlak yayılımı meydana gelmiştir. Termal görüntüleme analizleri, özellikle yüksek GDBA içeriğine sahip döşemelerde homojen olmayan sıcaklık dağılımları ve belirgin termal gradyentler oluştuğunu ortaya koymuş; bu durumun iç hasar mekanizmalarını hızlandırarak performans bozulmasına katkıda bulunduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, uygun ikame oranları ve malzeme özellikleri dikkate alındığında geri dönüştürülmüş beton agregalarının yapısal beton üretiminde etkin bir şekilde kullanılabileceği doğrulanmıştır. Bu çalışma, yüksek sıcaklık koşulları altında dahi kabul edilebilir mekanik ve yapısal performansın korunabileceğini göstererek, sürdürülebilir inşaat uygulamalarında GDBA kullanımının önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Geri Dönüştürülmüş Beton Agregası, Yapısal Davranış, Yüksek Sıcaklık, Betonarme Döşemeler, Mekanik Özellikler

ABSTRACT

MS THESIS

EFFECTS OF THE SIZE AND STRENGTH OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATES ON CONCRETE BEHAVIOR

Mohamed Abdikarin MOHAMUD

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

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Yasin Onuralp ÖZKILIÇ
2026, 100 Pages**

Jury

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Yasin Onuralp ÖZKILIÇ
Asst. Prof. Dr. Nebi ÖZDÖNER
Prof. Dr. Sadık Alper YILDIZEL**

This study investigates the effects of recycled concrete aggregates (GDBA), characterized by different strength classes and particle size distributions, on the mechanical and structural behavior of concrete. In addition to conventional material-scale tests, the performance of reinforced concrete slab specimens incorporating GDBA was evaluated under elevated temperature conditions. A comprehensive experimental program was conducted using GDBA obtained from concretes of varying strength levels and processed into distinct size fractions. These aggregates were used as partial replacements for natural aggregates at different substitution ratios. The mechanical properties of concrete were assessed through compressive strength, splitting tensile strength, and flexural strength tests. Furthermore, reinforced concrete slab specimens were subjected to temperatures ranging from 150 °C to 600 °C to examine their load–displacement behavior, failure modes, and thermal response.

The results indicate that increasing the GDBA content generally leads to a reduction in mechanical properties due to the higher porosity and weaker interfacial transition zones associated with recycled aggregates. However, concrete mixtures with moderate GDBA replacement levels (up to 30–50%) demonstrated acceptable mechanical performance for structural applications. Additionally, the particle size and source strength of GDBA were found to significantly influence concrete behavior, with higher-quality source aggregates yielding improved performance. At the structural level, slab specimens exhibited a decrease in load-carrying capacity and stiffness with increasing GDBA content and temperature. Elevated temperatures resulted in larger deflections, lower peak loads, and more pronounced crack propagation. Thermal imaging analysis revealed non-uniform temperature distributions and significant thermal gradients, particularly in slabs with higher GDBA content, contributing to accelerated internal damage and performance degradation.

Overall, the findings confirm that recycled concrete aggregates can be effectively utilized in structural concrete when appropriate replacement ratios and material characteristics are considered. This study highlights the potential of GDBA to support sustainable construction practices while maintaining satisfactory mechanical and structural performance, even under elevated temperature conditions.

Keywords: Recycled Concrete Aggregate, Structural Behavior, Elevated Temperature, Reinforced Concrete Slabs, Mechanical Properties.

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yürütülen çalışmalar kapsamında hazırlanmıştır. Bu çalışma süresince bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, her aşamada desteklerini esirgemeyen değerli danışmanım Doç. Dr. Yasin Onuralp ÖZKILIÇ'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Akademik bakış açımı geliştirmemde ve araştırma sürecini doğru şekilde yönetmemde sağladığı katkılar benim için son derece kıymetlidir.

Ayrıca, tez çalışmam süresince deneysel çalışmaların yürütülmesinde ve laboratuvar süreçlerinde destek olan değerli arkadaşlarım Fatih Yılmaz, Osman Ahmed, Umiye ve Mohamed Ahmed Soumbourou'ya teşekkür ederim. Bu çalışmanın ortaya çıkmasında gösterdikleri katkı ve iş birliği benim için çok değerlidir.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini her zaman hissettiğim aileme, sabırları ve inançları için teşekkür ederim. Onların desteği olmadan bu süreci tamamlamak mümkün olmazdı.

Son olarak, bu çalışmanın sürdürülebilir inşaat uygulamalarına ve geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımına katkı sağlamasını temenni ederim.

Mohamed Abdikarin MOHAMUD
KONYA-2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Deneysel Çalışmalar	4
2.2. GDBA ve DA'nın Fiziksel Özellikleri	6
2.3. Taze Beton Özellikleri	7
2.3.1. İşlenebilirlik	7
2.3.2. Yoğunluk	10
2.4. Mekanik Özellikler	12
2.4.1. Basınç dayanımı.....	12
2.4.2. Yarmada çekme dayanımı	17
2.4.3. Eğilme dayanımı	21
2.5. GDB Döşemeleri.....	24
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	28
3.1. Mekanik Özellikler Deneyleri	28
3.1.1. Kullanılan malzemeler	28
3.1.2. Beton karışımları.....	30
3.1.3. Numune hazırlama ve test yöntemleri	32
3.2. Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı	34
3.2.1. Küp numuneler	34
3.2.2. Beton karışım oranları	35
3.3. Döşeme Deneyleri.....	37
3.3.1. Beton karışım oranları	37
3.3.2. Döşeme numunesi detayları.....	38
3.3.3. Numune hazırlama ve test yöntemleri	40
3.3.4. Deney matrisi	41
3.3.5. Yüksek sıcaklık deneyleri	42
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	44
4.1. Mekanik Özellikler Sonuçları	44
4.1.1. Basınç dayanımı sonuçları	44
4.1.2. Yarmada çekme dayanımı sonuçları	49
4.1.3. Eğilme mukavemeti sonuçları	55

4.2. Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı	58
4.3. Döşeme Numunelerinin Davranışı.....	62
4.3.2. Döşeme numunelerinin göçme türleri.....	65
4.3.3. Termal dağılım ve sıcaklık etkisi.....	68
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	70
5.1. Mekanik Özellikler Deneyleri	70
5.2. Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı	71
5.3. Döşeme Deneyleri.....	71
6. KAYNAKLAR	73



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 1. Geri Dönüştürülmüş Agrega	2
Şekil 2. 1. GDBA'lı Betonun Yoğunluk.....	12
Şekil 2. 3. GDBA'lı Betonun Basınç Dayanımı	17
Şekil 2. 5. GDBA'lı Betonun Yarmada Çekme Dayanımı	21
Şekil 2. 7. GDBA'lı Betonun Eğilme Dayanımı	24
Şekil 3. 1. Farklı beton sınıflarından elde edilen geri dönüştürülmüş beton agregaları. 29	
Şekil 3. 2. GDBA ve DA tane boyutu dağılım eğrileri.....	30
Şekil 3. 3. (a) Basınç Dayanımı. (b) Yarma Çekme Dayanımı. (c) Eğilme Dayanımı. . 33	
Şekil 3. 4. Seri 1 – Hazırlanmış Beton Numuneler	33
Şekil 3. 5. Seri 2 – Hazırlanmış Beton Numuneler	33
Şekil 3. 6. Seri 3 – Hazırlanmış Beton Numuneler	34
Şekil 3. 7. Fırın içerisine yerleştirilen beton küp numuneleri.	36
Şekil 3. 8. Isıtma öncesi GDB küpü.	37
Şekil 3. 9. Isıtma sonrası GDB küpü.	37
Şekil 3. 10. Döşeme numunelerine ait detaylar: (a) Donatı yerleşimi ve geometrik boyutla, (b) Beton dökümü öncesinde kalıp içerisindeki donatı yerleşimi.....	39
Şekil 3. 11. Deney düzeneği fotoğrafı	41
Şekil 3. 12. Deney programında kullanılan betonarme döşeme numuneleri.....	42
Şekil 3. 13. Döşeme numunelerinin tek yüzeyden ısıtılması için kullanılan deney düzeneği.	43
Şekil 4. 1. Seri 1 (C13, C15, C25 ve C50) için basınç dayanımı sonuçları.....	47
Şekil 4. 2. Seri 2 İnce GDBA (C13-C, C15-C ve C25-C) için basınç dayanımı sonuçları.	48
Şekil 4. 3. Seri 2 İri GDBA (C13-C, C15-C ve C25-C) için basınç dayanımı sonuçları.	48
Şekil 4. 4. Seri 2 çakıl GDBA (C13-G, C15-G ve C25-G) için basınç dayanımı sonuçları.....	48
Şekil 4. 5. Seri 2 ince GDBA (C5-F ve C10-F) için basınç dayanımı sonuçları.....	49
Şekil 4. 6. İri GDBA (C5 -C ve C10-C) kullanılarak seri 3 için basınç dayanımı sonuçları.....	49
Şekil 4. 7. Seri 1 (C13, C15, C25 ve C50) için yarmada çekme dayanımı sonuçları.....	53
Şekil 4. 8. İnce GDBA (C13-F, C15-F ve C25-F) için yarmada çekme dayanımı sonuçları.....	54
Şekil 4. 9. Seri 2 İri GDBA (C13-C, C15-C ve C25-C) için yarmada çekme dayanımı sonuçları.....	54
Şekil 4. 10. Seri 2 çakıl GDBA (C13-G, C15-G ve C25-G) için yarmada çekme dayanımı sonuçları.....	54
Şekil 4. 11. Seri 2 ince GDBA (C5-F ve C10-F) için yarmada çekme dayanımı sonuçları.....	55
Şekil 4. 12. İri GDBA (C5 -C ve C10-C) kullanılarak seri 3 için yarmada çekme dayanımı sonuçları.....	55
Şekil 4. 13. Seri 1 (C13, C15, C25 ve C50) için eğilme mukavemeti sonuçları.	57
Şekil 4. 14. Seri 1, Seri 2 ve Seri 3'teki tüm beton numunelerin basınçlı kırılma modelleri.	58

Şekil 4. 15. Farklı sıcaklıklarda beton karışımlarının basınç dayanımı.....	61
Şekil 4. 16. Farklı GDB ikame oranlarına sahip beton numunelerinin yüksek sıcaklıklardan sonra basınç kırılma şekilleri.....	61
Şekil 4. 17. Farklı sıcaklıklara maruz kalan %0 GDB içeren döşeme numunelerinin yük deplasman davranışı.....	63
Şekil 4. 18. Farklı sıcaklıklara maruz kalan %10 GDB içeren döşeme numunelerinin yük deplasman davranışı.....	63
Şekil 4. 19. Farklı sıcaklıklara maruz kalan, %20 GDB içeren döşeme numunelerinin yük deplasman davranışı.....	64
Şekil 4. 20. Farklı sıcaklıklara maruz kalan, %30 GDB içeren döşeme numunelerinin yük deplasman davranışı.....	64
Şekil 4. 21. Farklı sıcaklıklara maruz kalan, %40 GDB içeren döşeme numunelerinin yük deplasman davranışı.....	65
Şekil 4. 22. Farklı sıcaklıklara maruz kalan, %50 GDB içeren döşeme numunelerinin yük deplasman davranışı.....	65
Şekil 4. 23. Çeşitli sıcaklıklarda eğilme yüklemesi uygulandıktan sonra farklı geri dönüştürülmüş agrega ikame oranlarına sahip döşeme numunelerinin hasar şekilleri...	67
Şekil 4. 24. Eğilme deneyi sonrasında döşeme numunelerinin genel çatlak desenleri ve hasar dağılımı.....	67
Şekil 4. 25. Farklı geri dönüştürülmüş agrega ikame oranlarına sahip döşeme numunelerinin yüksek sıcaklıklardaki (150–600 °C) termal görüntüleri.	69

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2. 1. GDBA ve DA'nın Temel Fiziksel Özellikler	7
Tablo 2. 2. Geri Dönüştürülmüş Beton Agregasının İşlenebilirliği Üzerine Yapılan Önceki Çalışmaların Sonuçlarının Özeti	8
Tablo 2. 3. GDBA'lı Betonun Basınç Dayanımı Üzerine Yapılan Önceki Çalışmaların Sonuçlarının Özeti	13
Tablo 2. 4. GDBA'lı Betonun Yarmada Çekme Dayanımı Üzerine Yapılan Önceki Çalışmaların Sonuçlarının Özeti	18
Tablo 2. 5. GDBA'nın Eğilme Dayanımı Üzerine Yapılan Önceki Çalışmaların Sonuçlarının	22
Tablo 2. 5 (Devam). GDBA'nın Eğilme Dayanımı Üzerine Yapılan Önceki Çalışmaların Sonuçlarının.....	Error! Bookmark not defined.
Tablo 3. 1. Cem iv/b çimentosunun fiziksel ve mekanik özellikleri.....	29
Tablo 3. 2. Cem iv/b çimentosunun kimyasal özellikleri.....	29
Tablo 3. 3. Seri 1 için Karışım Oranları (GDBA Sınıfları C13, C15, C25, C50).....	31
Tablo 3. 4. Seri 2 için Karışım Oranları (GDBA Sınıfları C13, C15, C25).....	31
Tablo 3. 5. Seri 3 için Karışım Oranları (GDBA Sınıfları C5 ve C10—Çakıl Agregası İçermez)	32
Tablo 3. 6. Beton karışım oranları ve GDBA ikame oranları	35
Tablo 3. 7. Döşeme numunelerinin beton karışım oranları.....	38
Tablo 3. 8. Deney programı ve her karışım için hazırlanan numune sayıları	40
Tablo 3. 9. Yüksek Sıcaklık Deneyi Isıtma Programı.....	43

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

SİMGELER

°C	Sıcaklık
%	Yüzde
MPa	Dayanım birimi
Mt/yıl	Milyon ton/yıl

KISALTMALAR

GDBA	Geri dönüştürülmüş beton agregası
İYA	İnşaat ve yıkıntı atığı
DA	Doğal agregası
DİA	Doğal iri agregası
SP	Süperakışkanlaştırıcı
YASA	Yüksek Aralıklı Su Azaltıcı
SD	Silis Dumanı
VDK	Viskozite Düzenleyici Katkı
HGDBA	Hafif Geri Dönüştürülmüş Beton Agregası
YOSAK	Yüksek Oranda Su Azaltıcı Katkı
HSK	Hava Sürükleyici Katkı
ÖYFC	Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu

1. GİRİŞ

Küresel inşaat sektörü her yıl 12,7 milyar tonu aşan ve 2050 yılına kadar 27 milyar tona ulaşacağı öngörülen büyük miktarda inşaat ve yıkım atığı (İYA) üretmektedir (Peiris vd., 2025). Binaların, yolların ve köprülerin inşası, yenilenmesi ve modernizasyonu günümüzde daha sık gerçekleştirilmekte olup, bu durum küresel ölçekte İYA oluşumunun artmasına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır (Bonifazi vd., 2025). Dünyanın en büyük üç ekonomisi olan Çin, ABD ve Avrupa ülkeleri, İYA üretiminde başı çekmektedir (Demirbaş vd., 2025). Çin yılda yaklaşık 1130 milyon ton, ABD ise 534 milyon ton İYA üretmektedir. Avrupa'nın büyük ekonomilerinden Almanya (200 Mt/yıl), Fransa (246 Mt/yıl) ve İtalya (40 Mt/yıl) ise bölgedeki toplam İYA miktarına kayda değer katkıda bulunmaktadır (Soto-Paz vd., 2023). İYA'nın küresel çevresel etkileri giderek daha ciddi bir sorun haline gelmiştir. Günümüzde birçok ülkede İYA yönetiminde temel yöntem düzenli depolamadır ve dünya genelinde üretilen İYA'nın yaklaşık %35'inin hâlen düzenli depolama sahalarına gönderildiği tahmin edilmektedir (Papamichael vd., 2023).

Beton, sudan sonra dünyada en fazla tüketilen ikinci malzeme olup (Jagadesh vd., 2024) Son yıllarda beton üretimine olan talebin artmasına paralel olarak doğal agregalara yönelik küresel talep de önemli ölçüde yükselmiştir (Fayed, Aksoylu, vd., 2024). Günümüzde yıllık beton üretiminin yaklaşık 25 milyar ton olduğu tahmin edilmektedir. Genellikle doğal kum, çakıl ve kırma taştan elde edilen agregalar, beton hacminin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Ancak inşaat sektörü, toplam atık miktarının yaklaşık %35'ini oluşturan inşaat ve yıkım atıkları (İYA) nedeniyle aynı zamanda en büyük atık üreticisi konumundadır (Piccinalli vd., 2022). Son yirmi yılda, inşaat ve yıkım atıklarından elde edilen geri dönüştürülmüş beton agregalarının (GDBA) yeni beton üretiminde kullanımı giderek daha fazla önem kazanmıştır. Atık miktarının azaltılması ve düzenli depolama alanlarına olan yükün hafifletilmesi, küresel ölçekte çözüm bekleyen önemli çevresel sorunlar arasında yer almaktadır (Singh vd., n.d.).

Geri Dönüştürülmüş Agreganın Tanıtımı

Geri dönüşüm, kullanılmış malzemelerin işlenerek yeniden ürün üretiminde kullanılmasını ifade eder. Gelişmiş ülkelerde geri dönüşüm uygulamaları giderek daha yaygın hâle gelmiş ve özellikle doğal agrega kullanımının azaltılmasına yönelik önemli bir strateji olarak benimsenmiştir. Altyapı faaliyetlerindeki artış nedeniyle doğal agrega kaynaklarına olan talep yükselmiş; bu durum, alternatif ve sürdürülebilir malzemelerin

kullanımını zorunlu kılmıştır. Bu kapsamda, geri dönüştürülmüş agregalar doğal agregalara ikame malzemesi olarak kullanılabilir.

Geri dönüştürülmüş agrega; kullanılmış beton, tuğla, asfalt gibi eski yapı malzemelerinin kırılması, işlenmesi ve uygun şekilde sınıflandırılması sonucunda elde edilen inorganik parçacıklardan oluşur. Bu malzemeler genellikle yıkılmış bina, yol, köprü gibi yapılardan; ayrıca deprem, savaş ve benzeri yıkıcı olaylar sonucu ortaya çıkan inşaat ve yıkım enkazından elde edilmektedir.



Şekil 1. 1. Geri Dönüştürülmüş Agrega

Geri dönüştürülmüş agreganın geri dönüşüm süreci

Geri dönüşüm, kullanılmış malzemelerin işlenerek yeniden değerli ürünlere dönüştürülmesini ifade eder. Beton agregalarının geri dönüşümü süreci; mevcut yapıların veya binaların yıkılmasıyla elde edilen atık betonun, donatı, plastik, ahşap ve benzeri istenmeyen bileşenlerden arındırılması amacıyla çeşitli eleme ve ayıklama işlemlerinden geçirilmesini kapsar. Üretilcek geri dönüştürülmüş beton agreganın (GDBA) hedeflenen kalitesine bağlı olarak kırma, boyutlandırma, ayırma (ön kırma) ve kirleticilerin uzaklaştırılması adımları gerekli kalite sağlanana kadar devam ettirilir.

Yıkılmış betonun işlenmesinde çeneli kırıcılar, darbeli kırıcılar, çekiçli değirmenler ve el tipi kırıcılar gibi farklı tipte kırıcılar kullanılabilir (X. Li, 2008). Kullanılan kırıcı tipi, elde edilen geri dönüştürülmüş agregaların fiziksel ve mekanik

özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Çeneli kırıcılar genellikle büyük boyutlu beton parçalarını daha küçük boyutlara indirgemek için tercih edilirken; darbeli kırıcılar, agregalar üzerinde yapışık halde bulunan çimento hamurunun miktarını azaltma konusunda daha etkilidir (Etxeberria vd., 2007a; Matias vd., 2013). Geri dönüştürülmüş agregalarda istenen kaliteyi elde etmek için malzemenin hem birincil hem de ikincil kırma aşamalarından geçirilmesi gerekmektedir. Her aşamada tercih edilen kırıcı tipi; agrega boyutu, ince malzeme miktarı ve tane şekli gibi hedeflenen özelliklere göre belirlenmektedir.

ABD, Çin, Japonya ve Hollanda gibi gelişmiş ülkelerde kuru kırma yöntemlerine ek olarak çeşitli ıslak işleme teknikleri de geliştirilmiştir. Bu gelişmiş işleme yöntemleri, geri dönüştürülmüş agregalardaki safsızlık oranını azaltarak daha yüksek kalitede agregaların elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Araştırmanın amacı

Bu çalışmanın amacı, farklı dayanım sınıflarına ve partikül boyutlarına sahip geri dönüştürülmüş beton agregalarının (GDBA), doğal agregalar ile kısmi olarak ikame edilmesinin betonun mekanik ve yapısal davranışı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemektir. Bu kapsamda, yapısal beton uygulamaları için optimum ikame oranlarını belirlemek amacıyla, GDBA ikame oranlarının betonun basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Araştırmanın önemi

Bu çalışma, inşaat ve yıkım atıklarının geri kazanımını teşvik ederek doğal kaynak tüketiminin azaltılmasına ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasına katkıda bulunmaktadır. Geri dönüştürülmüş beton agregalarının (GDBA) betonun mekanik ve yapısal davranışı üzerindeki etkilerinin farklı dayanım sınıfları, tane boyutları ve ikame oranları açısından sistematik olarak incelenmesi, literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Ayrıca, bu çalışma kapsamında betonarme döşeme numunelerinin yüksek sıcaklık altındaki davranışının incelenmesi, GDBA içeren betonların gerçek yapı elemanlarındaki performansına ilişkin önemli bilgiler sunmaktadır. Elde edilen bulgular, geri dönüştürülmüş agregaların yapısal beton üretiminde uygun ikame oranları ile güvenli ve etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermekte olup, mühendislik uygulamaları ve sürdürülebilir yapı tasarımı açısından önemli katkılar sağlamaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, geri dönüştürülmüş beton agregalarının (GDBA) beton üretiminde kullanımına ilişkin literatür sistematik olarak incelenmektedir. Deneysel çalışmalar, GDBA ve doğal agregaların (DA) fiziksel özellikleri, taze beton özellikleri (işlenebilirlik, yoğunluk) ve mekanik özellikler (basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları) karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, GDB içeren beton döşemelere yönelik çalışmalar incelenerek uygulama performansı ortaya konulmaktadır.

2.1. Deneysel Çalışmalar

Geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA), temiz beton atıklarının kırılmasıyla elde edilir ve betonda doğal agrega (DA) için bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Xu vd., 2022). Önceki çalışmalar, doğal agregaların geri dönüştürülmüş beton agregalarıyla ikame edilmesinin beton üretiminde %10–20 oranında malzeme tasarrufu sağlayabileceğini göstermektedir (Dong vd., 2022). Geri dönüştürülmüş agregaların beton üretiminde kullanılmasına yönelik araştırmalar uzun yıllardır devam etmektedir. Örneğin Li ve vd., geri dönüştürülmüş agregaların betonun mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Çalışmada geri dönüştürülmüş agrega ikame oranları %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 olarak belirlenmiş; agrega tane boyutları ise 2,36–4,75 mm, 4,75–9,5 mm, 9,5–19,0 mm ve 19,0–26,5 mm aralıklarında olacak şekilde sırasıyla %3, %37, %55 ve %5 kütle oranlarıyla karıştırılmıştır. Araştırma sonuçları, geri dönüştürülmüş agrega oranı arttıkça betonun basınç ve yarmada çekme dayanımlarında azalma meydana geldiğini göstermiştir. %100 geri dönüştürülmüş agrega kullanılması durumunda 28 günlük basınç dayanımı %16,1, yarmada çekme dayanımı ise %20,1 oranında azalma göstermesine rağmen, elde edilen betonun C30 dayanım sınıfı gerekliliklerini karşıladığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, geri dönüştürülmüş agregaların mühendislik uygulamalarında kullanılabilirliğine yönelik önemli bir referans sunmaktadır (C. Li vd., 2021a).

Sobuz ve ark. geri dönüştürülmüş beton agregasının (GDBA) tane boyutu ve ikame oranının beton özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada GDBA, 5–10 mm ve 12–20 mm tane boyutlarında hazırlanmış; doğal iri agreganın (DIA) yerine %0, %15, %30 ve %45 oranlarında ikame edilmiştir. Sonuçlar, GDBA oranı arttıkça işlenebilirlik, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülünde azalma meydana geldiğini göstermiştir. Ayrıca 12–20 mm tane boyutlu GDBA içeren karışımların 5–10 mm GDBA içeren karışımlara göre daha yüksek işlenebilirlik sağladığı

belirlenmiştir. Buna karşılık, daha küçük tane boyutuna sahip olan 5–10 mm GDBA içeren karışımların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülünün 12–20 mm GDBA karışımlarından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Sobuz vd., 2022a). Benzer şekilde Ghorbani ve ark. (2019), kırılmış beton atıklarının (KBA) en büyük tane boyutunun beton özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Bu kapsamda 5–25 mm, 5–20 mm ve 5–12,5 mm agrega boyutlarında ve doğal iri agrega yerine %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında KBA ikamesi uygulanmıştır. Araştırmacılar, özellikle %25 ikame oranında tüm agrega boyutları için betonun basınç ve yarmada çekme dayanımlarında iyileşme meydana geldiğini rapor etmiştir (Ghorbani vd., 2019). Mamery Sérifou ve ark. (2013) ise taze beton atıklarından elde edilen ince ve iri geri dönüştürülmüş agregalar kullanılarak üretilen betonların mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada geri dönüştürülmüş ince agrega (0–5 mm) ve iri agrega (5–10 mm) doğal agregaların yerine %0, %50 ve %100 oranlarında ikame edilmiştir. Bulgular, geri dönüştürülmüş agregaların su emme oranının doğal agregalara kıyasla daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ayrıca basınç dayanımında ikame oranları arttıkça sırasıyla %15, %25 ve %32 oranlarında azalma meydana gelmiştir. Yarmada çekme dayanımının ise %100 ikame oranında %18 düştüğü belirlenmiştir (Sérifou vd., 2013a).

Meddah vd. (2020), geri dönüştürülmüş beton agregalarının (GDBA) düşük ve normal dayanımlı betonlarda (C12/15, C16/20 ve C25/30) %30, %50 ve %100 ikame oranlarıyla kullanımının etkilerini incelemiştir. Çalışmada, %30'a kadar olan GDBA ikamesinin betonun mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemediği belirlenmiştir. Düşük dayanımlı betonlarda (C12/15 ve C16/20), iri agreganın türü ve kalitesinin dayanım üzerinde sınırlı etkisinin bulunduğu; bunun nedeni olarak bu dayanım seviyesinde düşük kaliteli agregaların dahi uygulanacak yükü taşıyabilmesi gösterilmiştir. Ancak C25/30 betonunda, özellikle %100 GDBA kullanımı durumunda basınç dayanımında, %30 ve %50 ikame oranlarına göre belirgin bir düşüş gözlemlenmişti (Meddah vd., 2020). Benzer şekilde Gonzalez ve Etxeberria (Andreu ve Miren, 2014), yüksek performanslı betonlarda (YPB) GDBA kullanımını inceleyerek, kaynak beton dayanımları 40 MPa, 60 MPa ve 100 MPa olan karışımlarda doğal iri agreganın yerine %20, %50 ve %100 oranlarında GDBA kullanmıştır. Bulgular, %100 GDB kullanılan karışımların en az 60 MPa dayanımlı kaynak betondan elde edilen agregalarla üretildiğinde daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Öte yandan 40 MPa dayanımlı kaynak betondan elde edilen GDBA'ların su emme oranının, 100 MPa kaynak betona göre %58 daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Daha yakın tarihli bir çalışmada Ju vd. (2024), üç farklı dayanım sınıfına sahip GDBA (C30, C40 ve C50) kullanarak su emme üzerindeki etkileri incelemiştir. Sonuçlar, özellikle C50 sınıfı kurutulmuş GDBA kullanıldığında su emme oranında %7,98–29,56 arasında azalma elde edildiğini göstermiştir (Ju vd., 2024). Pedro ve ark. tarafından yapılan başka bir çalışmada ise farklı kaynak dayanımlarına (15–25 MPa, 35–45 MPa ve 65–75 MPa) sahip geri dönüştürülmüş iri agregalar kullanılmıştır. Bulgular, 28 günlük basınç dayanımının 20 MPa kaynaklı karışımlarda yaklaşık %20, 45 MPa ve 65 MPa kaynaklı karışımlarda ise yaklaşık %8 oranında azaldığını göstermiştir. Elastisite modülü ise sırasıyla %22, %18 ve %15 oranlarında düşüş göstermiştir. Ayrıca GDBA'nın yüksek gözenekliliği ve aderanslı harç nedeniyle su emme oranının %23–49 aralığında arttığı rapor edilmişti (Pedro vd., 2017a).

2.2. GDBA ve DA'nın Fiziksel Özellikleri

GDBA ve DA'nın fiziksel özellikleri, su emme, kırılma değeri ve darbe değeri gibi parametreleri içerecek şekilde Tablo 2.1'de özetlenmiştir. Bu özellikler, literatürde iki agrega türünün karşılaştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Genel olarak GDBA'nın su emme oranı %4,9–6.5 aralığında olup, %0,5–1,5 aralığında değerlere sahip olan DA'ya kıyasla daha yüksektir. Bu durum, geri dönüştürülmüş agregaların daha yüksek gözenekliliğe sahip olduğunu göstermektedir. GDBA'nın kırılma değeri de DA'ya göre daha yüksektir; GDBA için bu değerler %16,2–29,4, DA için ise %5,40–20,15 aralığındadır. Bu sonuç, GDBA'nın mekanik dayanımının doğal agregalara kıyasla daha düşük olduğunu işaret etmektedir. Benzer şekilde darbe değerleri incelendiğinde, GDBA'nın %14,47–35,81, DA'nın ise %10,11–17,37 aralığında değerler sergilediği görülmektedir. Bu da GDBA'nın darbe dayanımının daha düşük olduğuna işaret etmektedir.

Bu farklılıklar, GDBA'nın DA yerine kullanılması durumunda beton performansının dikkate alınması gereken önemli değişkenlere sahip olduğunu göstermektedir. Başka bir ifadeyle, GDBA'nın özellikle su emme, kırılma ve darbe değerleri gibi fiziksel özellikleri hem taze beton davranışını hem de sertleşmiş beton özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir (Fayed, Madenci, vd., 2024).

Tablo 2. 1. GDBA ve DA'nın Temel Fiziksel Özellikler

Özellik	GDBA	DA	Kaynaklar
Su emme (%)	4,9	0,5	(Guo vd., 2022)
	6,5	1,04	(Jamil vd., 2023)
	3,82	0,76	(Xie vd., 2015)
	5	1	(Tu vd., 2006)
	4,3	1,5	(Sérifou vd., 2013b)
	5,18	0,50	(Geng vd., 2016)
Kırılma değeri (%)	29,40	18,85	(Waseem, 2022)
	22,59	20,15	(Gonzalez-Corominas vd., 2017)
	23,1	15,7	(McNeil ve Kang, 2013a)
	16,2	5,4	(C. Li vd., 2021b)
Darbe değeri (%)	14,6	13,18	(Meesala, 2019'a)
	35,81	17,37	(Rao vd., 2019)
	20–25	15–20	(Safiuddin vd., 2013)
	14,47	10,11	(Sajan vd., 2022'a)
	26,0	14,6	(Sri Ravindrarajah ve Tam, 1985)

2.3. Taze Beton Özellikleri

Bu bölümde, geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) içeren karışımların taze beton özellikleri, işlenebilirlik ve yoğunluk parametreleri çerçevesinde değerlendirilmektedir.

2.3.1. İşlenebilirlik

GDBA'nın betonun işlenebilirliği üzerindeki etkisine ilişkin önceki araştırmaların özeti Tablo 2.2, sunulmaktadır. GDBA, sahip olduğu fiziksel özellikler nedeniyle genellikle beton karışımlarında işlenebilirliği azaltmaktadır. GDBA taneleri doğal agregalara kıyasla daha pürüzlü bir yüzeye, daha yüksek gözenekliliğe ve daha köşeli tane geometrisine sahiptir. Bu özellikler, taze betonda daha yüksek su ihtiyacına yol açmakta ve buna bağlı olarak çökme (slump) değerinin azalmasına neden olmaktadır (Ahmad vd., 2022; Etxeberria vd., 2007; Prasad Dash vd., 2022). İşlenebilirlikteki bu azalma, özellikle yüksek GDBA ikame oranlarında daha belirgin hâle gelmektedir. Örneğin, (Lavado vd., 2020), %30 GDBA içeren betonlarda doğal agrega betona kıyasla yalnızca %5–10 oranında slump kaybı gözlemlemiş ve bu durumun GDBA'nın yüksek su emme kapasitesinden kaynaklandığını ifade etmiştir. Sun ve ark. (H. Sun vd., 2024), %30 GDBA kullanımında slump kaybının ön ıslatma ve süper akışkanlaştırıcı katkı

kullanımıyla azaltılabileceğini, bu koşullar sağlandığında slump değerinin DA ile benzer seviyede olabileceğini göstermiştir.

Gao vd. (2023), %100 GDBA kullanılan karışımlarda slump değerinin %35'e kadar azaldığını; ancak GDBA'nın ön işleminden geçirilmesi veya katkı miktarının ayarlanmasıyla bu kaybın kontrol altına alınabileceğini bildirmiştir. Huang vd. (2021), bazalt fiber takviyeli GDBA betonlarında ikame oranı arttıkça işlenebilirliğin azaldığını, ancak fiber ilavesinin karışımın kohezyonunu artırarak su ihtiyacını azalttığını ve %40'a kadar GDBA içeren karışımlarda yeterli işlenebilirliğin sürdürülebileceğini belirtmiştir. González-Taboada vd. (2017) ise işlenebilirliğin su/çimento oranının ayarlanması ve katkı maddelerinin kullanılmasıyla yönetilebileceğini göstermiştir. Araştırmacılar, %50'ye kadar GDBA kullanımında işlenebilirlik kayıplarının kontrol edilebilir olduğunu, daha yüksek ikame oranlarının ise ilave düzenlemeler gerektirdiğini raporlamıştır.

Tablo 2. 2. Geri Dönüştürülmüş Beton Agregasının İşlenebilirliği Üzerine Yapılan Önceki Çalışmaların Sonuçlarının Özeti

Refs.	GDBA Kaynağı	İkame Oranı (%)	GDBA Tane Boyutu (mm)	S/ç Oranı	Katkı Maddesi	İşlenebilirlik Sonuçları (Slump Değişimi)
(Mahmood vd., 2022)	YİA	0, 30, 50, 70, 100	5-20	0,43	SP	Doğal Beton: 100–110 mm. %50 GDBA: 100 mm. Tüm karışımlar, su ve katkı ayarlamasıyla 100–125 mm hedef aralığında tutuldu.
(Huang vd., 2021)	YİA	0, 40, 70, 100	5-20	0,4	SP	%40 GDBA: ~%10 azalma, %70 GDBA: ~%16 azalma, %100 GDBA: ~%26 azalma.
(Hui vd., 2022a)	YİA	20, 30, 40, 50, 60	5-20	0,32	Su Azaltıcı	%30: Azalma yok (120 mm), %40: ~%10–15 azalma, %50: ~%25 azalma, %60: ~%35–40 azalma (mühendislik kullanımına uygun değil).

Tablo 2. 2 (Devam). Geri Dönüştürülmüş Beton Agregasının İşlenebilirliği Üzerine Yapılan Önceki Çalışmaların Sonuçlarının Özeti

(Safiuddin vd., 2011)	Saha-Döküm Küpler	0, 30, 50, 70, 100	5-20	0,6	YASA	%30: ~5 mm azalma, %50: ~15 mm azalma, %70: ~30 mm azalma, %100: ~20 mm azalma.
(Lavado vd., 2020)	YİA	100	22.4	0,55	SP	%100 GDBA (GDBA-1): ~%2 azalma, %100 GDBA (GDBA-2): ~%37,5 azalma.
(Xie vd., 2019)	YİA	0, 25, 50, 75	5-20	0,5	Sukrozlu Su Azaltıcı	%25 UKÇ (Referans): 190 mm, %50 UKÇ: ~%17 azalma (158 mm), %75 UKÇ: ~%33 azalma (127 mm).
(D. N., 2012)	YİA	10, 20, 30, 50, 100	10-20	0,55	-	%10: ~%5-7 azalma, %20: ~%10-11 azalma, %30: ~%15-29 azalma, %50: ~%31-47 azalma, %100: ~%48-53 azalma.
(Nili vd., 2019)	YİA	0, 50, 100	19	0,44	SP, HSK, UK	%100 Kaba GDBA: 20 mm (~%2,6) slump akış azalması. %50 İnce GDBA: 20 mm azalma. %100 Kaba + %50 İnce GDBA: 50 mm (~%6,5) azalma.
(Ahmed Memon vd., 2023)	YİA	50	<4.75	0.5	-	Nezih Kum: %14 azalma, Ocak Kumu: %20 azalma, Tepe Kumu: %29 azalma (doğal kum tipine bağlı olarak).
(González-Taboada vd., 2017)	YİA	20, 50, 100	4-11	0,46	SP, VDK	%20: Kontrole benzer, %50: Orta azalma, %100: Belirgin azalma (özellikle 90. dakikada).

Tablo 2. 2 (Devam). Geri Dönüştürülmüş Beton Agregasının İşlenebilirliği Üzerine Yapılan Önceki Çalışmaların Sonuçlarının Özeti

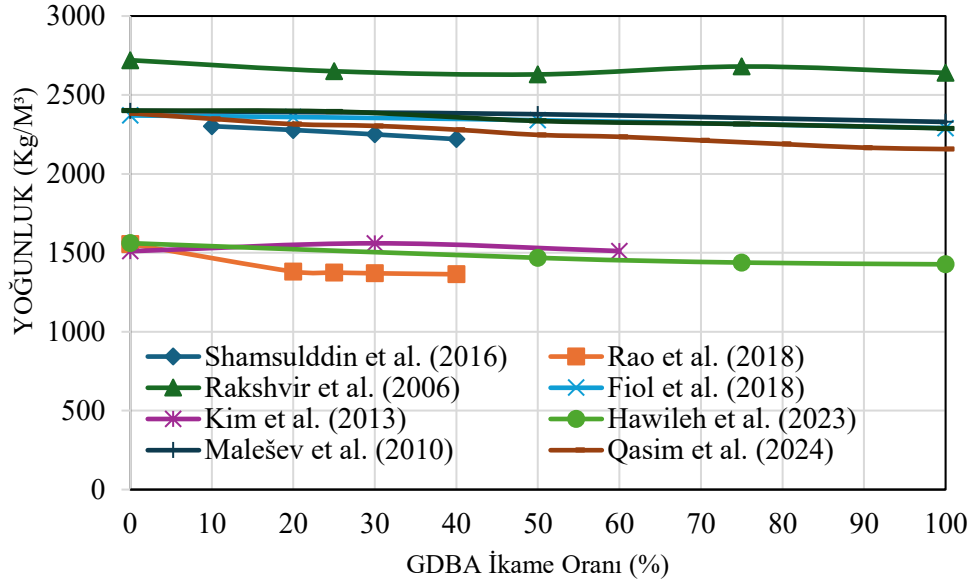
(Prasad Dash vd., 2022'a)	YİA	GDBA-0 GDBA-1 GDBA-2 GDBA-3 GDBA-4	20	0,44-0,55	SP	SP dozu arttıkça slump 15 mm'den 68 mm'ye yükseldi. GDBA'nın yüksek su emmesine rağmen işlenebilirlik geliştirildi.
(H. Sun vd., 2024)	İşlem Görmüş/Görmemiş GDBA	25, 50, 100	5-16	0,25-0,35	SP, Nano-Silika	Kontrol: 210 mm. İşlemsiz GA-%25: %17,6 azalma, İşlemsiz GA-%50: %19,5 azalma, İşlemsiz GA-%100: %26,7 azalma.
(Gao vd., 2023)	Laboratuvar Beton Atığı	0, 25, 50, 75, 100	4.75–20	0,37	SP, UK, FD	%50 GDBA: %3,5 slump akış azalması, %100 GDBA: %12,7 azalma. T500 ve V-Huni süreleri önemli ölçüde arttı. %50 GDBA'ya kadar kabul edilebilir işlenebilirlik.
(Mathur vd., 2023a)	KA	0, 10, 20, 30, 40, 50	10,20	0,45-0,462-0,469-0,476-0,483-0,49	SP	%10 GDBA'da slump 140 mm'e yükseldi, ardından %50 GDBA'da 90 mm'e düştü. %50 GDBA'da işlenebilirlikte kontrol betonuna kıyasla ~%31 azalma.
(Vu vd., 2021)	DK	0, 10, 20	20	0,67		Slump %0'da 73 mm, %10'da 70 mm ve %20'de 12 mm'ye düştü.

2.3.2. Yoğunluk

Geri dönüştürülmüş beton agregalarının (GDBA) yoğunluğu, genellikle doğal agregaların yoğunluğundan daha düşüktür. Bunun temel nedeni, GDBA tanelerinin yüzeyinde bulunan aderanslı çimento harcının, doğal taşın kendi yoğunluğundan daha düşük bir yoğunluğa sahip olmasıdır. GDBA'nın yoğunluğundaki değişim, kullanılan agreganın türüne ve kaynağına bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Limbachiya vd. (2000a) tarafından yapılan bir araştırmada, doygun yüzey kuru koşullarındaki GDBA'nın bağıl yoğunluğunun DA'ya kıyasla yaklaşık %7–9 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Zainab Aamer Shamsulddin ve Rafaa Zair Jassim (2016), GDBA içeren betonların yığın

yoğunluğunun, ikame oranı %10 ile %40 arasında değiştiğinde 2.302–2.220 g/cm³ aralığında olduğunu raporlamıştır. Luo vd. (2017), betondaki GDBA oranı arttıkça yığın yoğunluğun azaldığını gözlemlemiştir. Ben Nakhi ve Alhumoud. (2019) da benzer şekilde GDBA miktarındaki artışın betonun yoğunluğunu düşürdüğünü ve hava içeriğinde azalma meydana getirdiğini ifade etmiştir. Bir başka çalışmada, ince GDBA miktarı ile betonun yoğunluğu arasında ters bir ilişki olduğu belirlenmiştir (Falek vd., 2017). Özellikle ince GDBA oranı arttıkça beton karışımının yoğunluğunun azaldığı; bunun ise ince GDBA'nın kırılmış doğal ince agregata taşlarına kıyasla daha düşük yoğunluğa sahip olmasından kaynaklandığı vurgulanmıştır. Ayrıca agregata/çimento oranının beton yoğunluğu üzerinde oldukça sınırlı bir etkisinin olduğu bildirilmiştir. Atık beton agregalarının yaklaşık 2450 kg/m³ yoğunluğa ve 1161 kg/m³ birim hacim kütleline sahip olduğu da literatürde belirtilmiştir (Rakshvir ve Barai, 2006).

Şekil 2.1, (Chakradhara Rao, 2018; Fiol vd., 2018a; Hawileh vd., 2024; Kim ve Yun, 2013; Rakshvir ve Barai, 2006b; Zainab Aamer Shamsulddin ve Rafaa Zair Jassim, 2016b), (Malešev vd., 2010; Neupane vd., 2025; Qasim vd., 2024) numaralı kaynaklardan elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuştur. İncelenen çalışmalar arasında yalnızca birinde GDBA ikame oranının artmasıyla yığın yoğunluğunda artış gözlemlenmiştir. Diğer tüm çalışmalarda ise GDBA kullanımının yığın yoğunluğunu azalttığı görülmüştür. Genel eğilim, GDBA ikame oranı arttıkça yığın yoğunluğunun azaldığı yönündedir. Rao vd. (2018) tarafından yürütülen çalışmada, %40 GDBA ikamesi ile yığın yoğunluğunda %12,3 oranında azalma elde edilerek en yüksek düşüş rapor edilmiştir. Qasim vd. (2024) ile Hawileh vd. (2023) çalışmalarında ise %100 GDBA kullanımında yaklaşık %10 seviyesinde yoğunluk azalması tespit edilmiştir. %100 GDBA kullanılan çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, yığın yoğunluğundaki ortalama azalmanın %5 civarında olduğu görülmektedir. Bu bulgular, GDBA kullanımının yığın yoğunluğu üzerinde göreceli olarak düşük ve ihmal edilebilir düzeyde bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. 1. GDBA'lı Betonun Yoğunluğu

2.4. Mekanik Özellikler

Bu bölümde, geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) içeren betonların mekanik özellikleri; basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları açısından değerlendirilmektedir.

2.4.1. Basınç dayanımı

GDBA içeren betonların basınç dayanımı; GDBA ikame oranı, su/çimento (s/ç) oranı ve GDBA üzerindeki aderanslı harç miktarı gibi faktörlerden etkilenmektedir (McNeil ve Kang, 2013b). Literatürde yapılan çok sayıda çalışma, GDBA oranının artmasının genel olarak basınç dayanımında azalmaya yol açtığını göstermektedir. Ngo ve ark. (Ngo ve Chai, 2004), iri GDBA miktarı arttıkça basınç dayanımının %4–37 arasında azaldığını bildirmiştir. Benzer şekilde Xiao vd. (2005), 2005 yılında yaptıkları çalışmada, GDBA içeriği arttıkça GDBA içeren betonun basınç dayanımının düştüğünü belirtmiştir. Urban ve Sicakova (2018), GDBA kullanılan betonların 28 günlük basınç dayanımının, doğal agregası (DA) kullanılan betonlara kıyasla yaklaşık %27–30 daha düşük olduğunu raporlamıştır. Birçok araştırmacı (Tablo 2.3), GDBA'nın beton basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemiş ve GDBA içeren betonların, kontrol betonlarına kıyasla daha düşük dayanım sergilediğini göstermiştir (Y. A. Fawzy, 2018). GDBA ikame oranı arttıkça GDBA içeren betonun basınç dayanımının azaldığı, farklı

çalışmalarda tutarlı biçimde ifade edilmiştir (Fawzy, 2018; Kou ve Poon, 2012; Lima vd., 2013). Wang vd. (2011), GDBA kullanılan betonların basınç dayanımının karışım koşullarına ve agrega özelliklerine bağlı olarak %15–40 arasında azalabileceğini belirtmiştir. Bununla birlikte (Limbachiya vd., 2000b), iri GDBA oranı %30’a kadar olduğunda dayanımda belirgin bir değişim gözlemlenmediğini bildirmiştir. Silva ve ark. (R. V. Silva vd., 2015), %100 iri GDBA veya %50 ince GDBA kullanımının dayanımı %20–30 oranında düşürdüğünü ifade etmiştir.

Son yıllarda yapılan çalışmalar da GDBA kullanımının basınç dayanımını azalttığını doğrulamaktadır. Quan Tran vd. (2022), 721 veri seti üzerinde oluşturdukları makine öğrenimi modeliyle, GDBA oranı ve su emme değerinin dayanımı özellikle %50’den sonra olumsuz etkilediğini göstermiştir. Adessina vd. (2023), %60 ve %100 GDBA kullanılan betonlarda %14–16 basınç dayanımı kaybı tespit etmiş; ancak s/ç oranının düşürülmesiyle kısmi dayanım geri kazanımının mümkün olduğunu raporlamıştır. Gorji Azandariani ve ark. (Gorji Azandariani vd., 2024), %3–5 polietilen lif ilavesinin basınç dayanımını %34’e kadar iyileştirdiğini, dolayısıyla lif takviyesinin GDBA’nın olumsuz etkilerini azaltma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Tablo 2. 3. GDBA’lı Betonun Basınç Dayanımı Üzerine Yapılan Önceki Çalışmaların Sonuçlarının Özeti

Kaynak	İkame Türü	GDBA Kaynağı	GDBA İkame Oranı (%)	GDBA Tane Boyutu (mm)	S/Ç Oranı	Katkı	Kontrol Basınç Dayanımı (MPa)	Bulgular / Sonuçlar
(Medina vd., 2014)	İri Agrega	İYA	25, 50	≤ 20	0,60, 0,65	SP	53,70	RCF-25: ~%15,1 azalma; RCF-50: ~%18,5 azalma; RC-25: ~%3 azalma; RC-50: ~%16,7 azalma
(Kang ve Weibin, 2018)	İri Agrega	Laboratuvarda Hazırlanmış Agrega	0, 16.7, 33.3, 50, 66.7, 100	5–15, 15-20, 20–30	0,47, 0,53	-	40–45	GDBA ile %30’a kadar dayanım düşüşü; %100

Tablo 2. 3. (Devam). GDBA'lı Betonun Basınç Dayanımı Üzerine Yapılan Önceki Çalışmaların Sonuçlarının Özeti

(Tabsh ve Abdelfatah, 2009)	İri Agregat	30 MPa, 50 MPa ve bilinmeyen kaynak	100	-	-	-	30, 50	Düşük kaliteli GDBA ile %30–40 kayıp; 50 MPa GDBA ile %0–10 arası düşük kayıp
(Çakır, 2014)	İri Agregat	İYA	0, 25, 50, 75, 100	12-22	0,50	Silis dumanı, Cüruf	42,4	25%: %11 azalma; 50%: %18; 75%: %22; 100%: %24 dayanıma düşüş
(Dimitriou vd., 2018)	İri Agregat	GDBA	0, 50, 100	-	0,48	FA, SF	72,1	50% GDBA: %25,7 azalma; 100% GDBA: %16,8 azalma; iç kür ile 28 günde %39 iyileşme
(Thomas vd., 2018)	İri Agregat	GDBA	0, 25, 50, 100	-	0,40, 0,50	-	34,8	25%: %4,6 azalma; 50%: %7,8; 100%: %15,8 azalma
(Mallikarjuna Reddy ve Swaroop, 2020)	İnce Agregat	GDBA	0, 10, 15, 20, 25, 30, 35	20, 2.36	0,50	-	40	15%: %7,5; 20%: %15; 25%: %20; 30%: %21,5; 35%: %28,25 azalma

Tablo 2. 3. (Devam). GDBA'lı Betonun Basınç Dayanımı Üzerine Yapılan Önceki Çalışmaların Sonuçlarının Özeti

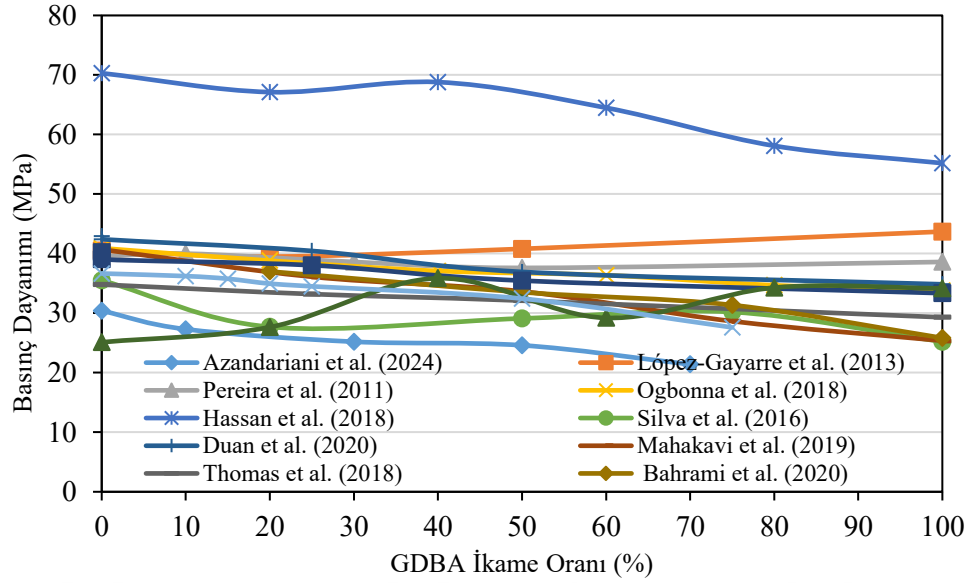
(Dawood ve Al-ASADI, 2023)	İri Agrega	YDB	0, 30, 50, 70	19	0,44	-	42,30	30%: %9,10; 50%: %18,88 ; 70%: %22,57 azalma
(Vu vd., 2021)	İri Agrega	F	0, 10, 20	20	0,50	-	21,5	10%: %5,6 azalma; 20%: %20,5 azalma; optimum dayanım %10 GDBA
(Puthussery vd., 2017'a)	İri Agrega	Çeşitli kaynaklar	0,25,50,100	10–20	0,40	SP	38,8	25–50%: dayanım artışı; 100% GDBA: %4–5 azalma; en yüksek artış (%8,8) 25% ince GDBA
(Pedro vd., 2017b)	Birleşik Fraksiyonlu GDBA	HGDBA	25/25, 50/50, 100/0, 0/100, 100/100		0,43-0,51	SP	72,6	25%: %5–6; 50%: %8–12; 100%: %15–16 azalma; tüm karışımlar >60 MPa
(McGinnis vd., 2017)	İri Agrega		0, 50, 100	-	0,48	-	44,3	50%: %16,6; 100%: %26,4 azalma

Tablo 2. 3. (Devam). GDBA'lı Betonun Basınç Dayanımı Üzerine Yapılan Önceki Çalışmaların Sonuçlarının Özeti

(T. Li vd., 2016)	İri Agregas	Geri dönüşümlü tuğla agregası	0, 20, 30, 40	Maximum size 80 mm	0,48	SP	~26,0-~33,3	40%: %14 azalma; 30% altı ikamelerde önemli düşüş yok
(Sobuz vd., 2022b)	İri Agregas	GDBA	0, 15, 30, 45	5–12, 12–20	0,35	SF	53,86	Tüm GDBA karışımlarında azalma; 5–12 mm grup, 12–20 mm'ye göre +%3,1–2.9 daha yüksek dayanım (56 gün).
(Mohammed Ali vd., 2020a)	İri Agregas	Tuğla agregası	0, 25, 50, 100	19	0,22-0,255	SP	76,6	25%: %4,2; 50%: %8,6; 100%: %12,1 azalma

Şekil 2.3, (Azandariani vd., 2024; Bahrami vd., 2020; Duan vd., 2020; Hassan, 2018; López Gayarre vd., 2014; Mahakavi ve Chithra, 2020; Nieto vd., 2019; Ogbonna, 2018; Pereira vd., 2012; P. Silva ve De Brito, 2017; C. Sun vd., 2020; Surendar vd., 2021) numaralı kaynaklardan uyarlanarak oluşturulmuştur.

Elde edilen verilerde referans betonların basınç dayanımları 30.4–42.91 MPa aralığında değişmektedir. Çalışmaların büyük çoğunluğunda, GDBA ikame oranı arttıkça basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. En yüksek dayanım kaybı, Mahakavi ve ark. (Mahakavi ve Chithra, 2020) tarafından yürütülen çalışmada tespit edilmiş olup, %100 GDBA ikamesinde basınç dayanımında %38 azalma rapor edilmiştir. %100 GDBA kullanılan çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, basınç dayanımındaki ortalama azalma %18 olarak hesaplanmıştır. GDBA ikame oranının %20–30 aralığında olduğu çalışmalarda ise dayanım kaybının ortalama %8 olduğu görülmüştür. %50 GDBA ikamesi dikkate alındığında, ortalama dayanım kaybı yaklaşık %10 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, %50 GDBA ikamesinin, basınç dayanımındaki sınırlı azalma ile birlikte yapısal performans ve çevresel sürdürülebilirlik arasında dengeli bir seçenek olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. 2. GDBA'lı Betonun Basınç Dayanımı

2.4.2. Yarmada çekme dayanımı

GDBA'nın betonun yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkisine ilişkin önceki çalışmaların özeti Tablo 2.4'te sunulmuştur. Yapılan araştırmalar, betona GDBA ilave edilmesinin yarmada çekme dayanımını azalttığını göstermektedir. Literatürde GDBA'ın çekme dayanımının, basınç dayanımına kıyasla GDBA miktarından daha az etkilendiği de belirtilmektedir (McNeil ve Kang, 2013c). C. Li vd. (2021c) numaralı çalışmada, GDBA ikame oranı arttıkça GDBA'ın yarmada çekme dayanımının azaldığı rapor edilmiştir. %100 GDBA kullanılan karışımlarda 3 günlük, 7 günlük ve 28 günlük yarmada çekme dayanımları sırasıyla %28,5, %20,6 ve %20,1 oranında düşüş göstermiştir. Bu düşüşün, hidratasyon sonrası oluşan harç-harç bağının zayıflamasından kaynaklandığı belirtilmektedir.

Benzer şekilde (Guo-yao, 2005) tarafından yapılan bir çalışmada %25, %50, %75 ve %100 GDBA ikame oranlarının etkisi incelenmiş ve %100 GDBA kullanılan karışım dışındaki tüm oranlarda ikame miktarı arttıkça yarmada çekme dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. NED University of Engineering ve Technology, Karachi, Pakistan vd. (2019'a) GDBA oranının artmasının betonun basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarında azalmaya neden olduğunu ifade etmiştir. Mohammed Ali vd. (2020b) tarafından yürütülen çalışmada ise doğal agregalı betonun yarmada çekme dayanımı 4,7 MPa iken, %100 GDBA içeren betonun yarmada çekme dayanımı 4.2 MPa olarak

ölçülmüştür. Xiao vd. (2022) iri ve ince doğal agregaların tamamen GDB A ile ikame edilmesinin, zayıf ara yüz bağları ve eski harcın gözenekli yapısı nedeniyle yarmada çekme dayanımını azalttığını rapor etmiştir. Zhu vd. (2022) 0,6 kg/m³ polipropilen lif ilavesinin GDBA'nın çekme dayanımını artırdığını; ancak daha yüksek lif dozajlarının karışımda dağılma sorununa yol açarak etkinliği azalttığını gözlemlemiştir. Islam ve ark. (Islam vd., 2022) ise 15 mm galvanizli demir (GI) liflerinin GDBA'nın yarmada çekme dayanımını %13'e kadar artırdığını, ancak daha uzun liflerin sıkıştırma yetersizliği nedeniyle daha düşük performans gösterdiğini bildirmiştir.

Tablo 2. 4. GDBA'lı Betonun Yarmada Çekme Dayanımı Üzerine Yapılan Önceki Çalışmaların Sonuçlarının Özeti

Kaynak	İkame Türü	GDBA Kaynağı	GDBA İkame Oranı (%)	GDB A Tane Boyutu (mm)	S/Ç Oranı	Katkı	Kontrol Örneğinin Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	Bulgular / Sonuçlar
(Sajan vd., 2022b)	İri Agreg a	GDBA	15,20,25,30, 35, 40	-	0,475	-	3,661	15%: %1,448 artış; 20%: %1,475 azalma; 25%: %2,158 artış; 30%: değişim yok; 35%: %2.617 azalma; 40%: %3.488 azalma
(Sadati ve Khayat, 2016)	İri Agreg a	Tuğla agregası	30, 40	5-20	0,45	WR A, AEA	3,15	%30 ve %40 ikame seviyelerinde hafif azalma
(Khoshkenari vd., 2014)	İnce Agreg a + İri Agreg a	Laboratuvar da kırılmış beton	100% (RW, RS); Partial (RP)	0- 2	0,55	SP	4,2	%100 GDBA ile %33-40 azalma; 0-2 mm GDBA'nın doğal kum ile değiştirilmesi kaybı %19'a düşürdü

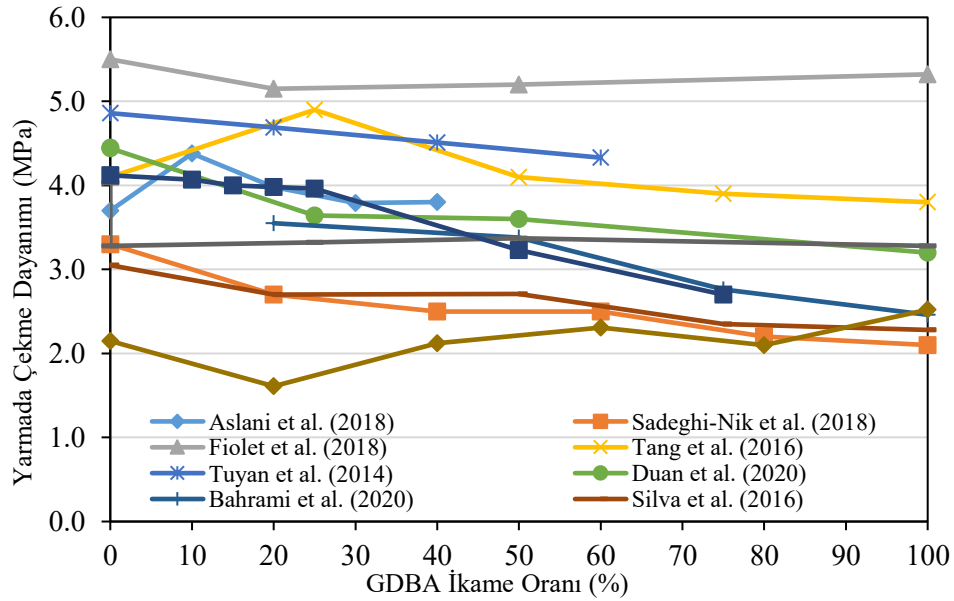
Tablo 2. 4.(Devam). GDBA'lı Betonun Yarmada Çekme Dayanımı Üzerine Yapılan Önceki Çalışmaların Sonuçlarının Özeti

(Pedro vd., 2017c)	İnce Agregası + İri Agregası	Laboratuvar ve prefabrik beton	0, 25, 50, 100	5- 20	0,43- 0,51	SP	4,56	25%: 3.88 MPa; 100%: 2.82–2.96 MPa; %38'e varan düşüş
(Sobuz vd., 2022c)	İri Agregası	İYA	0, 15, 30, 45	5- 12, 12- 20	0,33- 0,35	SP, SF	4,63Mpa (5-12 mm), 4,59Mpa (12-20 mm)	5–12 mm için %3,2– 18,9; 12– 20 mm için %5,5– 28,5 düşüş
(Puthussery vd., 2017b)	İnce Agregası + İri Agregası	İYA	0, 25, 50, 100	0–4,5 RF, 4,5– 20 RC	0,4	SP	3,68	25% RF: 3,83 MPa artış; 100% RF: ~%31 düşüş; 100% RC: ~%34 düşüş
(Mohammed Ali vd., 2020b)	İri Agregası	İYA	0, 25, 50, 100	19	0,22- 0,255	SP, SF	4,7	25%: %6,4 artış; 50%: %4,3 artış; 100%: %10,6 düşüş (içme suyu küründe)
(Mathur vd., 2023b)	İri Agregası	İYA	0, 10, 20, 30, 40, 50	10,20	0,45, 0,462, 0,469, 0,476, 0,483, 0,49	-	3,7	10%: %8,1; 20%: %18,9; 50%: %44,6 azalma
(Dawood ve Al-ASADI, 2023)	İri Agregası	GDBA	0, 30, 50, 70	19	0,44, 0,51	-	5,13	30%: %3; 50%: %6; 70%: %11 azalma

Tablo 2. 4.(Devam). GDBA'lı Betonun Yarmada Çekme Dayanımı Üzerine Yapılan Önceki Çalışmaların Sonuçlarının Özeti

(Zaharieva ve Dimitrov, 2023)	İri Agrega	Demiryolu traversleri, baraj, rampa	30,50	4-22.4	0,5, 0,55	SP	3,7	30%: anlamlı değişim yok; 50%: ~%15 azalma
(Baena vd., 2016)	İri Agrega	Çeşitli şantiyeler	0, 20, 50, 100	5-15	0,77, 0,60, 0,42	-	1,95, 2,33, 3.50	50%: %28 artış (C30); 100%: %21,5 artış (C20). Etki beton sınıfına bağlı
(Çakır, 2014)	İri Agrega	İYA	0, 25, 50, 75, 100	12-22	0,50	SF, GGBFS	3,3	25%: %3; 50%: %3; 75%: %21,2; 100%: %9,1 azalma

Şekil 2.5, (Tuyan vd., 2014; Bahrami vd., 2020; Duan vd., 2020; Nieto vd., 2019; P. Silva ve De Brito, 2017; C. Sun vd., 2020; Surendar vd., 2021; Aslani vd., 2018; Sadeghi-Nik vd., 2019; Fiol vd., 2018b; Tang vd., 2016) numaralı kaynaklardan uyarlanarak oluşturulmuş GDBA'lı betonun yarmada çekme dayanımını göstermektedir. İncelenen çalışmalarda referans betonların (0% GDBA) yarmada çekme dayanımları 2,15–5,5 MPa aralığında değişmektedir. Bazı çalışmalarda—özellikle (Aslani vd., 2018) and (Tang vd., 2016)), yarmada çekme dayanımında %20'ye kadar artış rapor edilmiştir. Ancak çalışmaların büyük bir bölümünde, GDBA ikame oranı arttıkça dayanımda azalma meydana geldiği görülmüştür. En yüksek dayanım kaybı (Sadeghi-Nik vd., 2019) tarafından bildirilmiş olup, %36 oranında azalma tespit edilmiştir. %100 GDBA kullanılan karışımlar incelendiğinde, yarmada çekme dayanımında ortalama %19 azalma gerçekleştiği belirlenmiştir. %50 GDBA ikame oranına sahip karışımlar için ortalama dayanım kaybı %9,5 olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle literatürde %50 GDBA ikamesinin hem dayanım düşüşünü sınırlaması hem de sürdürülebilirlik açısından avantaj sunması nedeniyle, optimum kullanım seviyesi olabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 2. 3. GDBA'lı Betonun Yarmada Çekme Dayanımı

2.4.3. Eğilme dayanımı

GDBA'nın betonun eğilme dayanımı üzerindeki etkisine ilişkin önceki çalışmaların özeti Tablo 5'te sunulmuştur. Araştırmacıların büyük çoğunluğu, GDBA kullanımının eğilme dayanımında belirgin azalmaya yol açabileceğini ifade etmektedir. Örneğin, (Hui vd., 2022b) doğal agreganın %60'ının GDBA ile değiştirilmesi durumunda eğilme dayanımının önemli ölçüde azaldığını rapor etmiştir. Meesala vd. (2019) çelik liflerin ilavesinin GDBA'nın eğilme dayanımını lifsiz kontrol karışımlarına kıyasla %20–26 oranında artırabildiğini belirtmiştir. Rahu vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada, GDBA oranı arttıkça eğilme dayanımının azalma eğiliminde olduğu, ancak %40 GDBA ikame seviyesinin optimum olabileceği ve bu seviyede dayanım kaybının %20'nin altında kaldığı belirtilmiştir. Anike vd. (2022) %100 GDBA içeren ve %1 çelik lif ile güçlendirilmiş kirişlerin, lifsiz GDBA kirişlerine göre %13, doğal agregaya kullanılan kirişlere göre ise %8 daha yüksek taşıma kapasitesi gösterdiğini bildirmiştir. Hemida vd. (2023) ise GDBA oranının %25, %50 ve %100'e yükseltilmesinin nihai yük taşıma kapasitesinde sırasıyla %14,3, %14,5 ve %28,6 azalmaya neden olduğunu raporlamıştır.

Tablo 2. 5. GDBA'nın Eğilme Dayanımı Üzerine Yapılan Önceki Çalışmaların Sonuçlarının

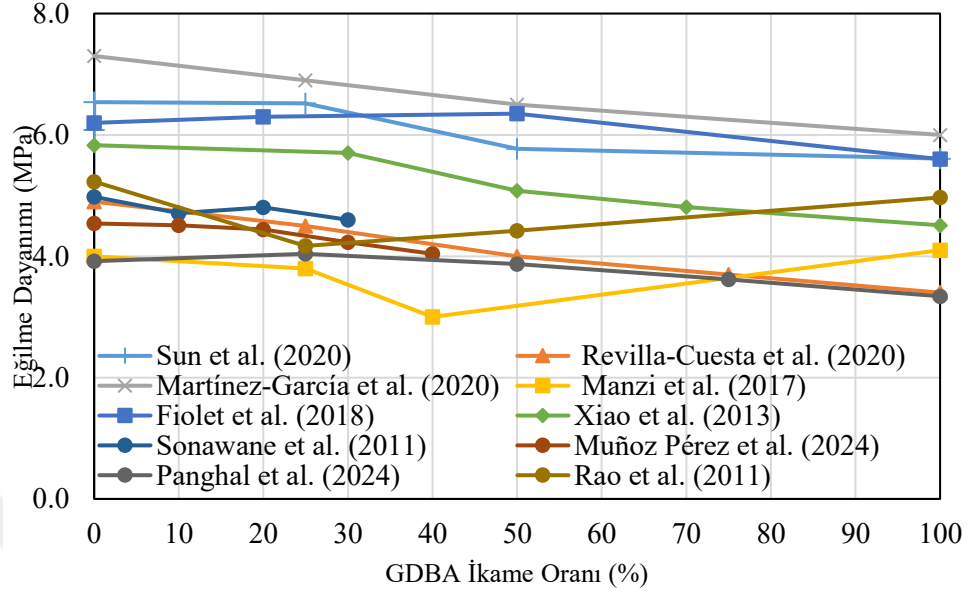
Kaynak	Beton Türü	İkame Türü	GDBA Kaynağı	İkame Oranı (%)	GDBA Tane Boyutu (mm)	S/Ç Oranı	Katkı	Kontrol Eğilme Dayanımı (MPa)	Bulgular / Sonuçlar
(Amin vd., 2021)	Geçirimli Beton	İri Agregat	İYA	0, 30, 70, 100	12,5	0,4	-	2,63	Eğilme dayanımı 30%, 70% ve 100% GDBA'da sırasıyla %24, %36 ve %38 azaldı
(Kumut ha ve Vijai, 2008)	GDBA	İri Agregat	İYA	0, 20, 40, 60, 80, 100	20	0,5	-	4,86	20%, 40%, 60%, 80% ve 100% GDBA için eğilme dayanımı sırasıyla %20, %41, %44, %47 ve %50 azaldı
(Panghal ve Kumar, 2023)	SC	İri Agregat	İYA	0, 25, 50, 75, 100	4,75-20	0,50	SP	4,22	75% ve 100% GDBA'da %7,10, %10,42 ve %13,27 azalma (aşınma ve çimento bulamacı uygulamalarında)
(Khan vd., 2019b)	SC	İri Agregat	Batching plant atıkları	0, 30, 50, 70, 100	12,7	0,43	SP	6,5	30% GDBA'da %9-10 azalma, 100% GDBA'da %35-38 azalma
(Lau vd., 2014)	GDBA	İri Agregat	Yerel beton bloklar, tuğlalar	0, 25, 50, 75	20	0,48	-	4,29	25%, 50%, 75% GDBA'da sırasıyla %12,5, %24,9 ve %39,2 azalma

Tablo 2. 5. (Devam) GDBA'nın Eğilme Dayanımı Üzerine Yapılan Önceki Çalışmaların Sonuçlarının

(Kaplan vd., 2021)	GDBA	İri Agregat	İYA	0, 50, 100	22	0,3, 0,5	SF, SP	4,12	50% GDBA: %7–9 azalma; 100% GDBA: %11–15 azalma; %2 çelik lif ile %66 artış
(Xiao vd., 2013a)	GDBA	İri Agregat	İYA	0, 30, 50, 70, 100	5 – 31,5	0,43	-	5,83	Eğilme dayanımı oda sıcaklığında %12–22, 400°C'de %24–38, 600°C'de %42–58, 800°C'de ~%100 azaldı
(Prasad Dash vd., 2022b)	GDBA	CPC	Laboratuvar	100	<20	0,55-0,44	SP	5,39	Eğilme dayanımı %6,68 azalmadan %25,69 artışa kadar değişken sonuçlar
(Chachar vd., 2023)	GDBA	DC	Yerel kaynak	50	≤25	0,45	-	6,43	%50 GDBA'da %12,5 azalma; %5 çelik lif ilavesiyle GDBA'a göre %59, kontrol betonuna göre %39 artış

Şekil 2.7 (Fiol vd., 2018b; Manzi vd., 2017; Martínez-García vd., 2020; Revilla-Cuesta vd., 2020; Sonawane ve Pimplikar, 2013; C. Sun vd., 2020; Xiao vd., 2013), (Chakradhara Rao vd., 2011; Muñoz Pérez vd., 2024; Panghal ve Kumar, 2023) numaralı kaynaklardan uyarlanarak GDBA'nın eğilme dayanımını göstermektedir. Toplanan verilerde referans betonların (0% GDBA) eğilme dayanımları 3,92–7,3 MPa aralığında değişmektedir. İncelenen çalışmaların genelinde, GDBA ikame oranı arttıkça eğilme dayanımında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmalardan sadece birkaçında eğilme dayanımında en fazla %3 artış rapor edilmiştir. Eğilme dayanımındaki en yüksek azalma (Revilla-Cuesta vd., 2020) tarafından bildirilmiş olup, %31 oranında dayanım kaybı tespit edilmiştir. %100 GDBA kullanılan karışımlar incelendiğinde, eğilme dayanımında ortalama %13 azalma hesaplanmıştır. GDBA ikame oranının %50 olduğu durumlarda ise bu azalma yaklaşık %9,8 olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, düşük ve orta düzey GDBA

ikame oranlarının eğilme dayanımı üzerinde daha sınırlı etkiye sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. 4. GDBA'lı Betonun Eğilme Dayanımı

2.5. GDB Döşemeleri

Önceki araştırmalar, geri dönüştürülmüş beton agrega ikame oranlarının artırılmasının, daha yüksek gözeneklilik, yapışmış harç içeriği ve daha zayıf arayüzey geçiş bölgeleri nedeniyle genellikle mekanik özelliklerde azalmaya yol açtığını göstermektedir (Akbulut vd., 2025; Jagadesh vd., 2024b). Younes vd. (2024) sıkıştırma mukavemetinin genellikle %50'ye kadar ikame seviyelerinde geleneksel betonla karşılaştırılabilir düzeyde kaldığını belirtmiştir. Ancak, daha yüksek seviyelerde (%75 ila %100) araştırmacılar, mukavemette %36 ila %42 arasında önemli bir azalma gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, araştırmaya göre, betonun %50 ila %75 oranında geri dönüştürülmüş agrega içermesi durumunda, geleneksel karışımlara kıyasla yarmada çekme dayanımında %20'ye varan artışlar gözlemlenmiştir. A. Fawzy vd. (2023) geri dönüştürülmüş agrega betonun, geri dönüştürülmüş agreganın gözenekli dokusu ile çimento hamuru arasındaki daha iyi kenetlenme sayesinde doğal agregalardan daha yüksek basınç dayanımı ve eğilme dayanımı elde edebildiğini ve geri dönüştürülmüş agrega betonda bu özelliklerin geliştirilebileceğini bulmuşlardır. Bununla birlikte, mukavemet kaybının temel nedeni, geri dönüştürülmüş agregaya yapışan gözenekli harç

tabakasıdır. Bu tabaka, ek arayüzey geçiş bölgeleri oluşturur, özellikle de eski, yapışmış harç ile yeni çimento hamuru arasındaki bağ, yük altında zayıf bir nokta görevi görür (Peiris vd., 2025b).

Hawileh vd. (2024b) tarafından yapılan araştırma, basınç dayanımının maruz kalma sıcaklığı ve geri dönüştürülmüş agrega içeriği arttıkça azaldığını göstermiştir. Ancak, GDB ikame seviyesinin dayanım bozulma derecesi üzerindeki etkisi önemli değildi, çünkü basınç dayanımındaki yüzde azalmalar farklı RA içeriklerinde nispeten benzerdi. Oda sıcaklığı değerleriyle karşılaştırıldığında, basınç dayanımı azalmaları 200 °C'de %11,8 ile %18,9 arasında, 400 °C'de %34,5 ile %45,0 arasında değişmiş ve 0%, 50%, 75% ve 100% RA içeren karışımlarda 600 °C'de %62,7 ile %79,2'ye kadar belirgin bir artış göstermiştir. Benzer şekilde, (Meftah ve Arabi, 2024), 500 °C, 700 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz kalan, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında GDBA içeren betonu incelemiştir. Isıtma öncesinde, %60 GDBA içeren beton, referans karışımdan daha yüksek basınç dayanımı sergilemiştir. 500 °C'de, kontrol betonunun dayanımı yaklaşık %5 azalırken, %40 GDBA karışımı sadece %0,2'lik ihmal edilebilir bir azalma göstermiştir. 700 °C'de mukavemet kaybı daha belirgin hale gelmiştir; ancak, %40 GDBA içeren beton, kontrol betonuna göre hala daha iyi performans göstermiş ve %24,4'lük bir basınç mukavemeti kaybı sergilerken, kontrol betonunda bu oran %29,8 olmuştur. 1000 °C'de tüm karışımlarda ciddi bozulma meydana geldi; kontrol betonu ve %40 GDBA karışımı sırasıyla %87,4 ve %84,9 kalıntı mukavemet kaybı gösterdi. Khan vd. (2024) %30 geri dönüştürülmüş agrega içeren betonun, sıcaklık arttıkça basınç dayanımında kademeli bir azalma gösterdiğini bildirmiştir. 100 °C'de dayanımda hafif bir artış (~%8) gözlemlenirken, 300 °C'ye ısıtmanın önemsiz bir etkisi olmuştur. 300 °C'nin üzerinde mukavemet düşüşü belirgin hale gelmiş ve 600 °C'de belirgin bir artış göstermiştir; bu sıcaklıkta orijinal mukavemetin sadece yaklaşık %39'u korunmuştur. 1000 °C'de ciddi bir bozulma meydana gelmiş ve kalan basınç mukavemeti yaklaşık %96 oranında azalmıştır.

Çok sayıda deneysel çalışma, özellikle üç nokta veya dört nokta yükleme konfigürasyonları altında kiriş numuneleri kullanılarak, eğilme yüklerine maruz kalan betonarme elemanların eğilme davranışını araştırmıştır.

Stochino vd. (2017), merkezi yama yüküne maruz kalan takviyeli geri dönüştürülmüş beton levhaların eğilme çatlama davranışını deneysel olarak araştırmıştır. Yük-sapma eğrileri (Şekil 2.9), Geri dönüştürülmüş betonun mekanik özellikleri GDBA içeriğinin artmasıyla azalmış olsa da çatlama yükü ve genel eğilme davranışı geleneksel

beton döşemelerinkine benzer kalmıştır, bu da GDBA'nın takviyeli beton döşeme uygulamalarında kullanılmasının uygulanabilirliğini göstermektedir.

Benzer şekilde, (Michaud vd., 2016), enine donatı içermeyen on sekiz adet tek yönlü donatılı geri dönüştürülmüş agrega beton levha numunesinin kesme performansını incelemiş ve bu numunelere %30'a kadar ikame seviyelerinde iri GDBA ve %20'ye kadar granül GDBA eklemiştir. Numuneler, üç ve dört noktalı eğilme altında kırılma noktasına kadar test edilmiştir. Sonuçlar, kaba GDBA (C10, C20, C30) ve %10 granüler GDBA (G10) içeren levhaların, kontrol numunelerine kıyasla yaklaşık %4-8 artışla, benzer veya biraz daha yüksek kesme kapasitesi sergilediğini göstermiştir. Ancak, %20 granüler GDBA (G20) içeren numuneler, yaklaşık %14,1 oranında önemli bir kesme kapasitesi azalması göstermiş ve daha düşük yüklerde kesme çatlakları gelişmiştir. Yazarlar, orta düzeyde kaba GDBA'nın yapısal betonda güvenle kullanılabileceği, ancak daha yüksek granüler geri dönüştürülmüş agrega içeriğinin, gerilme kapasitesinin azalması ve daha erken çatlak oluşumu nedeniyle özel tasarım dikkate alınmasını gerektirebileceği sonucuna varmışlardır.

J. Zhu vd. (2025), %100 GDBA ikamesi ile altı adet tam ölçekli tek yönlü yüksek mukavemetli geri dönüştürülmüş agrega beton levhanın (3200×720 mm) tekrarlanan yükleme altında eğilme davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Çalışma, çelik kafeslerin, donatı oranının ve levha kalınlığının yapısal performans üzerindeki etkisini incelemiştir. Tüm numuneler eğilme sonucu hasar görmüştür. Sonuçlar, donatı oranının artırılmasının akma yükünü, son yükü ve sünekliği önemli ölçüde iyileştirdiğini, daha kalın levhaların ise daha yüksek eğilme direnci ve hizmet sertliği sergilediğini göstermiştir. Çelik kafesler çatlama sonrası sertliği artırmış ve çatlak genişliğini azaltmış olsa da eğilme kapasitesi üzerinde sınırlı bir etkiye sahipti. Burada, sıkıştırma bölgesinde beton kırılması ve döşemelerin alt yüzeyinde büyük eğilme çatlakları gözlemlenebilir. Genel olarak, yüksek mukavemetli geri dönüştürülmüş agrega beton levhalar, doğal agrega betonla yapılan levhalara benzer bir eğilme davranışı sergilemiş ve bu da tasarım mukavemeti korunduğunda GDBA ikamesinin yük-sapma tepkisi üzerinde minimum etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, GB 50010–2010 ve ACI 318–19 tasarım kodlarından elde edilen tahminler, deneysel sonuçlarla iyi bir uyum göstermiştir.

Arezoumandi vd. (2015), %100 geri dönüştürülmüş beton agrega (GDBA) ile üretilen betonarme kirişlerin eğilme davranışını deneysel olarak araştırmıştır. Kirişler, yük kapasitesi, çatlama davranışı ve hasar mekanizmalarını değerlendirmek için dört noktalı eğilme altında test edilmiştir. Sonuçlar, GDBA içeren kirişlerin geleneksel beton

kirişlere kıyasla biraz daha büyük sapmalar sergilediğini, ancak nihai eğilme kapasitesinin benzer kaldığını göstermiştir. Eğilme çatlakları gerilme bölgesinde başlamış ve betonun ezilmesinden önce donatıların akmasıyla bozulma meydana gelene kadar sıkıştırma bölgesine doğru yayılmıştır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) kullanılan betonun davranışı iki farklı deneysel yaklaşımla incelenmiştir. İlk aşamada betonun mekanik özellikleri deneysel olarak belirlenmiş, ikinci aşamada ise beton döşeme elemanlarının yapısal davranışı incelenmiştir.

3.1. Mekanik Özellikler Deneyleri

Bu bölümde, geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) içeren betonların mekanik özelliklerinin belirlenmesine yönelik deneysel çalışmalar sunulmaktadır.

3.1.1. Kullanılan malzemeler

Bu çalışmada, tüm beton karışımlarında bağlayıcı olarak EN 197-1 standardına uygun puzolanik çimento CEM IV/B (P) 32.5 R-SR kullanılmıştır. Üretici firmanın teknik raporundan elde edilen çimentonun fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri Tablo 1 ve Tablo 2’de sunulmuştur. Doğal iri agreg, doğal ince agreg, geri dönüştürülmüş ince agreg ve geri dönüştürülmüş iri agreg, tane boyutlarına göre üç farklı fraksiyonda hazırlanmıştır. İnce agreg fraksiyonu 0–4 mm (F), iri agreg fraksiyonu 5–11 mm (C) ve çakıl fraksiyonu ise 12–22 mm (G) aralığında olacak şekilde sınıflandırılmıştır. Geri dönüştürülmüş beton agregaları, kontrollü kökene sahip laboratuvar deney beton numunelerinden elde edilmiştir.

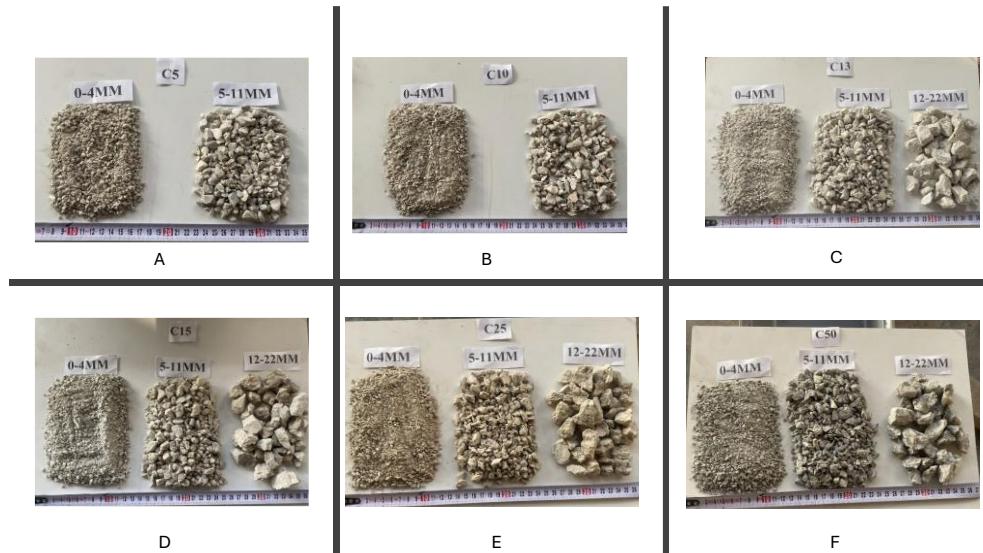
Bu numuneler, 28 günlük kür süresi sonunda C5, C10, C13, C15, C25 ve C50 olmak üzere altı farklı dayanım sınıfına sahiptir. GDBA’lar, kırılma deneyleri sonrasında hasar gören küp, silindir ve kiriş numunelerinin çekiç yardımıyla manuel olarak daha küçük parçalara ayrılmasıyla üretilmiştir. Şekil 3.1, her bir sürtünme için küçültülmüş GDBA örneklerini göstermektedir. GDBA ve doğal agregaya (DA) ait tane boyutu dağılımları ise Şekil 3.2’de verilmiştir.

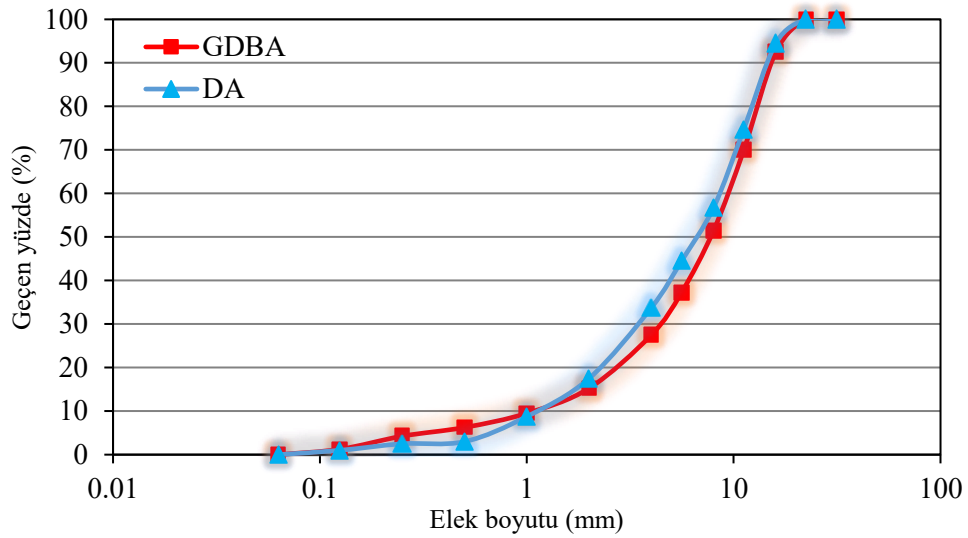
Tablo 3. 1. CEM IV/B çimentosunun fiziksel ve mekanik özellikleri.

Özellik	Ölçülen Değer	EN 197-1 Gerekliği
Başlangıç priz süresi	199 dk	≥ 75 dk
Genleşme (Le Chatelier)	1,0 mm	≤ 10 mm
Erken dayanım (7 gün)	18,8 MPa	≥ 16 MPa
Standart dayanım (28 gün)	37,5 MPa	32,5–52,5 MPa

Tablo 3. 2. CEM IV/B çimentosunun kimyasal özellikleri.

Özellik	Ölçülen Değer	EN 197-1 Sınırı
Sülfat içeriği (SO ₃)	%2,81	$\leq 3,0$ %
Klorür içeriği	%0,04	$\leq 0,10$ %
Klinkerde C ₃ A içeriği	%6,69	$\leq 9,0$ %
Puzolaniklik	Testi sağlamaktadır	Testi sağlamalıdır

**Şekil 3. 1.** Farklı beton sınıflarından elde edilen geri dönüştürülmüş beton agregaları.



Şekil 3. 2. GDBA ve DA tane boyutu dağılım eğrileri

3.1.2. Beton karışımları

Bu çalışmada, farklı dayanım sınıflarına sahip geri dönüştürülmüş beton agregasının (GDBA) beton özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla üç farklı seri beton karışımı laboratuvar ortamında hazırlanmıştır. Tüm beton karışımlarında CEM IV/B (P) 32.5 R-SR kullanılmış ve su/çimento oranı (S/Ç) 0,60 olarak sabit tutulmuştur.

Seri 1 kapsamında, C13, C15, C25 ve C50 dayanım sınıflarına sahip kaynak betonlardan elde edilen GDBA kullanılmıştır. Bu seride, GDBA doğal iri agreganın (DIA) yerine ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında ikame edilmiştir. Seri 1 toplamda 12 farklı beton karışımından oluşmaktadır. Seri 1'e ait karışım oranları Tablo 3.1'de sunulmuştur.

Seri 2'de, C13, C15 ve C25 dayanım sınıflarına sahip kaynak betonlardan elde edilen GDBA kullanılmıştır. Bu seride GDBA, doğal iri agreganın yerine ağırlıkça %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında ikame edilmiştir. Seri 2 toplamda 15 farklı beton karışımından oluşmaktadır. Seri 2'ye ait karışım oranları Tablo 3.2'de verilmiştir.

Seri 3, iri agrega sürtünme etkisini ortadan kaldırmak amacıyla 12–22 mm (G) boyutlu iri agreganın kullanılmadığı karışımlar şeklinde tasarlanmıştır. Bu seride, C5 ve C10 dayanım sınıflarına sahip kaynak betonlardan elde edilen GDBA kullanılmıştır. GDBA, doğal iri agreganın yerine ağırlıkça %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında ikame edilmiştir. Seri 3 toplamda 10 farklı beton karışımından oluşmaktadır. Seri 3'e ait karışım oranları Tablo 3.3'te sunulmuştur.

Tablo 3. 3. Seri 1 için Karışım Oranları (GDBA Sınıfları C13, C15, C25, C50)

Karışım kimliği	GDB A (%)	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Doğal agregası (kg/m ³)			Geri dönüştürülmüş beton agregası (kg/m ³)			S/Ç
				0-4 mm	5-11 mm	12-22 mm	0-4 mm	5-11 mm	12-22 mm	
REF	0	360	216	750	480	540	0	0	0	0,6
C13-10	10	360	216	675	432	486	75	48	54	0,6
C13-20	20	360	216	600	384	432	150	96	108	0,6
C13-30	30	360	216	525	336	378	225	144	162	0,6
C15-10	10	360	216	675	432	486	75	48	54	0,6
C15-20	20	360	216	600	384	432	150	96	108	0,6
C15-30	30	360	216	525	336	378	225	144	162	0,6
C25-10	10	360	216	675	432	486	75	48	54	0,6
C25-20	20	360	216	600	384	432	150	96	108	0,6
C25-30	30	360	216	525	336	378	225	144	162	0,6
C50-10	10	360	216	675	432	486	75	48	54	0,6
C50-20	20	360	216	600	384	432	150	96	108	0,6
C50-30	30	360	216	525	336	378	225	144	162	0,6

Tablo 3. 4. Seri 2 için Karışım Oranları (GDBA Sınıfları C13, C15, C25)

Karışım kimliği	GDBA (%)	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Doğal agregası (kg/m ³)			Geri dönüştürülmüş beton agregası (kg/m ³)			S/Ç
				0-4 mm	5-11 mm	12-22 mm	0-4 mm	5-11 mm	12-22 mm	
REF	0	420	252	560	560	560	0	0	0	0,6
F10	10	420	252	504	560	560	56	0	0	0,6
F20	20	420	252	448	560	560	112	0	0	0,6
F30	30	420	252	392	560	560	168	0	0	0,6
F40	40	420	252	336	560	560	224	0	0	0,6
F50	50	420	252	280	560	560	280	0	0	0,6
C10	10	420	252	560	504	560	0	56	0	0,6
C20	20	420	252	560	448	560	0	112	0	0,6
C30	30	420	252	560	392	560	0	168	0	0,6
C40	40	420	252	560	336	560	0	224	0	0,6
C50	50	420	252	560	280	560	0	280	0	0,6
G10	10	420	252	560	560	504	0	0	56	0,6
G20	20	420	252	560	560	448	0	0	112	0,6
G30	30	420	252	560	560	392	0	0	168	0,6
G40	40	420	252	560	560	336	0	0	224	0,6
G50	50	420	252	560	560	280	0	0	280	0,6

Tablo 3. 5. Seri 3 için Karışım Oranları (GDBA Sınıfları C5 ve C10—Çakıl Agrega İçermez)

Karışım kimliği	GDBA (%)	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Doğal agregası (kg/m ³)			Geri dönüştürülmüş beton agregası (kg/m ³)			S/Ç
				0–4 mm	5–11 mm	12–22 mm	0–4 mm	5–11 mm	12–22 mm	
REF	0	420	252	560	560	560	0	0	0	0,6
F10	10	420	252	504	560	560	56	0	0	0,6
F20	20	420	252	448	560	560	112	0	0	0,6
F30	30	420	252	392	560	560	168	0	0	0,6
F40	40	420	252	336	560	560	224	0	0	0,6
F50	50	420	252	280	560	560	280	0	0	0,6
C10	10	420	252	560	504	560	0	56	0	0,6
C20	20	420	252	560	448	560	0	112	0	0,6
C30	30	420	252	560	392	560	0	168	0	0,6
C40	40	420	252	560	336	560	0	224	0	0,6
C50	50	420	252	560	280	560	0	280	0	0,6

3.1.3. Numune hazırlama ve test yöntemleri

Tüm beton karışımları laboratuvarında hazırlanmış ve test edilmiştir. Numuneler dökümden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve test zamanına kadar 21 ± 1 °C sıcaklıkta tutulan kürleme tankına yerleştirilmiştir. Her karışım, basınç dayanımı (CS) için standart kalıplara dökülmüş ve 150 mm × 150 mm × 150 mm ve 100 mm × 100 mm × 100 mm boyutlarında iki numune küpü kullanılarak belirlenmiştir. 100 mm × 200 mm silindirik numuneler üzerinde ayrılma yarmada çekme dayanımı (STS) ve 100 mm × 100 mm × 400 mm kiriş numuneleri üzerinde eğilme mukavemeti (FS) testleri yapılmıştır. Şekil 3.3, GDBA numuneleri için test prosedürünü göstermektedir ve Hazırlanan numuneler Şekil 3.4, 3.5 ve 3.6’da gösterilmektedir.



Şekil 3. 3. (a) Basınç Dayanımı. (b) Yarma Çekme Dayanımı. (c) Eğilme Dayanımı.



Şekil 3. 4. Seri 1 – Hazırlanmış Beton Numuneler



Şekil 3. 5. Seri 2 – Hazırlanmış Beton Numuneler



Şekil 3. 6. Seri 3 – Hazırlanmış Beton Numuneler

3.2. Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı

Bu bölümde, geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) içeren betonların yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki basınç dayanımı değerlendirilmektedir.

3.2.1. Küp numuneler

Bu çalışmada, yüksek sıcaklık etkisinin betonun basınç dayanımı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla standart boyutlarda küp numuneler hazırlanmıştır. Deneylerde kullanılan küp numuneler, $100 \times 100 \times 100$ mm boyutlarında olup, ilgili standartlara uygun şekilde üretilmiştir.

Numuneler, farklı geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) ikame oranlarına sahip beton karışımlarından elde edilmiştir. Bu kapsamda, her bir karışım için belirlenen ikame oranlarına göre numuneler hazırlanmış ve her deney serisi için yeterli sayıda numune üretilerek deneysel sonuçların güvenilirliği sağlanmıştır.

Deney programı kapsamında, her bir karışım ve sıcaklık seviyesi için birden fazla küp numune hazırlanmış olup, toplam numune sayısı deney matrisi doğrultusunda belirlenmiştir. Numuneler, döküm işleminden sonra 24 saat kalıpta bekletilmiş, ardından kalıptan çıkarılarak standart kür koşullarında 28 gün süreyle kür edilmiştir.

Hazırlanan küp numuneler, farklı sıcaklık seviyelerine (24, 150, 300, 450 ve 600 °C) maruz bırakıldıktan sonra basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur. Numunelerin tanımlanmasında, kullanılan GDBA oranı ve karışım türünü ifade eden kodlar (örneğin: GDBA0, GDBA10, GDBA20 vb.) kullanılmıştır.

3.2.2. Beton karışım oranları

Bu çalışmada kullanılan beton karışımları, farklı geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) ikame oranlarına göre hazırlanmıştır. Doğal agregalar, %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında GDBA ile kısmi olarak değiştirilmiştir. Karışımlarda, agrega fraksiyonları 0–4 mm, 5–11 mm ve 12–22 mm olacak şekilde üç farklı tane boyutu dikkate alınmıştır. GDBA ikame işlemi, her bir agrega fraksiyonu için eşit oranlarda uygulanmıştır. GDBA oranının artmasıyla birlikte doğal agrega miktarı azaltılmış ve aynı oranda geri dönüştürülmüş agrega ilave edilmiştir. Tüm karışımlarda su/çimento oranı 0,6 olarak sabit tutulmuş olup, çimento ve su miktarları değiştirilmemiştir. Bu sayede, beton karışımlarında yalnızca GDBA oranının etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Hazırlanan beton karışımlarına ait detaylı oranlar Tablo 3.6’de sunulmuştur.

Tablo 3. 6. Beton karışım oranları ve GDBA ikame oranları

Karışım kimliği	GDBA (%)	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Doğal agrega (kg)			Geri dönüştürülmüş beton agregası (kg/m ³)			S/Ç
				0–4 mm	5–11 mm	12–22 mm	0–4 mm	5–11 mm	12–22 mm	
GDB 0	0	20	12	20	20	20	0	0	0	0,6
GDB10	10	20	12	18	18	18	2	2	2	0,6
GDB20	20	20	12	16	16	16	4	4	4	0,6
GDB30	30	20	12	14	14	14	6	6	6	0,6
GDB40	40	20	12	12	12	12	8	8	8	0,6
GDB50	50	20	12	10	10	10	10	10	10	0,6

3..2.3. Yüksek sıcaklık deneyleri (küp numuneler)

Bu çalışmada, betonun yüksek sıcaklık altındaki performansını değerlendirmek amacıyla küp numuneler üzerinde yüksek sıcaklık deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler, kontrollü bir ısıtma programı ile elektrikli fırın içerisinde yürütülmüştür. Küp numuneler, 24 °C (referans), 150 °C, 300 °C, 450 °C ve 600 °C sıcaklıklara maruz bırakılmış ve hedef sıcaklıkta 1 saat bekletilmiştir. Isıtma sonrası numuneler fırın içerisinde doğal olarak soğutulmuş ve oda sıcaklığına ulaştıktan sonra deneylere hazır hale getirilmiştir. Numunelerin fırın içerisindeki yerleşimi Şekil 3.7 verilmiştir. Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası numunelerde oluşan fiziksel değişimler ise Şekil 3.8 ve 3.9 gösterilmektedir. Yüksek sıcaklık etkisiyle numunelerde renk değişimi ve yüzey çatlakları gözlemlenmiş olup, bu durum betonun iç yapısındaki bozulmalar ile ilişkilendirilmektedir.



Şekil 3. 7. Fırın içerisine yerleştirilen beton küp numuneleri.



Şekil 3. 8. Isıtma öncesi GDB küpü.



Şekil 3. 9. Isıtma sonrası GDB küpü.

3.3. Döşeme Deneyleri

Bu bölümde, farklı oranlarda geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) içeren betonarme döşeme numunelerinin hazırlanması ve test yöntemleri ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Döşeme beton karışımları, deneysel program kapsamında sabit 0.60 su/çimento (S/Ç) oranı kullanılarak hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda bağlayıcı olarak EN 197-1 standardına uygun CEM IV/B (P) 32.5 R-SR puzolanik çimento kullanılmıştır. Referans numunesi dâhil olmak üzere toplam altı farklı beton karışımı hazırlanmış olup, doğal agreganın kütlege %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) ile ikame edilmesi esas alınmıştır.

3.3.1. Beton karışım oranları

Döşeme deneyleri kapsamında altı farklı beton karışımı tasarlanmıştır. Geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA), 28 günlük deneyler sonrasında elde edilen beton küp, silindir ve kiriş numunelerinden üretilmiştir. Kırılan beton numuneleri çelik çekiç

yardımıyla parçalanmış ve ardından 0–4 mm, 5–11 mm ve 12–22 mm tane boyutu fraksiyonlarını elde etmek amacıyla elek analizi uygulanmıştır. Elde edilen GDBA fraksiyonları, beton üretimi öncesinde laboratuvar koşullarında muhafaza edilmiştir.

Hazırlanan GDBA, doğal agreganın kütlece %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında ikame edilmesi şeklinde, her bir tane boyutu fraksiyonu için eş zamanlı olarak beton karışımlarına dahil edilmiştir. Karışımlar GDBA0, GDBA10, GDBA20, GDBA30, GDBA40 ve GDBA50 olarak adlandırılmış olup, GDBA0 yalnızca doğal agregaya içeren referans karışımı temsil etmektedir. Tüm karışımlarda su/çimento oranı (S/Ç) 0,60 olarak sabit tutulmuştur. Beton karışımlarına ait ayrıntılı oranlar Tablo 3.7’de sunulmuştur.

Tablo 3. 7. Döşeme numunelerinin beton karışım oranları

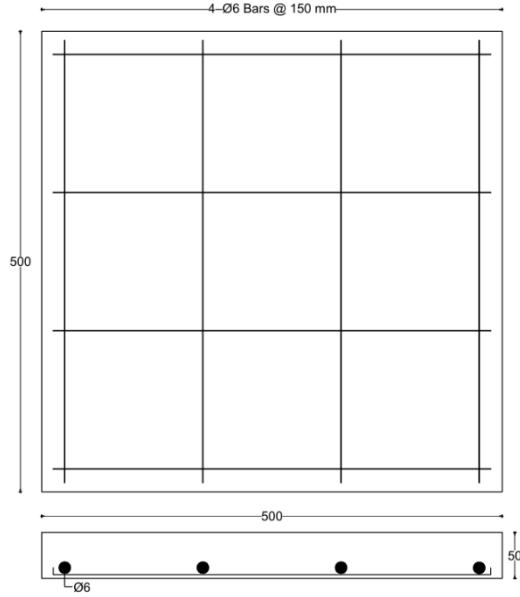
Karışım kimliği	GDBA (%)	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Doğal agregası (kg)			Geri dönüştürülmüş beton agregası (kg/m ³)			S/Ç
				0–4 mm	5–11 mm	12–22 mm	0–4 mm	5–11 mm	12–22 mm	
GDB 0	0	20	12	20	20	20	0	0	0	0,6
GDB10	10	20	12	18	18	18	2	2	2	0,6
GDB20	20	20	12	16	16	16	4	4	4	0,6
GDB30	30	20	12	14	14	14	6	6	6	0,6
GDB40	40	20	12	12	12	12	8	8	8	0,6
GDB50	50	20	12	10	10	10	10	10	10	0,6

3.3.2. Döşeme numunesi detayları

Döşeme deneyleri kapsamında, altı farklı beton karışımından 500 × 500 × 50 mm boyutlarında betonarme döşeme numuneleri üretilmiş ve ortam ile yüksek sıcaklık koşulları altında eğilme performansları değerlendirilmiştir. Beton karışımları, standart bir karıştırma prosedürü izlenerek tamburlu karıştırıcı kullanılarak hazırlanmıştır. İlk olarak, SSD koşulundaki ince ve kaba agregalar 2 dakika süreyle kuru olarak karıştırılmış, ardından çimento ilave edilerek karıştırma işlemine 1 dakika daha devam edilmiştir. Süperakışkanlaştırıcı katkı, karıştırma suyunun bir kısmı içerisinde çözülerek karışıma

kademeli olarak eklenmiş ve karıştırma işlemi 2 dakika sürdürülmüştür. Son olarak kalan su ilave edilerek homojen bir karışım elde edilinceye kadar yaklaşık 3 dakika daha karıştırma yapılmıştır. Hazırlanan beton, iç boyutları $500 \times 500 \times 50$ mm olan kare levha kalıplarına dökülmüş ve üst yüzey çelik mala ile düzeltilmiştir. Döküm sonrası numuneler nem kaybını önlemek amacıyla polietilen örtüler ile kapatılmış ve 24 saat sonra kalıptan çıkarılmıştır. Numuneler, deneyler öncesinde 28 gün süreyle laboratuvar ortam koşullarında (20 ± 2 °C) kür edilmiştir.

Döşeme numunelerinde kullanılan tek kat $\phi 6$ hasır donatı yerleşimi ve geometrik boyutlar Şekil 3.10a’da, döküm öncesi kalıp içerisindeki donatı düzeni ise Şekil 3.10b’de gösterilmektedir. Deney programı kapsamında, her beton karışımı için farklı sıcaklık seviyelerinde üçer adet döşeme numunesi hazırlanmıştır. Numuneler 24 °C, 150 °C, 300 °C, 450 °C ve 600 °C sıcaklık seviyelerinde test edilmiştir. Deney programına ait detaylar ve numune sayıları Tablo 3.10’da sunulmaktadır.



Şekil 3. 10. Döşeme numunelerine ait detaylar: (a) Donatı yerleşimi ve geometrik boyutlar, (b) Beton dökümü öncesinde kalıp içerisindeki donatı yerleşimi

Tablo 3. 8. Döşeme numuneleri deney programı

Sıcaklık (°C)	Numune Boyutu (mm)	GDBA Oranı (%)
24	500 × 500 × 50	0, 10, 20, 30, 40, 50
150	500 × 500 × 50	0, 10, 20, 30, 40, 50
300	500 × 500 × 50	0, 10, 20, 30, 40, 50
450	500 × 500 × 50	0, 10, 20, 30, 40, 50
600	500 × 500 × 50	0, 10, 20, 30, 40, 50

Her sıcaklık seviyesi için 6 farklı GDBA ikame oranına sahip toplam 6 adet döşeme numunesi test edilmiştir.

3.3.3. Numune hazırlama ve test yöntemleri

Bu bölümde döşeme numunelerinin hazırlanma süreci, kür koşulları ve uygulanan deney yöntemleri açıklanmaktadır. Deney programı, farklı geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) ikame oranları ile yüksek sıcaklık etkisinin betonarme döşemelerin davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla oluşturulmuştur. Bu kapsamda, GDBA0–GDBA50 arasında değişen 6 farklı ikame oranı ile 24, 150, 300, 450 ve 600 °C olmak üzere 5 farklı sıcaklık seviyesi dikkate alınmıştır. Buna göre deney programı toplam 30 adet döşeme numunesinden oluşmaktadır.

3.3.3.1. Döşeme numunesi geometrisi

Numuneler, laboratuvar ortamında bulunan hidrolik test makinesinde iki adet silindirik merdane mesnet (R_1 ve R_2) üzerine 500 mm açıklık olacak şekilde yerleştirilmiştir. Deney sırasında numuneler tek yönlü eğilme davranışı altında test edilmiştir. Yük, döşemenin üst orta noktasına yerleştirilen çelik yükleme plakası üzerinden ve U şeklinde yük aktarma başlığı aracılığıyla tekil yük olarak uygulanmıştır. Şekil 3.11, Deney düzeneği fotoğrafı gösterilmektedir.



Şekil 3. 11. Deney düzeneği fotoğrafı

3.3.4. Deney matrisi

Deney programı, 6 farklı karışım grubu (GDBA0, GDBA10, GDBA20, GDBA30, GDBA40 ve GDBA50) ile 5 farklı sıcaklık düzeyinin (24, 150, 300, 450 ve 600 °C) kombinasyonundan oluşmaktadır. Her bir karışım ve sıcaklık kombinasyonu için bir adet döşeme numunesi üretilmiş ve test edilmiştir. Bu kapsamda deney programı toplam 30 adet döşeme numunesini içermektedir. Tüm numuneler, Şekil 3.12, görüldüğü üzere, üzerlerine karışım kimliği ve uygulanan sıcaklık düzeyi yazılarak sistematik bir şekilde etiketlenmiştir.



Şekil 3. 12. Deney programında kullanılan betonarme döşeme numuneleri

3.3.5. Yüksek sıcaklık deneyleri

Döşeme numunelerinde yüksek sıcaklık etkisini incelemek amacıyla, numuneler 28 günlük kür süresinin ardından farklı sıcaklık seviyelerine maruz bırakılmıştır. Deneylerde 24 °C (oda sıcaklığı), 150 °C, 300 °C, 450 °C ve 600 °C olmak üzere beş farklı sıcaklık seviyesi dikkate alınmıştır. Numuneler, kontrollü koşullar altında elektrikli bir fırın kullanılarak ısıtılmıştır. Fırın içindeki sıcaklık, hedef sıcaklığa ulaşmaya kadar kademeli olarak artırılmıştır. Hedef sıcaklığa ulaşıldıktan sonra, beton içerisinde homojen sıcaklık dağılımını sağlamak amacıyla numuneler 1 saat bu sıcaklıkta bekletilmiştir. Isıtma sürecinin ardından fırın kapatılmış ve numuneler oda sıcaklığına ulaşmaya kadar fırın içerisinde doğal olarak soğumaya bırakılmıştır. Isıl şok oluşumunu önlemek amacıyla soğuma sürecinde numuneler fırından çıkarılmamıştır.

Döşeme numunelerinde yüksek sıcaklık etkisini daha gerçekçi bir şekilde temsil edebilmek amacıyla tek yüzeyden ısıtma yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde, döşeme numunelerinin yalnızca alt yüzeyi ısı kaynağına maruz bırakılmış, üst yüzey ise doğrudan ısıtılmamıştır. Bu yaklaşım, gerçek yapı elemanlarında yangın durumunda oluşan tek yönlü ısı etkisini temsil etmek amacıyla tercih edilmiştir. Tek yüzeyden ısıtma için kullanılan deney düzeneği Şekil 3.13'te gösterilmektedir. Soğuma işleminin

tamamlanmasının ardından numuneler fırından çıkarılmış ve eğilme davranışı ile yük taşıma kapasiteleri açısından test edilmiştir. Deney programına ait sıcaklık seviyeleri ve numune sayıları Tablo 3.9’de sunulmaktadır.

Tablo 3. 9. Yüksek Sıcaklık Deneyi Isıtma Programı

Grup	Hedef Sıcaklık (°C)	Bekleme Süresi	Soğutma	Test Zamanı
T-24	24 °C (oda sıcaklığı)	—	—	Doğrudan
T-150	150 °C	1 saat	Oda sıcaklığına soğutma	Soğuma sonrası
T-300	300 °C	1 saat	Oda sıcaklığına soğutma	Soğuma sonrası
T-450	450 °C	1 saat	Oda sıcaklığına soğutma	Soğuma sonrası
T-600	600 °C	1 saat	Oda sıcaklığına soğutma	Soğuma sonrası



Şekil 3. 13. Döşeme numunelerinin tek yüzeyden ısıtılması için kullanılan deney düzeneği.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular sunulmakta ve ilgili literatür ile karşılaştırılarak tartışılmaktadır.

4.1. Mekanik Özellikler Sonuçları

Bu bölümde, geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) içeren betonların mekanik özelliklerine ait deney sonuçları değerlendirilmektedir.

4.1.1. Basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.1 'te gösterildiği gibi, dört farklı mukavemet sınıfı (C13, C15, C25 ve C50) için %10, %20 ve %30 oranında geri dönüştürülmüş beton agrega içeren seri 1'in 28 günlük beton küplerinin basınç mukavemeti. Bulgular, içeriğinin artmasıyla basınç mukavemetinin azaldığını açıkça göstermektedir.

C13 karışımı için basınç mukavemeti, kontrol karışımına kıyasla %10, %20 ve %30 GDBA için sırasıyla %6,03, %8,05 ve %12,94'e düşmüştür. C15 mukavemetinde değerler, kontrol karışımına kıyasla sırasıyla %1,2, %3,0 ve %5,1 oranında hafifçe düşmüştür. C25 mukavemet sınıfı sonuçları, GDBA'nın basınç mukavemeti üzerindeki etkisinin minimum olduğunu göstermektedir. Mukavemet, %10 GDBA'da %0,16'ya çok hafif bir artış gösterirken, %20 ve %30 GDBA'da sırasıyla %0,94 ve %1,23'lük küçük düşüşler görülmüştür. C50 mukavemet sınıfında, CS, GDBA içeriğinin artmasıyla sadece hafif bir düşüş göstermektedir. 10%, 20% ve 30% GDBA karışımları sırasıyla %0,39, %2,07 ve %2,14 azalmıştır.

Seri 1'in deneysel sonuçları, GDBA ikame oranı ile basınç dayanımı arasında açık bir ters ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, bu azalmanın boyutu, neredeyse tamamen geri dönüştürülmüş agregaların elde edildiği ana betonun kalitesine bağlıdır. Mukavemet kaybı, düşük kaliteli C13 GDBA içeren karışımlarda en şiddetli, C15'te orta derecede iken, C25 ve C50 agregaları içeren numunelerde belirgin şekilde daha az bozulma görülmüştür. Bu model, orijinal betonun doğal mukavemeti, gözenek yapısı ve genel kalitesinin, yeni oluşan matrisin performansını kontrol eden belirleyici faktörler olmaya devam ettiğini gösteren temel çalışmalarla tutarlıdır (Sri Ravindrarajah ve Tam, 1985b).

Pratik karışım tasarımı ile ilgili olarak, %10 ve %20'lik ikame oranlarının tüm mukavemet sınıflarında tatmin edici yapısal bütünlüğü koruduğu bulunmuştur. Daha

kritik bir değişim, basınç mukavemetinin keskin bir şekilde düştüğü %30 ikame seviyesinde gözlemlenmiştir. Bu geçiş, mekanik performansın önemli ölçüde bozulduğu eşik değer olarak benzer şekilde %30'u belirleyen, geri dönüştürülmüş agregaların yapısal kullanımı için belirlenmiş önerilerle uyumludur (Xiao vd., 2005b).

şekil 4.2, üç farklı mukavemet sınıfı (C13, C15 ve C25) için %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında ince geri dönüştürülmüş beton agregaları (F-GDBA) içeren seri 2 beton karışımlarının sonuçlarını göstermektedir. Sonuçlar, F-GDBA içeriği arttıkça basınç dayanımının azaldığını göstermektedir. Bu azalma, çoğunlukla geri dönüştürülmüş ince agregalarla ilişkili yüksek gözeneklilik ve yapışmış harçtan kaynaklanmaktadır.

C13-F için basınç dayanımı, sırasıyla %10, %20, %30, %40 ve %50 F- ikame oranlarında %5,34, %6,48, %9,65, %12,77 ve %16,61'e düşmüştür. Bu, ikame oranlarının artmasıyla tutarlı bir düşüş olduğunu göstermektedir. C15-F mukavemet sınıfı, kontrol karışıma kıyasla sırasıyla %3,34, %6,08, %8,70, %12 ve %14,8'e benzer bir düşüş göstermiştir. C25-F karışımları için CS, sırasıyla %10, %20, %30, %40 ve %50 GDBA için %1,76, %4,13, %8,26, %9,58 ve %13,58'e düşmüştür. Bu, daha yüksek kaliteli betonun bile, artan ikame seviyelerinde ince GDBA'dan etkilendiğini göstermektedir.

şekil 4.3, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında iri geri dönüştürülmüş beton agregaları (C-GDBA) içeren Seri 2 beton karışımlarının 28 günlük basınç dayanımını göstermektedir. İnce GDBA karışımlarına benzer şekilde, GDBA içeriğinin artırılması genellikle tüm sınıflar (C13, C15 ve C25) genelinde basınç dayanımını düşürür, ancak düşüş oranı genellikle ince GDBA'ya göre daha düşüktür.

C13-C karışımları için, basınç dayanımı, kontrol karışıma kıyasla, sırasıyla %10, %20, %30, %40 ve %50 C-GDBA karışımlarında %6,2, %6,91, %10,8, %13,28 ve %19,56'ya düşmüştür. C15-C karışımlarında CS sırasıyla %2,7, %5,86, %9,72, %11,91 ve %15,95'e düşmüştür. C25-C mukavemet sınıfı da benzer bir eğilim göstermiş ve C-GDBA ikame seviyelerinde sırasıyla %2,34, %4,68, %8,15, %10,22 ve %14,0'a düşmüştür.

şekil 4.4, çakıl boyutunda geri kazanılmış beton agregaları (G-GDBA) %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında içeren Seri 2 beton karışımlarının 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarını göstermektedir. Diğer serilere benzer şekilde, tüm mukavemet sınıflarının (C13, C15 ve C25) basınç mukavemeti, G-gdba içeriğinin artmasıyla kademeli olarak azalmaktadır; bu durum, yapışan harç ve artan gözenekliliğin olumsuz etkisini doğrulamaktadır. C13-G karışımlarında, basınç dayanımı, ilgili ikame

seviyelerinde sırasıyla %5,45, %7,55, %11,13, %14,46 ve %17,8 oranında azalmıştır. C15-G karışımlarında, CS, ilgili ikame oranlarında sırasıyla %5,12, %6,88, %10,38, %11,27 ve %14,93 oranında azalmıştır; bu da artan GDBA içeriğine karşı orta derecede duyarlılık olduğunu göstermektedir. C25-G mukavemet sınıfı da benzer eğilimler göstermiş ve sırasıyla %0,96, %4,51, %7,74, %10,11 ve %13,44 oranında azalmıştır.

Tüm agrega boyut fraksiyonlarında (İnce (0–4 mm), İri (5–11 mm) ve Çakıl (12–22 mm)) basınç dayanımında tutarlı bir azalma gözlemlenmiştir ve bu azalma, GDBA konsantrasyonunun artmasıyla doğrudan ilişkilidir. Bu mukavemet kaybının derecesinin, agrega parçacık boyutu tarafından önemli ölçüde etkilendiği gösterilmiştir. En olumsuz etkiler, ince GDBA içeren kombinasyonlarda gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, daha ince geri dönüştürülmüş fraksiyonlarda tipik olarak görülen gözeneklilik ve yapışan kalıntı harç hacminin belirgin şekilde artmasıdır. Bu durum, matris yoğunluğunu zayıflatmaktadır (González-Taboada vd., 2016). Buna karşılık, kaba ve çakıl fraksiyonlarında çok hafif bir azalma profili gözlemlenmiştir. Ayrıca, tüm ana mukavemet sınıflarında (C13, C15 ve C25) %30'luk önemli bir kullanım engeli tespit edilmiştir. %10 ve %20'lik ikame seviyeleri, yapısal uygulamalar için optimum mukavemet muhafazasını sağlamışken, %30 eşiğinin aşılması mekanik performansta önemli bir düşüşe yol açmış ve yapısal bütünlüğü korumak için ikame oranlarının sınırlandırılmasının önemini vurgulamıştır (C. Li vd., 2019).

Şekil 4.5, çakıl fraksiyonu (12-22 mm) kullanılmadan ve %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında ince geri dönüştürülmüş beton agregaları (F-GDBA) ilave edilerek üretilen Seri 3 beton karışımlarının 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarını göstermektedir. İki farklı mukavemet sınıfı olan C5 ve C10 değerlendirilmiştir. Önceki serilerde gösterildiği gibi, GDBA içeriği arttıkça basınç dayanımı azalmaktadır.

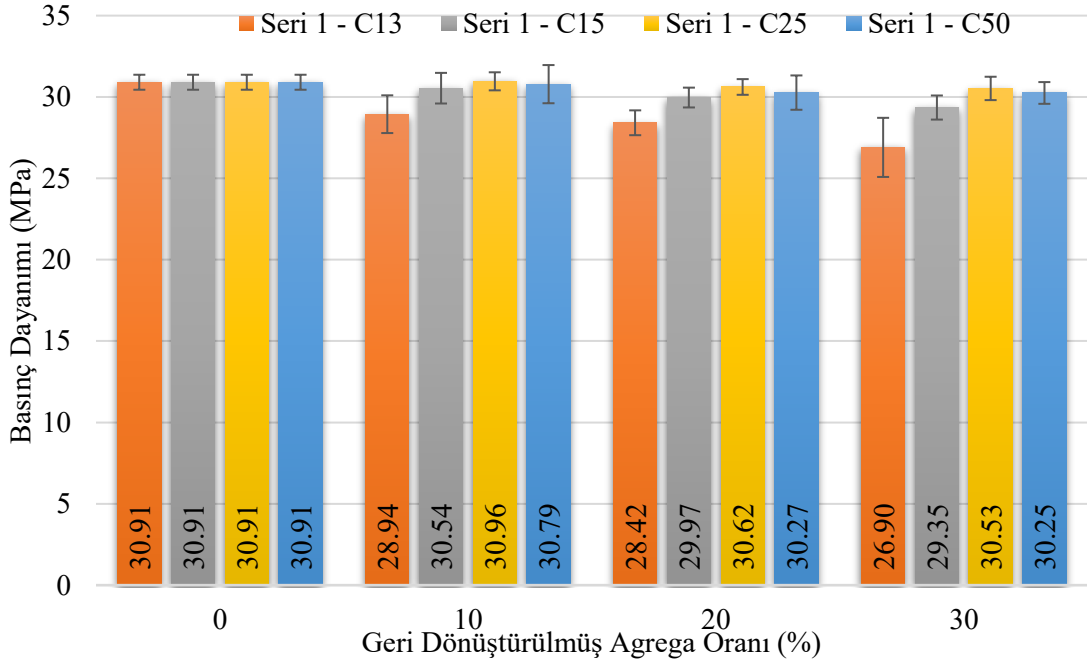
C5-F karışımlarında, basınç dayanımı sırasıyla %10, %20, %30, %40 ve %50 GDBA'da %7,03, %10,84, %13,0, %14,06 ve %17,02'ye düşmüştür. C10-F karışımlarında, basınç dayanımı sırasıyla %4,89, %6,7, %7,73, %9,63 ve %10,95'e düşmüştür.

Şekil 4.6, aynı ikame oranlarında iri geri dönüştürülmüş beton agregaları (C-GDBA) içeren seri 3 karışımlarının basınç dayanımını göstermektedir. F-GDBA karışımlarına benzer bir eğilim görülmekte olup, C-GDBA içeriğindeki artış hem C5 hem de C10 kaynak sınıfları için basınç dayanımında kademeli bir düşüşe neden olmuştur.

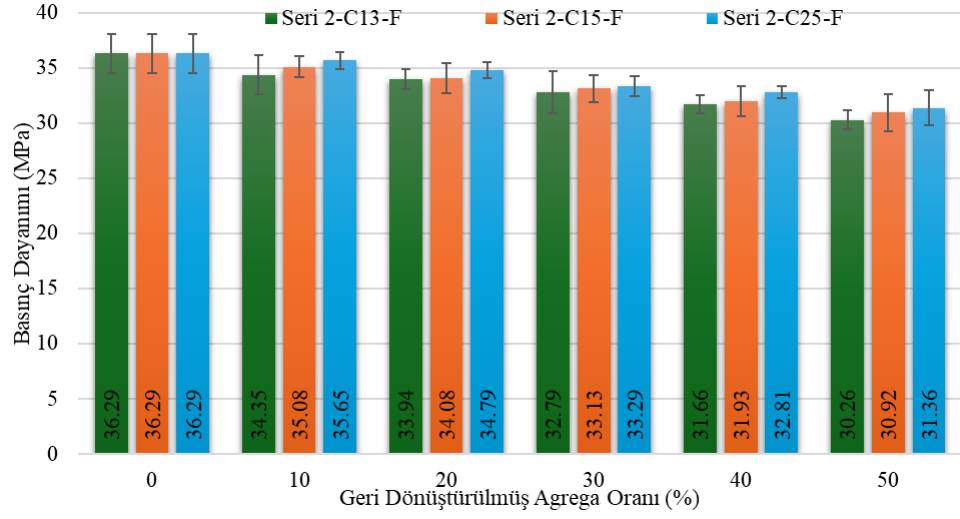
C5-C karışımlarında basınç dayanımı, sırasıyla %10, %20, %30, %40 ve %50 ikame seviyelerinde %9,2, %10,7, %11,0, %13,3 ve %13,5'e düşmüştür. C10-F

karışımlarında basınç dayanımı, C5 karışımlarına benzer ancak biraz daha hafif bir eğilim göstererek %5,4, %6,9, %9,1, %9,5 ve %10,2'ye düşmüştür.

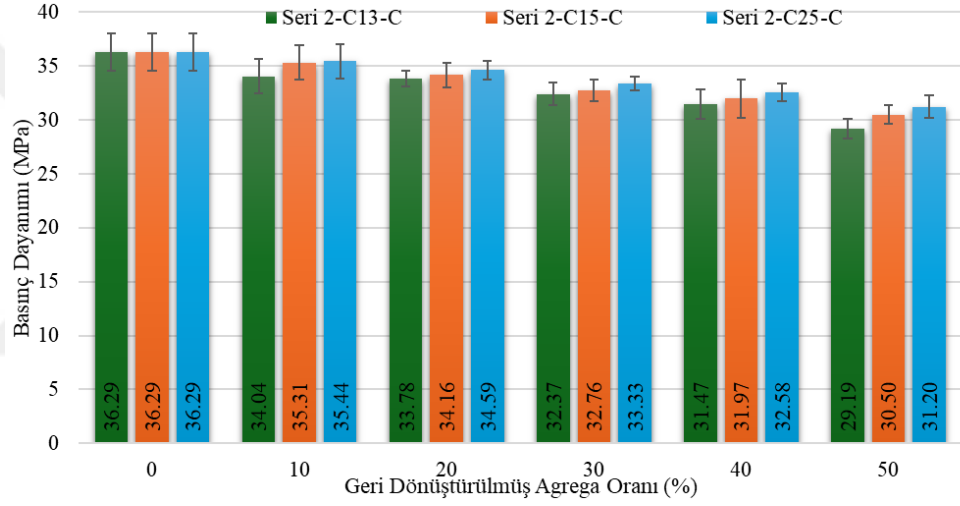
Seri 3'ten elde edilen deneysel veriler, GDBA konsantrasyonu arttıkça basınç dayanımında sürekli bir azalma olduğunu göstermektedir; bu eğilim hem ince hem de kaba agrega fraksiyonlarında gözlemlenmiştir. Mekanik bozulmanın derecesi, ana betonun dayanım sınıflandırmasıyla doğrudan ilişkilidir; ultra düşük dereceli C5 agrega içeren karışımlar, C10 kaynaklı karışımlara göre önemli ölçüde daha fazla dayanım kaybı göstermiştir, bu da orijinal harç matrisinin kalitesinin kritik etkisini vurgulamaktadır (Sabău ve Remolina Duran, 2022). Değiştirme oranlarında belirli bir performans dönüm noktası gözlemlendi. %10–20 aralığındaki değiştirme oranları, mühendislik uygulamaları için optimum mukavemet korumasını sağladı; ancak %30 eşiğinin aşılması, performansta önemli bir bozulmaya yol açtı; bu doğrusal olmayan fenomen, genellikle kompozit içindeki zayıf ITZ'lerin yayılmasıyla ilişkilendirilmektedir (Revilla-Cuesta, Skaf, vd., 2020).



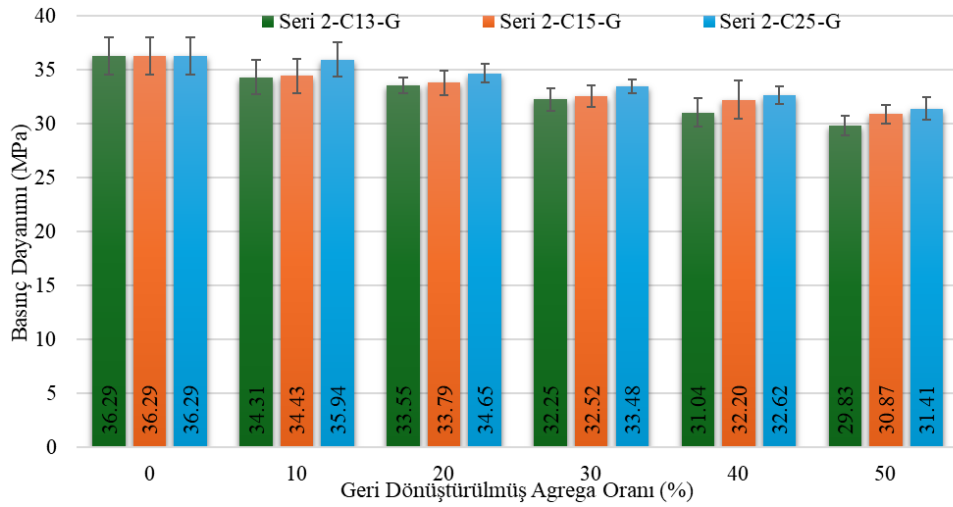
Şekil 4. 1. Seri 1 (C13, C15, C25 ve C50) için basınç dayanımı sonuçları.



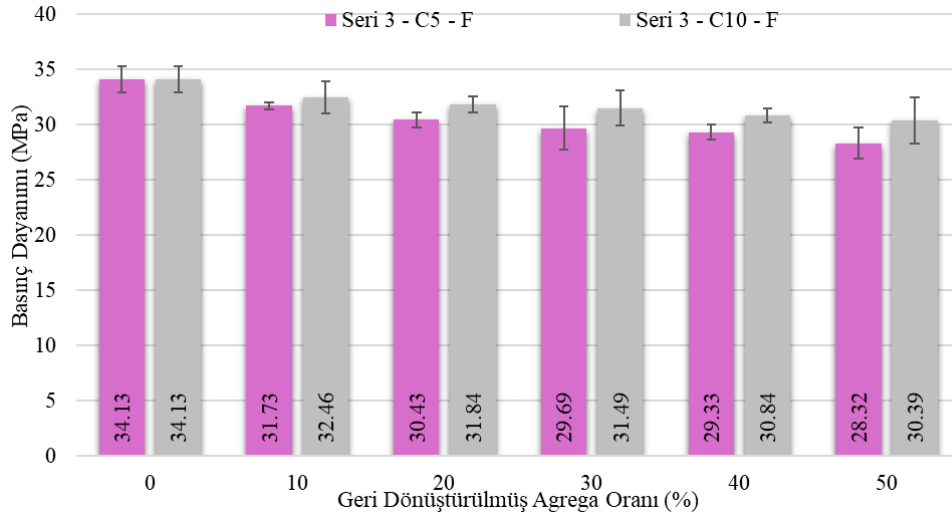
Şekil 4. 2. Seri 2 İnce GDBA (C13-C, C15-C ve C25-C) için basınç dayanımı sonuçları.



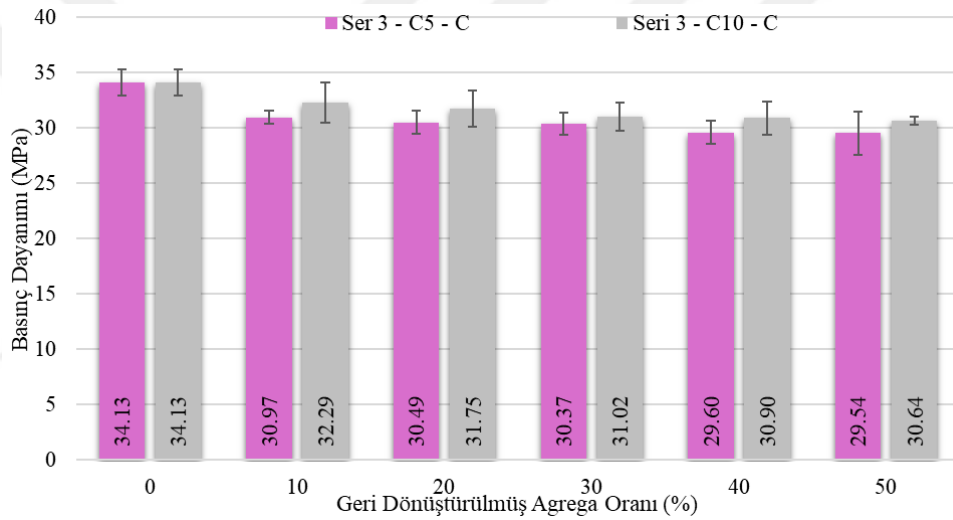
Şekil 4. 3. Seri 2 İri GDBA (C13-C, C15-C ve C25-C) için basınç dayanımı sonuçları.



Şekil 4. 4. Seri 2 çakıl GDBA (C13-G, C15-G ve C25-G) için basınç dayanımı sonuçları.



Şekil 4. 5. Seri 2 ince GDBA (C5-F ve C10-F) için basınç dayanımı sonuçları.



Şekil 4. 6. İri GDBA (C5 -C ve C10-C) kullanılarak seri 3 için basınç dayanımı sonuçları.

4.1.2. Yarmada çekme dayanımı sonuçları

Şekil 4.7, dört farklı mukavemet sınıfı (C13, C15, C25 ve C50) için %10, %20 ve %30 oranında geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) içeren seri 1 beton karışımlarının 28 günlük ayrılma yarmada çekme dayanımını göstermektedir. Bulgular, GDBA içeriğinin artmasıyla birlikte yarmada çekme dayanımını genel olarak azaldığını açıkça göstermektedir. Bu durum, GDBA'nın zayıf yapışkan harcı ve artan gözenekliliği nedeniyle yarmada çekme dayanımında meydana gelen azalmayla tutarlıdır.

C13 karışımlarında yarmada çekme dayanımı, %10, %20 ve %30 ikame seviyelerinde sırasıyla %8,11, %12,00 ve %17,85 oranlarında azalmıştır. C15 karışımlarında ise aynı ikame seviyelerinde değerleri, kontrol karışımına kıyasla sırasıyla

%6,16, %10,38 ve %15,58 oranlarında düşüş göstermiştir. Benzer şekilde, C25 karışımlarında yarmada çekme dayanımı, ilgili ikame oranlarında sırasıyla %5,84, %8,76 ve %13,31 oranlarında azalmıştır. Buna karşılık, C50 karışımlarında STS değerlerinde daha sınırlı bir düşüş gözlenmiş olup, aynı ikame seviyelerinde sırasıyla %1,62, %2,59 ve %3,89 oranlarında azalma meydana gelmiştir.

Tüm Seri 1 kombinasyonlarında bölünme yarmada çekme dayanımı değerlerinde tutarlı bir düşüş gözlemlenmiştir, bu da GDBA ikame seviyelerinin artmasıyla belirgin bir negatif ilişki olduğunu göstermektedir. Bu gerilme bozulmasının derecesinin, sınıfa bağlı olduğu belirlenmiştir; daha düşük mukavemetli matrisler (C13 ve C15), muhtemelen daha düşük sınıf kompozitlerin karakteristik özelliği olan, bozulmuş Arayüz Geçiş Bölgesi ve artmış gözeneklilik nedeniyle en önemli düşüşleri yaşamıştır (L. Xu vd., 2022). Tersine, C50 kalitesi, mukavemetinde çok az azalma ile olağanüstü bir uzun ömür sergilemiştir. Sonuçlar, yüksek mukavemetli çimentolu matrislerin, geri dönüştürülmüş agregaların olumsuz etkilerini etkili bir şekilde azalttığını ve çekme yükleme koşulları altında GDBA ilavesiyle sıklıkla ilişkili eksiklikleri başarıyla maskeleydiğini göstermektedir (Yang vd., 2018).

Şekil 4.8, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında ince geri dönüştürülmüş beton agregaları (F-GDBA) içeren Seri 2 beton karışımlarının 28 günlük yarmada çekme dayanımı sonuçlarını göstermektedir. Üç farklı mukavemet sınıfı (C13, C15 ve C25) değerlendirilmiştir. Bulgular, esas olarak ince geri dönüştürülmüş agregaların yüksek gözenekliliği ve yapışmış harcı nedeniyle, F-GDBA içeriğinin artmasıyla Çekme Dayanımı 'nin tutarlı bir şekilde azaldığını göstermektedir.

C13-F karışımlarında, yarmada çekme dayanımı, kontrol karışımına kıyasla, sırasıyla %10, %20, %30, %40 ve %50 ikame seviyelerinde sırasıyla %7,35, %11,7, %14,38, %22,4 ve %27,09'a düşmüştür. C15-F karışımlarında çekme dayanımı sırasıyla %5,68, %10,7, %13,37, %19,39 ve %25,08'e düşmüştür. C25-F karışımlarında STS, sırasıyla %3,01, %9,36, %12,37, %16,38 ve %23,41'e hafifçe düşmüştür. Çekme Dayanımı, tüm mukavemet sınıfları için F-GDBA içeriğinin artmasıyla önemli ölçüde azalmaktadır. %30 GDBA'nın ötesinde, azalmalar daha belirgin hale gelmiştir; C13-F en büyük azalmayı gösterirken, C15-F en küçük kayıpları göstermiştir.

Şekil 4.9, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında iri geri dönüştürülmüş beton agregaları (C-GDBA) içeren seri 2 beton karışımları için yarmada çekme dayanımı sonuçlarını göstermektedir. F-GDBA'ya benzer şekilde, yarmada çekme dayanımı, GDBA içeriğinin artmasıyla birlikte kademeli bir azalma göstermektedir. Genel olarak,

C-GDBA'nın harç kirliliği daha düşük ve yüzey alanı daha az olduğu için azalma oranı daha düşüktür.

C13-C karışımlarında yarmada çekme dayanımı sırasıyla %3,67, %9,36, %14,04, %25,08 ve %29,09'a düşmüştür. C15-C karışımlarında, yarmada çekme dayanımı, C13-F için aynı ikame seviyelerinde %2,67, %7,69, %11,7, %20,73 ve %25,41'e düşmüştür. C25-C karışımlarında, yarmada çekme dayanımı sonuçları sırasıyla %1,67, %7,35, %11,03, %17,72 ve %24,08'e düşmüştür. Daha yüksek mukavemet dereceli betonun çekme kapasitesinin biraz daha iyi olduğunu doğrulamaktadır. C-GDBA karışımlarının sonuçları, yarmada çekme dayanımı kayıplarının %30'un üzerindeki ikame seviyelerinde daha belirgin hale gelmesiyle birlikte açık bir azalma eğilimi göstermiştir. Daha yüksek mukavemet sınıfına sahip beton (C25), daha düşük mukavemet sınıfına sahip betona (C13-C15) kıyasla daha az azalma göstermektedir.

Şekil 4.10, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında geri dönüştürülmüş çakıl beton agregaları (G-GDBA) içeren seri 2 beton karışımlarının 28 günlük yarmada çekme dayanımı sonuçlarını göstermektedir. İnce ve kaba GDBA'ya benzer şekilde, tüm mukavemet sınıflarında (C13, C15 ve C25) azalma eğilimi gözlemlenmiştir ve daha yüksek ikame seviyelerinde daha fazla azalma meydana gelmiştir.

C13-G karışımlarında yarmada çekme dayanımı, kontrol karışımıyla karşılaştırıldığında sırasıyla %5,68, %12,37, %14,71, %26,75 ve %26,75'e düşmüştür. C15-G karışımlarında yarmada çekme dayanımı, GDBA içeriği arttıkça sırasıyla %3,67, %10,34, %13,04, %18,72 ve %24,41'e düşmüştür. C25-G karışımlarında yarmada çekme dayanımı, sırasıyla %1,33, %8,02, %10,03, %16,72 ve %21,07'ye düşmüştür, bu da daha yüksek mukavemet derecelerinin daha yüksek GDBA yüzdelerinden etkilendiğini göstermektedir. Yırtılma mukavemeti, G-GDBA içeriğinin artmasıyla tutarlı bir düşüş göstermiştir. Mukavemet düşüşleri, GDBA'nın %30'un üzerinde önemli hale gelmiştir; C13 en yüksek hassasiyeti gösterirken, C25 en düşük hassasiyeti göstermiştir. G-GDBA, ince ve kaba GDBA arasında kalan orta düzeyde özellikler göstermektedir.

F-GDBA (0-4 mm), C-GDBA (5-11 mm) ve G-GDBA (12-22 mm) agrega boyut fraksiyonlarının üçü de GDBA içeriğinin artmasıyla birlikte yarmada çekme dayanımında tutarlı bir azalma göstermiştir. En büyük azalmalar, daha yüksek gözeneklilik, zayıf yapışan harç ve geniş yüzey alanı nedeniyle F-GDBA (0-4 mm) içeren karışımlarda meydana gelmiştir. Agregası ve çimento harcı arasındaki bağı olumsuz etkileyen faktörler. C-GDBA en az azalma gösterirken, G-GDBA orta düzeyde bir tepki gösterdi. Tüm mukavemet sınıfları (C13, C15 ve C25) için, Çekme Dayanımı kayıpları %30'un üzerinde

daha belirgin olarak görülürken, %10 ve %20 ikame seviyeleri daha iyi performans gösterdi. Bulgular, GDBA parçacık boyutu ve ikame yüzdesinin yarmada çekme dayanımı gelişimini etkilediğini göstermektedir. İnce parçacık boyutuna sahip GDBA, yarmada çekme dayanımı 'de en önemli düşüşlere neden olurken, kaba parçacık boyutuna sahip GDBA optimal performans gösterdi.

Şekil 4.11, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında ince geri dönüştürülmüş beton agregaları (F-GDBA) içeren seri 3 beton karışımlarının 28 günlük ayrılma yarmada çekme dayanımı sonuçlarını göstermektedir. İki kaynak mukavemet sınıfı (C5 ve C10) incelenmiştir. Sonuçlar, GDBA içeriğinin artmasıyla yarmada çekme dayanımı 'de belirgin bir azalma olduğunu göstermektedir. Bu, yapışkan harç ve daha ince geri dönüştürülmüş sürtünmede artan gözenekliliğin etkisini göstermektedir.

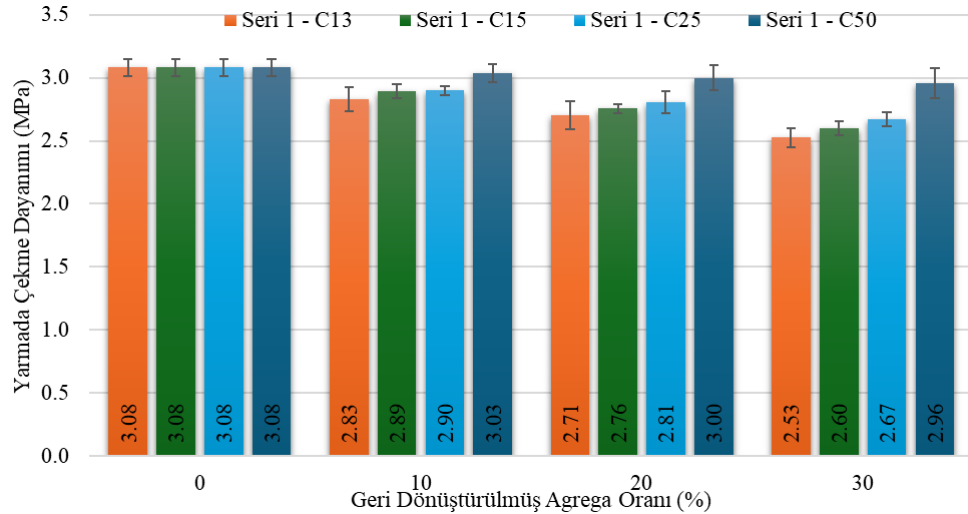
C5-F karışımlarında yarmada çekme dayanımı, ikame seviyelerinde sırasıyla %12,7, %16,45, %22,67, %27,01 ve %30,74'e düşmüştür.

C10-F karışımlarında yarmada çekme dayanımı, ilgili ikame seviyeleri için kontrol karışımına kıyasla %3,72, %11,8, %15,83, %19,87 ve %23,98'e düşmüştür. Seri 3 F-GDBA sonuçları, ince geri dönüştürülmüş beton agregalarının yarmada çekme dayanımı performansını önemli ölçüde etkilediğini, özellikle de %30'u aşan ikame seviyelerinde bu etkinin daha belirgin olduğunu göstermektedir. Bu eğilim, daha yüksek gözeneklilik, artan açısallık ve daha fazla yapışkan harç içeriği gibi ince geri dönüştürülmüş beton agregalarının doğal özellikleriyle tutarlıdır. Tüm bu özellikler, zayıflamış bir arayüzey geçiş bölgesine katkıda bulunur. F-GDBA içeriği arttıkça yarmada çekme dayanımı kademeli olarak azalmıştır. Azalmalar C5 karışımlarında daha belirginken, C10 karışımları daha iyi gerilme kapasitesi mukavemeti göstermiştir. İkame seviyeleri %30'un üzerinde olduğunda, performansta önemli bir düşüş görülmüştür.

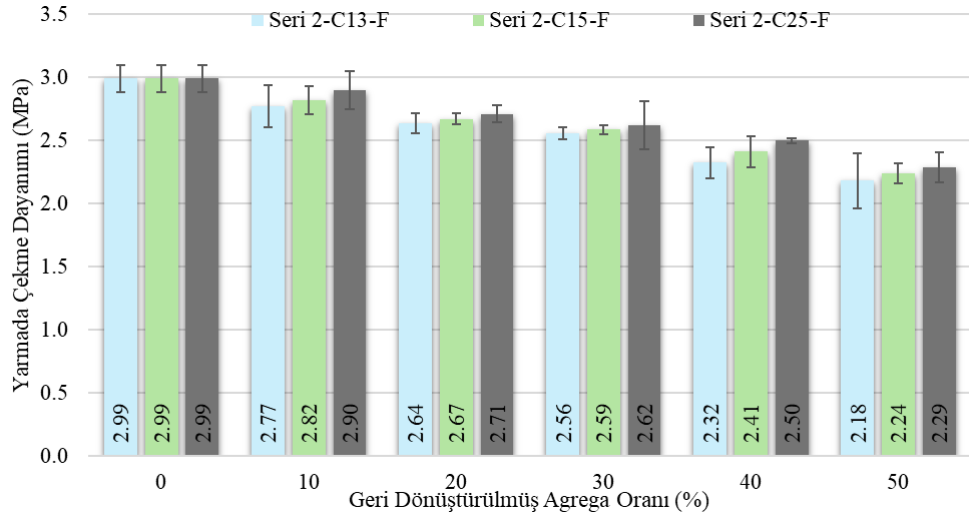
Şekil 4.12, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında iri geri dönüştürülmüş beton agregaları (C-GDBA) içeren Seri 3 beton karışımları için 28 günlük yarmada çekme dayanımı sonuçlarını göstermektedir. İki kaynak mukavemet sınıfı (C5 ve C10) değerlendirilmiştir. Sonuçlar F-GDBA karışımlarına benzerdir. GDBA içeriği arttıkça yarmada çekme dayanımı kademeli bir azalma görülmektedir. Ancak, C-GDBA'da yapışkan harç daha az olduğundan ve genel gözeneklilik daha düşük olduğundan, azalma genellikle daha azdır. C5-C karışımlarında, yarmada çekme dayanımı sırasıyla %10, %20, %30, %40 ve %50 C-GDBA'da %9,0, %19,25, %23,91, %27,63 ve %29,5'e düşmüştür. Bu, karışımdaki GDBA miktarından çok etkilendiklerini göstermektedir.

C10-C karışımlarında, yarmada çekme dayanımı sırasıyla %5,27, %13,97, %18,32, %18,63 ve %23,29'a düşmüştür. Bu, C5-C karışımlarından daha düşük bir değerdir ve daha yüksek kaliteli kaynak betonun yarmada çekme dayanımı kaybına karşı daha dirençli olduğunu göstermektedir. C-GDBA sonuçları, iri geri dönüştürülmüş agregaların ayrılma yarmada çekme dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, bu azalma, ince GDBA ile gözlemlenene kıyasla daha az şiddetlidir. %30'un üzerindeki GDBA ikame seviyeleri, özellikle daha düşük kaynak mukavemet dereceleriyle üretilen karışımlarda önemli düşüşlere yol açmaktadır.

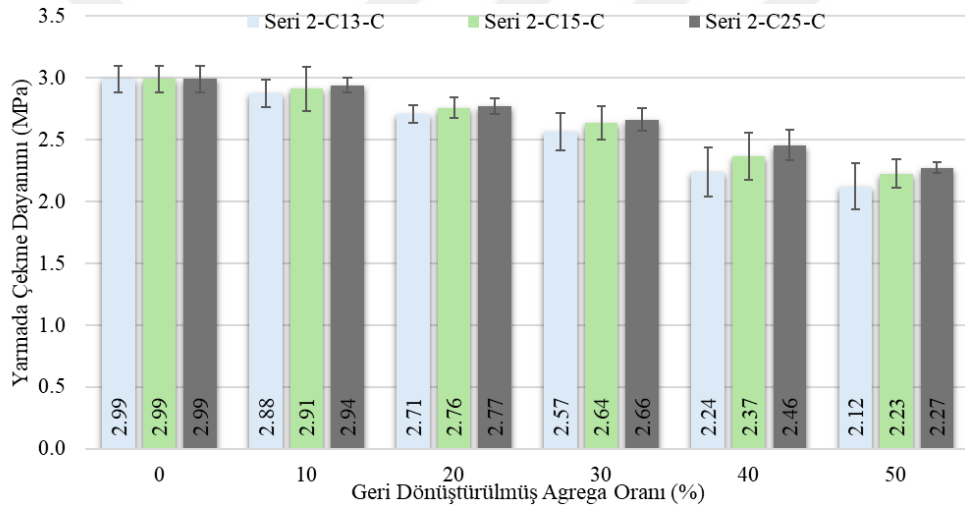
Seri 3 için yarmada çekme dayanımı testlerinin sonuçları, geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) içeriği, ince geri dönüştürülmüş beton agregası (F-GDBA) ve kaba geri dönüştürülmüş beton agregası (C-GDBA) fraksiyonları arttıkça tutarlı bir düşüş göstermektedir. C5 ve C10 mukavemet derecelerinde, ikame oranı %10'dan %50'ye çıktıkça yarmada çekme dayanımı kademeli olarak azalmıştır. Azalmalar C5 karışımlarında daha belirgindir, bu da daha düşük dereceli kaynak betonun GDBA ilavesine daha etkili olduğunu göstermektedir. İnce GDBA, daha yüksek gözenekliliği ve daha fazla yapışan harç nedeniyle en büyük düşüşleri göstermiştir. Kaba GDBA daha küçük düşüşler göstermiştir, %30'dan fazla ikame seviyelerinde önemli bir mukavemet kaybı olmuştur. %10 ve %20 ikame seviyelerinde ise her iki agregası türü ve mukavemet derecesi için daha iyi performans gösterilmiştir.



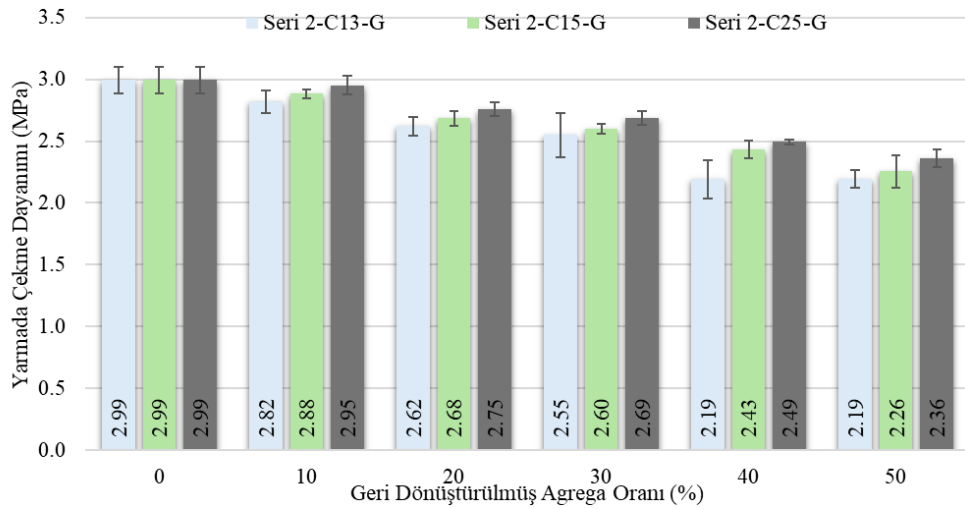
Şekil 4. 7. Seri 1 (C13, C15, C25 ve C50) için yarmada çekme dayanımı sonuçları



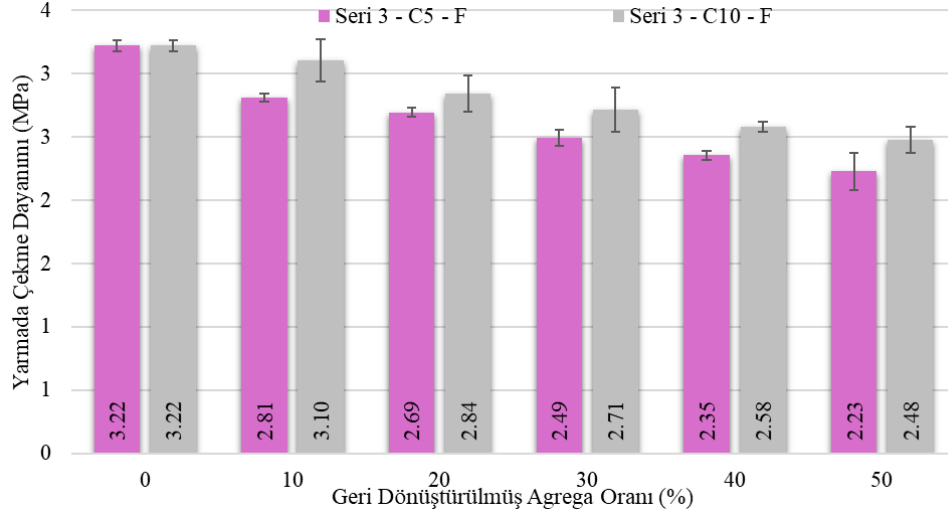
Şekil 4. 8. İnce GDBA (C13-F, C15-F ve C25-F) için yarmada çekme dayanımı sonuçları.



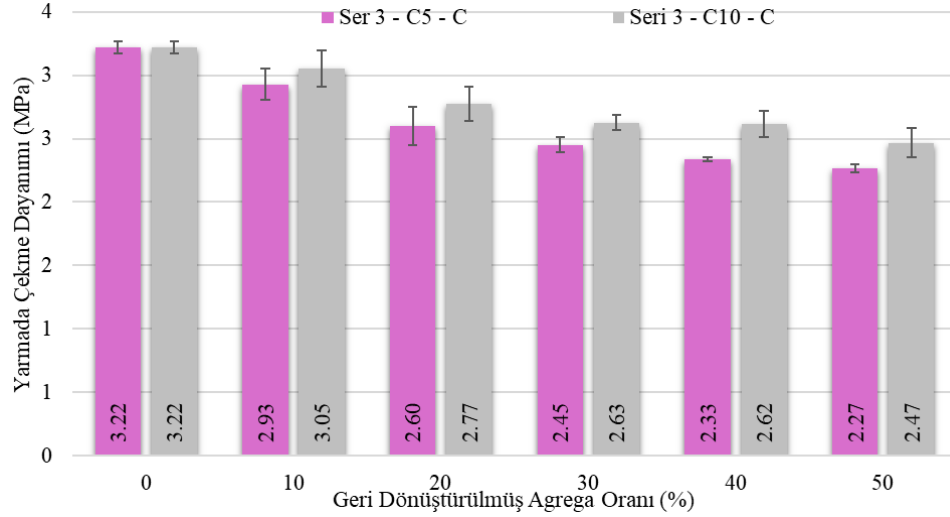
Şekil 4. 9. Seri 2 İri GDBA (C13-C, C15-C ve C25-C) için yarmada çekme dayanımı sonuçları.



Şekil 4. 10. Seri 2 çakıl GDBA (C13-G, C15-G ve C25-G) için yarmada çekme dayanımı sonuçları.



Şekil 4. 11. Seri 2 ince GDBA (C5-F ve C10-F) için yarmada çekme dayanımı sonuçları.



Şekil 4. 12. İri GDBA (C5 -C ve C10-C) kullanılarak seri 3 için yarmada çekme dayanımı sonuçları

4.1.3. Eğilme mukavemeti sonuçları

Şekil 4.13, dört farklı mukavemet sınıfından (C13, C15, C25 ve C50) %10, %20 ve %30 oranında geri dönüştürülmüş beton agregası içeren Seri 1 beton karışımlarının 28 günlük eğilme mukavemeti testlerinin sonuçlarını göstermektedir. Sonuçlar, tüm mukavemet sınıflarında GDBA içeriği arttıkça betonun mukavemetinin azaldığını göstermektedir.

C13 karışımlarında Eğilme mukavemeti, %10, %20 ve %30 GDBA'da sırasıyla %4,28, %15,57 ve %23,1'e düşmüştür. C15 karışımlarında FS, ilgili ikame seviyelerinde sırasıyla %2,78, %5,97 ve %16,34'e düşmüştür. C25 karışımlarında eğilme mukavemeti

Eğilme mukavemeti, %10, %20 ve %30 GDBA'da sırasıyla %0,59, %2,68 ve %2,98'e hafifçe düşmüştür. C50 karışımları en düşük azalmaları göstermiş, eğilme mukavemeti FS sırasıyla %0,5, %0,6 ve %2,8'e hafifçe düşmüştür. Bu sonuçlar, daha yüksek mukavemetli betonların, GDBA ikame seviyeleri arttıkça eğilme mukavemeti daha da etkili bir şekilde gerçekleştirdiğini göstermektedir.

Eğilme mukavemeti sonuçları, Seri 1 karışımlarının GDBA içeriğinin artmasıyla mukavemetin azaldığını göstermiştir. Azalmalar (C13 ve C15) karışımlarında etkili olurken, (C25 ve C50) karışımlarında sadece hafif azalmalar görülmüştür. %10 ve %20 oranındaki ikameler kabul edilebilir performans gösterirken, %30 oranındaki ikame, özellikle düşük mukavemet sınıflarında önemli bir azalma göstermiştir (Kachouh vd., 2021; Sabău ve Remolina Duran, 2022).

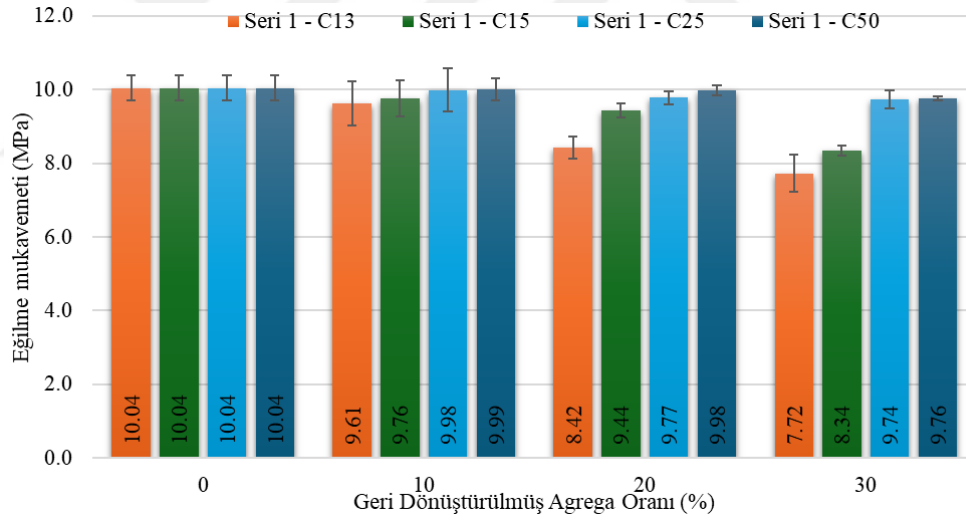
Şekil 4.14, tek eksenli yükleme testlerinin ardından Seri 1, Seri 2 ve Seri 3 numunelerinin temsili basınçlı kırılma modlarını göstermektedir. Doğal Agregalı Beton referans karışımı ile Geri Dönüştürülmüş Beton Agregalı karışımları arasında belirgin morfolojik farklılıklar gözlemlenebilir ve bu görsel göstergeler, çalışmanın önceki bölümlerinde tanımlanan mekanik bozulma mekanizmalarını güçlü bir şekilde desteklemektedir. GDBA konsantrasyonunun artmasıyla, tanecikler arası kırılma davranışından tanecikler arası kırılma davranışına gözle görülür bir geçiş meydana gelir. Referans DA numunelerinde (0% GDBA), kırılmalar çoğunlukla çimento hamuru ile doğal agregalar arasındaki Arayüz Geçiş Bölgesinde ilerlemiştir. Kaba doğal agregalar çoğunlukla hasarsız kalmıştır, bu da matrisin esas olarak agrega parçacıkları etrafında çöktüğünü göstermektedir. Bu, agrega fazının yük taşıma kapasitesini büyük ölçüde desteklediği normal mukavemetli betonun karakteristik özelliğidir.

Buna karşılık, GDBA karışımları, özellikle düşük mukavemetli ana betonlardan kaynaklanan ince GDBA fraksiyonları veya agregaları içerenler, belirgin şekilde farklı bir çatlama modeli sergiledi. Burada, kırılma yolları sıklıkla geri dönüştürülmüş agrega parçacıklarından doğrudan geçerek trans-granüler hasara neden oldu. Bu değişim, yapışmış eski harç ve geri dönüştürülmüş parçacıklar içindeki “eski ITZ”nin yapısal olarak zayıf bölgeler oluşturduğunu ima etmektedir. Sonuç olarak, hasar yüzeyi GDBA'nın iç kusurlarını ve gözenekliliğini takip etme eğilimindeydi, bu durum özellikle geri dönüştürülmüş parçacıkların kendilerinin en zayıf direnç yolunu belirlediği C5 veya C10 kaynaklı agregalarla hazırlanan betonlarda belirgindi.

Ana beton kalitesinin etkisi, gözlemlenen göçme topolojilerinde de açıkça görülmektedir. Yüksek mukavemetli C50 betondan elde edilen GDBA içeren Seri 1, DA

numunelerine benzeyen kırılğan ve nispeten temiz kırılma yüzeyleri göstermiştir. Eski ve yeni harç matrisleri arasındaki fark çok azdı, bu da GDBA'nın yeni bağlayıcıya etkili bir şekilde entegre olduğunu ve yüksek kaliteli geri dönüştürülmüş agregaların sertliğini ve dayanıklılığını doğrulamaktadır. Buna karşılık, ince GDBA veya düşük mukavemetli ana beton kullanılan Seri 2 ve Seri 3, belirgin bir parçalanma ve daha parçalı bir göçme morfolojisi sergilemiştir. Bu numuneler, baskın bir kesme düzlemi yerine, yaygın mikro çatlaklar ve granüler ayrışma göstermiştir. Bu davranış, tek bir sürekli göçme yüzeyi yerine dağınık çatlak oluşumunu teşvik eden ince GDBA fraksiyonlarının yüksek gözenekliliğini ve zayıf mikro yapısını göstermektedir.

Basıncılı bozulma modelleri, mekanik test bulguları ile iyi bir uyum içindedir ve GDBA betonun yapısal bütünlüğünün, öncelikle geri dönüştürülmüş agregaların doğal kalitesi ve yapışan harç fazının gözenekliliği tarafından belirlendiğini göstermektedir. Bu görsel bulgular, araştırmanın önceki bölümlerinde değerlendirilen mukavemet düşüşleri için ikna edici makroskopik kanıtlar sunmaktadır.



Şekil 4. 13. Seri 1 (C13, C15, C25 ve C50) için eğilme mukavemeti sonuçları.



Şekil 4. 14. Seri 1, Seri 2 ve Seri 3'teki tüm beton numunelerin basınçlı kırılma modelleri.

4.2. Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı

Bu bölümde, farklı GDBA ikame oranlarına (GDB0–GDB50) sahip döşeme numunelerinden alınan küp örneklerinde 24, 150, 300, 450 ve 600 °C sıcaklık düzeylerinde elde edilen basınç dayanımı sonuçları sunulmaktadır. Şekil 4.15'te grafik olarak gösterilmiştir.

Oda sıcaklığında (24 °C) elde edilen basınç dayanımı sonuçları, GDBA ikame oranının artmasıyla birlikte belirgin bir azalma eğilimi göstermiştir. Referans karışım olan GDB0, 21,09 MPa ile en yüksek basınç dayanımını vermiştir. GDB10 (21,05 MPa) ve GDB20 (19,91 MPa) karışımları referans karışıma yakın değerler üretmiş olup dayanım kaybı sırasıyla yaklaşık %0,2 ve %5,6 düzeyinde gerçekleşmiştir. GDB30 karışımında dayanım 19,35 MPa'ya gerilemiş (%8,3 kayıp), GDB40'ta 17,06 MPa'ya (%19,1 kayıp) ve GDB50'de 16,79 MPa'ya (%20,4 kayıp) düşmüştür. Bu bulgular, %30'a kadar GDBA ikamesinin oda sıcaklığı basınç dayanımında sınırlı düzeyde etki yarattığını, %40 ve üzeri ikame oranlarında ise dayanım kaybının daha belirgin hale geldiğini göstermektedir.

150 °C sıcaklık seviyesinde elde edilen basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, tüm karışım gruplarında oda sıcaklığına kıyasla sınırlı düzeyde dayanım kaybı meydana

geldiği görülmektedir. Referans karışım olan GDB0 için basınç dayanımı 20,15 MPa olarak ölçülmüş olup bu değer oda sıcaklığı dayanımına göre yaklaşık %4,5 oranında bir azalmaya karşılık gelmektedir. Benzer şekilde GDB10 (20,12 MPa) ve GDB20 (19,88 MPa) karışımlarında dayanım kayıpları sırasıyla yaklaşık %4,6 ve %5,7 olarak hesaplanmıştır. Daha yüksek GDBA ikame oranlarında ise dayanım kaybının daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Nitekim GDB30, GDBA40 ve GDB50 karışımlarında basınç dayanımı sırasıyla 18,24 MPa, 16,98 MPa ve 16,40 MPa olarak ölçülmüş olup bu değerler yaklaşık %13,5, %19,5 ve %22,2 oranında dayanım kaybına karşılık gelmektedir.

300 °C sıcaklık seviyesinde elde edilen basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, tüm karışım gruplarında dayanım kaybının daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Referans karışım olan GDB0 için basınç dayanımı 17,65 MPa olarak ölçülmüş olup bu değer oda sıcaklığı dayanımına göre yaklaşık %16,3 oranında bir azalmaya karşılık gelmektedir. Benzer şekilde GDB10 (17,31 MPa), GDB20 (17,17 MPa) ve GDB30 (17,02 MPa) karışımlarında dayanım kayıpları sırasıyla yaklaşık %17,9, %18,6 ve %19,3 düzeyinde gerçekleşmiştir. Daha yüksek GDBA ikame oranlarında ise dayanım kaybı daha belirgin hale gelmiş; GDB40 ve GDB50 karışımlarında basınç dayanımı sırasıyla 15,81 MPa ve 14,63 MPa olarak ölçülmüş olup bu değerler yaklaşık %25,0 ve %30,6 oranında dayanım kaybına karşılık gelmektedir. Bu sonuçlar, sıcaklık artışı ve yüksek GDBA ikame oranlarının birlikte betonun basınç dayanımını olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir.

450 °C sıcaklık seviyesinde elde edilen basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, yüksek sıcaklığın etkisiyle tüm karışım gruplarında dayanım kaybının daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Referans karışım olan GDB0 için basınç dayanımı 15,50 MPa olarak ölçülmüş olup bu değer oda sıcaklığı dayanımına göre yaklaşık %26,5 oranında bir azalmaya karşılık gelmektedir. Benzer şekilde GDB10 (15,33 MPa) karışımında yaklaşık %27,3 oranında dayanım kaybı gözlenmiştir. GDB20 (14,34 MPa), GDB30 (14,15 MPa) ve GDB40 (13,99 MPa) karışımlarında ise dayanım kayıpları sırasıyla yaklaşık %32,0, %32,9 ve %33,7 düzeyinde gerçekleşmiştir. En yüksek GDBA ikame oranına sahip olan GDB50 karışımında basınç dayanımı 12,37 MPa olarak ölçülmüş olup bu değer yaklaşık %41,3 oranında bir dayanım kaybına karşılık gelmektedir.

Bu sonuçlar, artan sıcaklık ve yüksek GDBA ikame oranlarının betonun basınç dayanımını önemli ölçüde olumsuz etkilediğini göstermektedir.

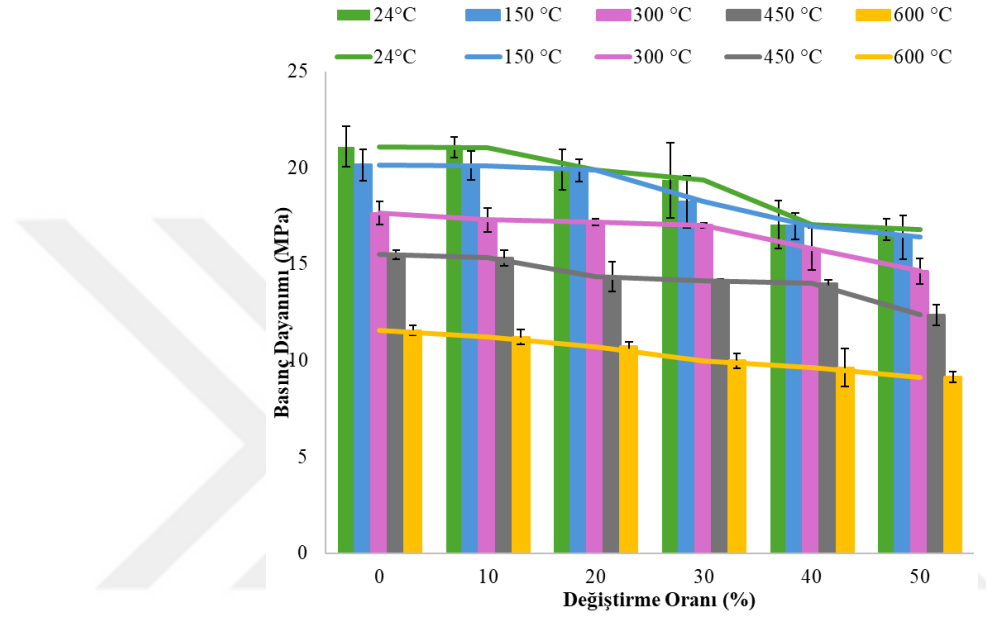
00 °C sıcaklık seviyesinde elde edilen basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, yüksek sıcaklığın beton üzerinde önemli ölçüde dayanım kaybına neden olduğu görülmektedir. Referans karışım olan GDB0 için basınç dayanımı 11.56 MPa olarak ölçülmüş olup bu değer oda sıcaklığı dayanımına göre yaklaşık %45,2 oranında bir azalmaya karşılık gelmektedir. Benzer şekilde GDB10 (11.22 MPa) ve GDB20 (10,73 MPa) karışımlarında dayanım kayıpları sırasıyla yaklaşık %46,8 ve %49,1 düzeyinde gerçekleşmiştir. Daha yüksek GDBA ikame oranlarında ise dayanım kaybının daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Nitekim GDB30, GDB40 ve GDB50 karışımlarında basınç dayanımları sırasıyla 9,99 MPa, 9,62 MPa ve 9,13 MPa olarak ölçülmüş olup bu değerler yaklaşık %52,6, %54,4 ve %56,7 oranında dayanım kaybına karşılık gelmektedir. Bu sonuçlar, 600 °C gibi yüksek sıcaklık seviyelerinde hem sıcaklık etkisinin hem de artan GDBA ikame oranının betonun basınç dayanımını önemli ölçüde olumsuz etkilediğini göstermektedir.

Şekil 4.16, numunelerin farklı yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra basınç altında kırılma gösterdiği başlıca şekilleri göstermektedir. Sıcaklık ve kullanılan GDB miktarı arttıkça, gözlemlenen çatlaklar ve hasar şekilleri belirgin bir şekilde değişmiştir. Bu görsel gözlemler, bu çalışmanın önceki bölümlerinde ele alınan mekanik bozulma şekillerini desteklemektedir. Oda sıcaklığında (24 °C), numuneler yükün uygulandığı noktalarda dikey yarıma çatlakları ve yerel ezilme ile karakterize edilen geleneksel basınç hasarı sergiledi. Yıkılma yüzeyleri nispeten belirgindi, bu da beton yapı içinde yükün istikrarlı bir şekilde aktarıldığını göstermektedir. Buna karşılık, sıcaklık 150 °C ve 300 °C'ye yükseldiğinde, numuneler daha belirgin boyuna ve çapraz çatlaklar sergiledi; bu da termal maruziyetin sonucu olarak çimento matrisinin giderek bozulduğunu göstermektedir.

Yüksek sıcaklıklarda (450 °C ve 600 °C), numunelerde yaygın çatlaklar, yüzey bozulması ve yer yer dökülmeler gözlemlendi; bu da ciddi termal hasara işaret etmektedir. Çatlak yoğunluğu belirgin şekilde artmış, kırılma yüzeyleri ise daha düzensiz ve parçalanmış bir hal almıştır. Gözlemlenen bu davranış, hidrasyon ürünlerinin bozulmasına, agrega ile çimento hamuru arasındaki termal uyumsuzluğa ve yüksek sıcaklıklara maruz kalındığında iç mikro çatlakların oluşmasına bağlanabilir. Ayrıca, daha yüksek GDB ikame oranlarına sahip numuneler genel olarak daha yaygın çatlaklar ve kırılma yüzeyinde hafifçe artmış parçalanma sergilemiştir. Bu durum, GDB parçacıklarının eklenmesinin iç kusurlar yaratabileceğini ve bu kusurların, özellikle

ısıtıldıktan sonra malzemeye basınç uygulandığında çatlakların oluşmasına ve yayılmasına katkıda bulunabileceğini göstermektedir.

Genel olarak, gözlemlenen basınçlı kırılma modları hem yüksek sıcaklığa maruz kalmanın hem de artan GDB içeriğinin beton mikroyapısının giderek bozulmasına katkıda bulunduğunu açıkça göstermektedir; bu durum, önceki bölümlerde bildirilen basınç dayanımındaki düşüşlerle tutarlıdır.



Şekil 4. 15. Farklı sıcaklıklarda beton karışımlarının basınç dayanımı.



Şekil 4. 16. Farklı GDB ikame oranlarına sahip beton numunelerinin yüksek sıcaklıklardan sonra basınç kırılma şekilleri.

4.3. Döşeme Numunelerinin Davranışı

Bu bölümde, geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) içeren döşeme numunelerinin yapısal davranışı deneysel veriler doğrultusunda değerlendirilmektedir.

4.3.1. Yük-deformasyon davranışı

Farklı geri dönüşümlü agrega ikame oranlarına ve maruz kalma sıcaklıklarına sahip döşeme numunelerinin yük-yer değiştirme davranışları Şekiller 14.17, 14.18, 14.19, 14.20, 14.21 ve 14.22, gösterilmiştir. Tüm numuneler, üç aşamadan oluşan benzer bir tepki modeli sergilemiştir: başlangıçtaki doğrusal elastik aşama, çatlak oluşumu ve yayılmasıyla ilişkili doğrusal olmayan aşama ve döşemelerin kademeli bozulmasına karşılık gelen tepe noktasından sonraki yumuşama aşaması.

İlk yükleme aşamasında, yük yer değiştirme ile neredeyse doğrusal bir şekilde artmış ve bu durum, gözle görülür çatlaklar oluşmadan önce elastik bir davranışa işaret etmiştir. Uygulanan yük arttıkça, numunelerin sertliği kademeli olarak azalmıştır; bu durum, ortada çatlakların oluşmasından kaynaklanmıştır. Maksimum yüke ulaşıldıktan sonra, tüm numunelerde yük taşıma kapasitesinde bir azalma ve yer değiştirmede bir artış gözlemlenmiştir.

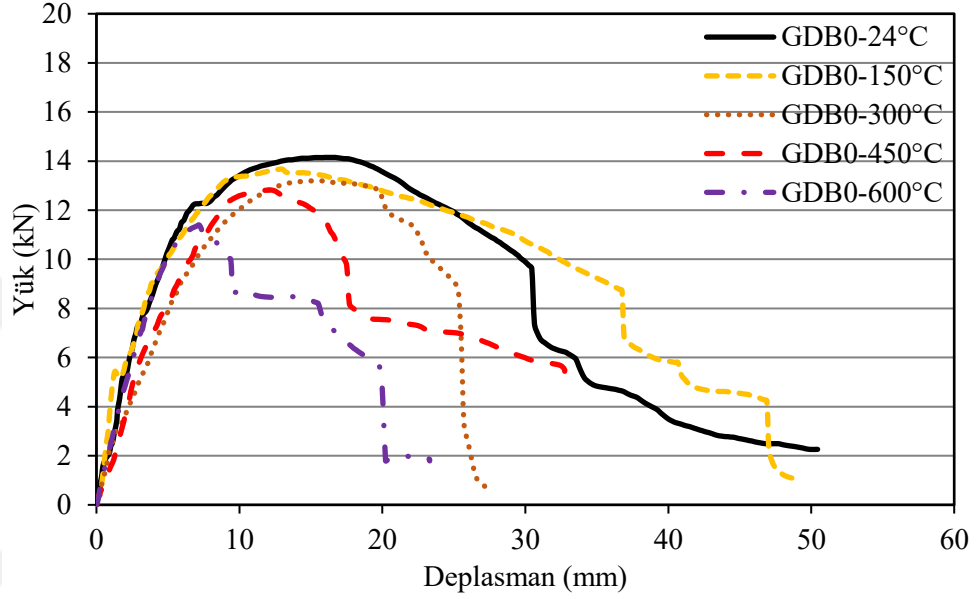
Referans numuneler (GDB0), 24 °C'de yaklaşık 14,15 kN değerinde maksimum yük taşıma kapasitesini sergilemiştir. Buna karşılık, maruz kalma sıcaklığı 150 °C, 300 °C, 450 °C ve 600 °C'ye yükseldikçe, tepe yükünde kademeli bir azalma kaydedilmiş ve bu da beton matrisinde termal bozulma olduğunu göstermiştir. Tüm ikame oranları için benzer bir eğilim gözlemlenmiştir.

Geri dönüştürülmüş agrega ikame oranının döşeme levhalarının yapısal davranışına etkisi de açıkça görülmüştür. %10 ve %20 GDB içeren numuneler, referans levhalara nispeten yakın yük-yer değiştirme tepkileri sergilemiş; bu da düşük ikame oranlarının yük taşıma kapasitesi üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Buna karşın, ikame oranı %30, %40 ve %50'ye çıktıkça, tepe yük değerleri ve sertlik kademeli olarak azalmıştır. Özellikle GDB50 numuneleri, özellikle yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında en düşük yük kapasitesine sahip olmuştur.

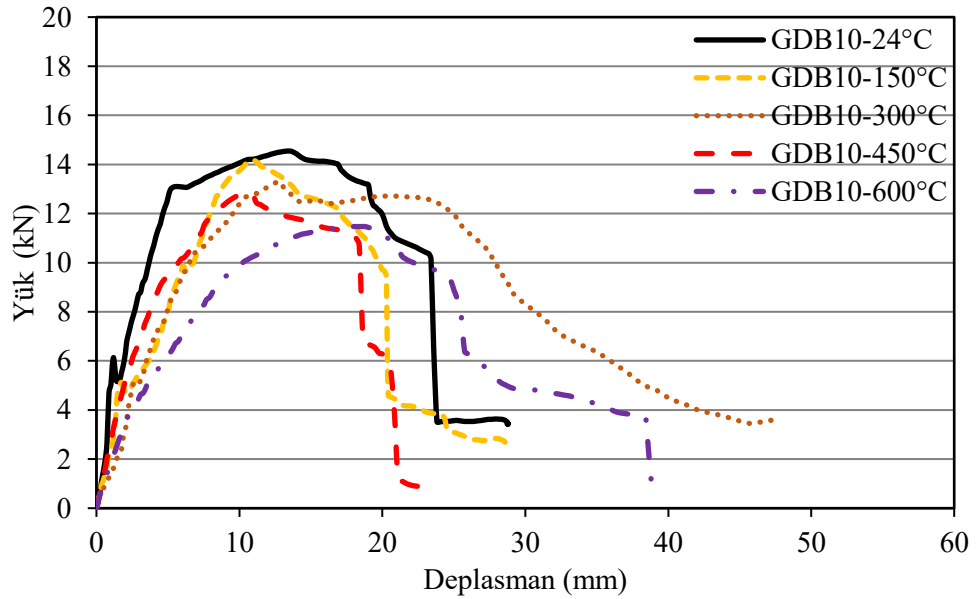
Mukavemet azalmasının yanı sıra, yüksek sıcaklıklar levhaların tepe noktasından sonraki davranışını da önemli ölçüde etkilemiştir. 450 °C ve 600 °C'ye maruz kalan numuneler, daha erken yumuşama ve maksimum değere ulaşıldıktan sonra yükte daha

belirgin bir düşüş sergilemiştir. Bu davranış, ısıya maruz kalma nedeniyle betonun iç mikro yapısında bir bozulma olduğunu göstermektedir.

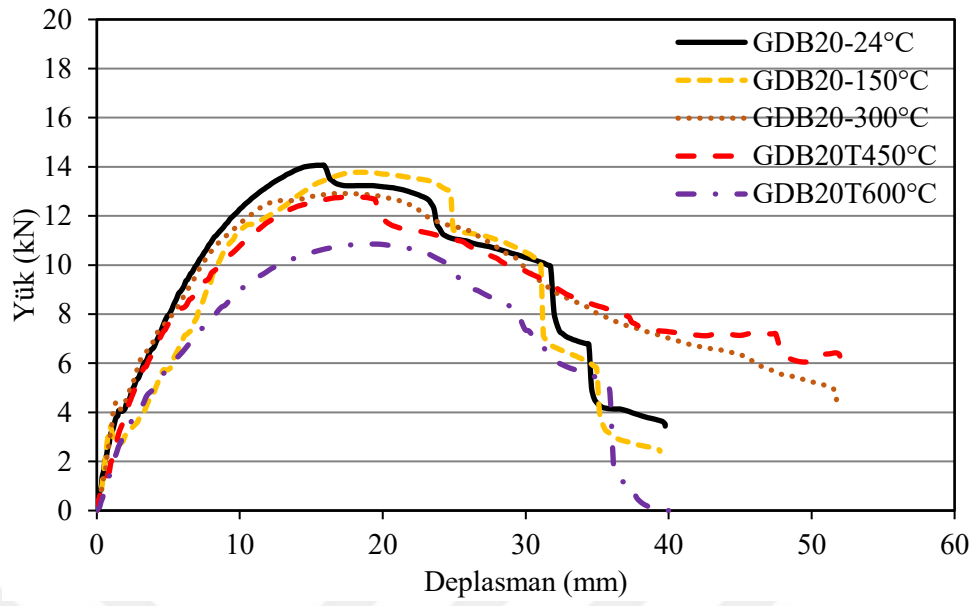
Genel olarak, sonuçlar hem artan sıcaklığın hem de daha yüksek geri dönüştürülmüş agrega ikame oranlarının döşemelerin yük taşıma kapasitesini ve sertliğini azalttığını, aynı zamanda tepe noktasından sonraki deformasyon davranışlarını da etkilediğini göstermektedir.



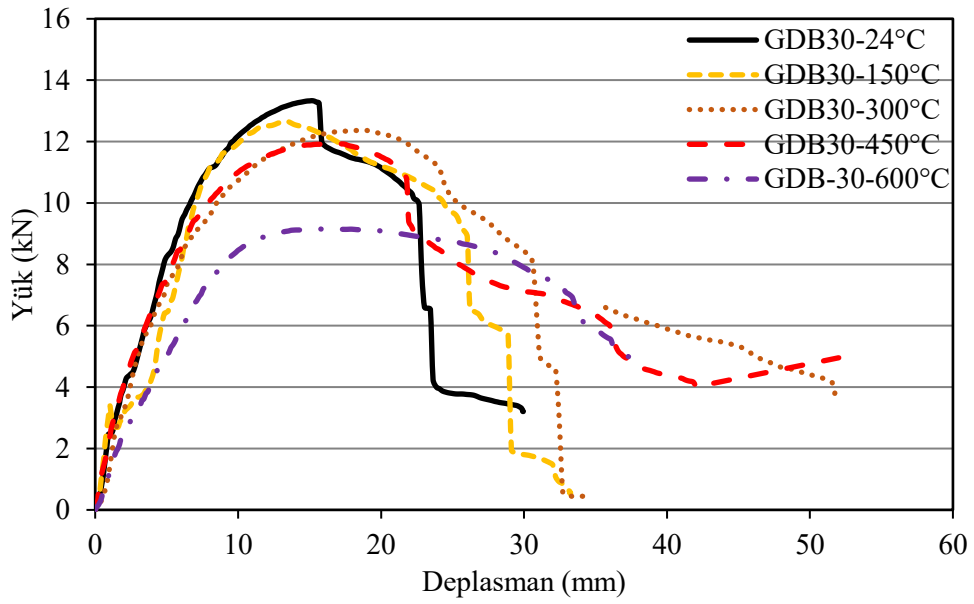
Şekil 4. 17. Farklı sıcaklıklara maruz kalan %0 GDB içeren döşeme numunelerinin yük deplasman davranışı.



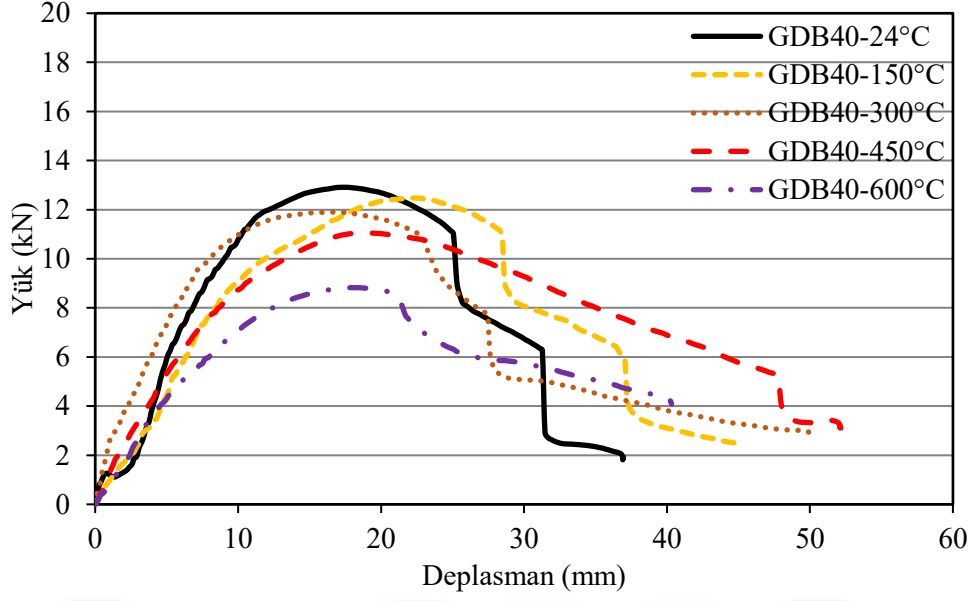
Şekil 4. 18. Farklı sıcaklıklara maruz kalan %10 GDB içeren döşeme numunelerinin yük deplasman davranışı.



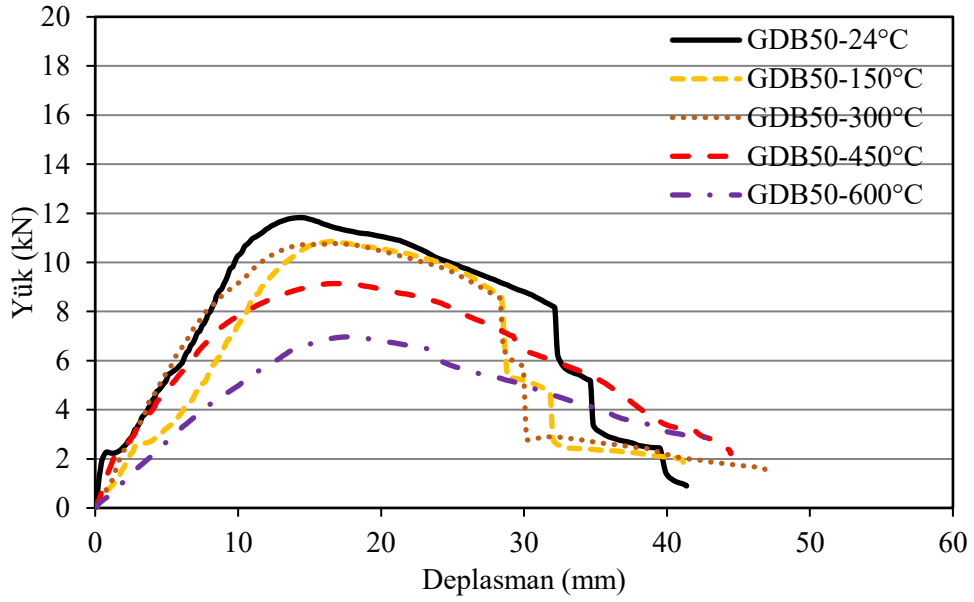
Şekil 4. 19. Farklı sıcaklıklara maruz kalan, %20 GDB içeren döşeme numunelerinin yük deplasman davranışı.



Şekil 4. 20. Farklı sıcaklıklara maruz kalan, %30 GDB içeren döşeme numunelerinin yük deplasman davranışı.



Şekil 4. 21. Farklı sıcaklıklara maruz kalan, %40 GDB içeren döşeme numunelerinin yük deplasman davranışı.



Şekil 4. 22. Farklı sıcaklıklara maruz kalan, %50 GDB içeren döşeme numunelerinin yük deplasman davranışı.

4.3.2. Döşeme numunelerinin göçme türleri

Farklı sıcaklıklarda ve geri dönüştürülmüş agrega ikame oranlarında eğilme yüküne maruz kalan levha numunelerinin kırılma şekilleri Şekil 4.23, gösterilmiştir. Genel olarak, tüm numuneler, açıklığın orta bölgesi yakınındaki alt yüzeyde çatlak oluşumu ve ardından yükleme noktasına doğru çatlak yayılmasıyla karakterize edilen tipik bir eğilme kırılma şekli sergilemiştir.

Oda sıcaklığında (24 °C), levhalarda nispeten istikrarlı bir çatlak gelişimi gözlemlendi. İlk çatlaklar alt yüzeydeki gerilme bölgesinde oluştu ve yük arttıkça bu çatlaklar yükleme noktasına doğru kademeli olarak yukarı doğru yayıldı. Hasar, esas olarak betonun sınırlı parçalanmasıyla birlikte eğilme çatlakları şeklinde gerçekleşti.

150 °C'ye maruz kalan numunelerde, hasar şekilleri genel olarak oda sıcaklığında gözlemlenenlere benzerdi. Bununla birlikte, bazı numunelerde biraz daha geniş çatlaklar ve hafif yüzey dökülmeleri gözlemlendi; bu durum, beton matrisinde termal bozulmanın başladığını göstermektedir.

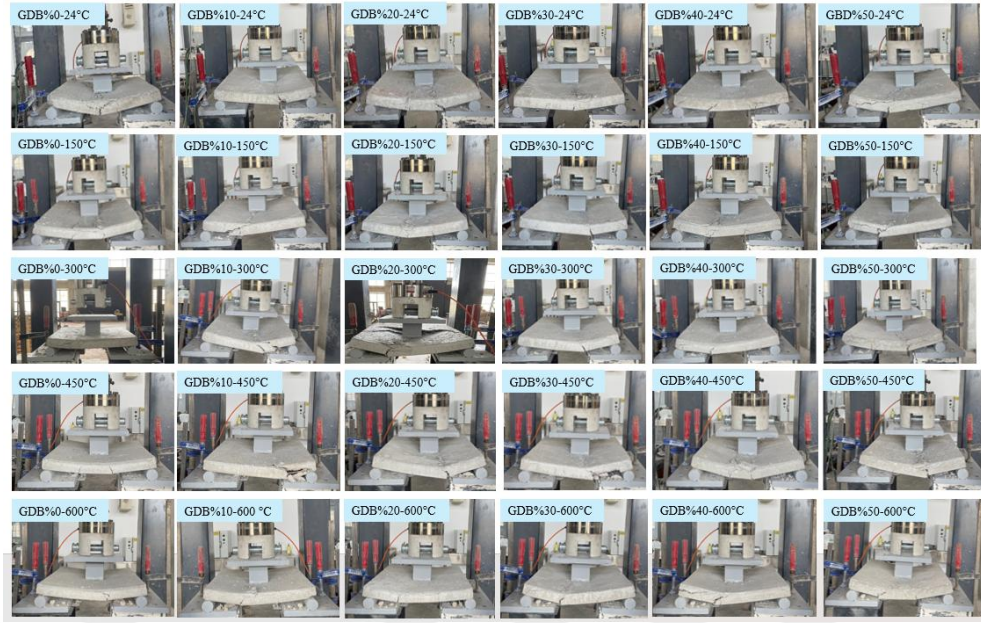
Maruz kalma sıcaklığı 300 °C'ye yükseldiğinde, daha belirgin çatlaklar ve daha geniş çatlak genişlikleri gözlemlendi. Döşemeler orta açıklık bölgesi boyunca çok sayıda çatlak sergiledi ve yük-deplasman eğrilerinde gözlemlenen sertlik azalması, numunelerde artan çatlak oluşumuyla örtüşüyordu.

450 °C'de kırılma davranışı daha kırılğan hale geldi. Bazı numunelerde, yükleme noktasının yakınında belirgin çatlak yayılması ve betonun kısmi ezilmesi gözlemlendi. Bazı durumlarda, beton parçalarının yer yer dökülmesi ve ayrılması gözlemlendi; bu durum, ısıya maruz kalma nedeniyle iç mikro yapının bozulduğuna işaret ediyordu.

En ciddi hasar, 600 °C'ye maruz kalan numunelerde meydana geldi. Bu döşemeler, yaygın çatlaklar, geniş çatlak açıklıkları ve betonun önemli ölçüde parçalanması sergiledi. Hasar yüzeyleri daha düzensiz hale geldi ve döşemelerde yapısal bütünlükte belirgin bir azalma gözlemlendi. Bu davranış, çimento hamurunun ciddi termal bozulmasına, iç mikro çatlakların artmasına ve agregalar ile çevreleyen matris arasındaki bağın zayıflamasına bağlanmaktadır.

Genel olarak, gözlemlenen hasar türleri, sıcaklığın artmasının levha numunelerinde daha şiddetli çatlama ve kırılğan hasar davranışına yol açtığını doğrulamaktadır. Ayrıca, daha yüksek geri dönüştürülmüş agrega ikame oranları içeren döşemeler genellikle daha belirgin çatlama ve parçalanma sergilemiş olup, bu da yüksek sıcaklık koşulları altında eğilme yüküne karşı direncin azaldığını göstermektedir.

Şekil 4.24, gösterildiği üzere, çatlak desenleri ağırlıklı olarak orta açıklık bölgesinde yoğunlaşmakta olup, bu durum göçme mekanizmasının eğilme davranışı tarafından kontrol edildiğini doğrulamaktadır. Daha yüksek sıcaklıklara ve daha yüksek ikame oranlarına maruz kalan numunelerde, daha yaygın çatlak oluşumu ve yerel ezilmeler gözlenmiş; bu durum, yapısal bütünlüğün azaldığını göstermektedir.



Şekil 4. 23. Çeşitli sıcaklıklarda eğilme yüklemesi uygulandıktan sonra farklı geri dönüştürülmüş agrega ikame oranlarına sahip döşeme numunelerinin hasar şekilleri.



Şekil 4. 24. Eğilme deneyi sonrasında döşeme numunelerinin genel çatlak desenleri ve hasar dağılımı.

4.3.3. Termal dağılım ve sıcaklık etkisi

Farklı geri dönüştürülmüş agrega ikame oranlarına sahip döşeme numunelerinin yüksek sıcaklık altında elde edilen termal dağılımları Şekil 4.25, sunulmuştur. Termal görüntüler, döşeme yüzeyleri boyunca ısı dağılımı ve sıcaklık gradyentleri hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır.

150 °C sıcaklık seviyesinde, tüm numunelerde sıcaklık dağılımının büyük ölçüde homojen olduğu ve yalnızca kenar bölgelerinde küçük farklılıkların olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, orta seviyedeki sıcaklıklarda döşemeler içerisindeki ısı transferinin kararlı olduğunu ve belirgin bir sıcaklık gradyentinin henüz oluşmadığını göstermektedir.

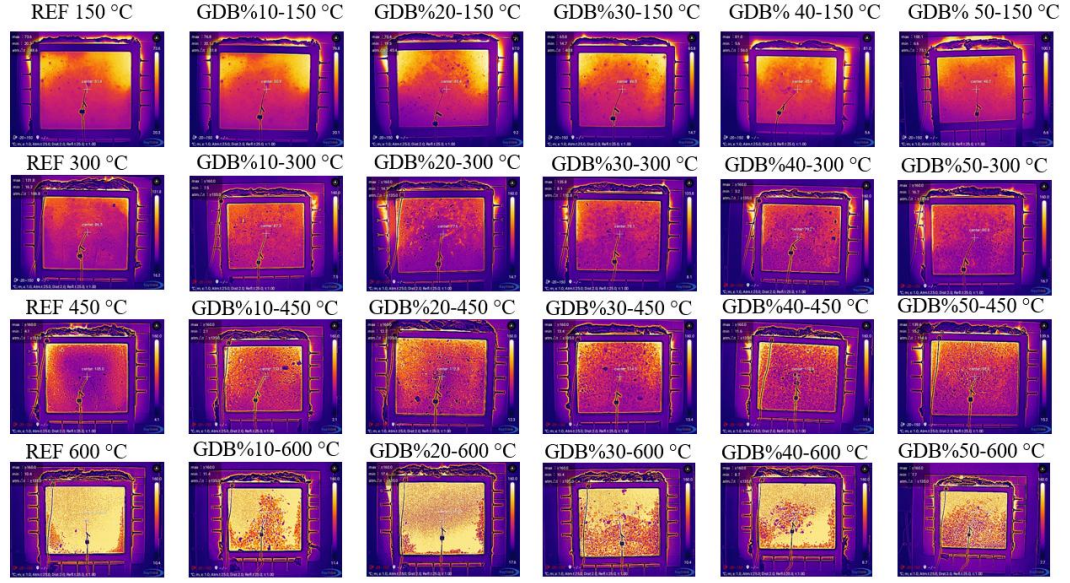
300 °C sıcaklık seviyesinde, sıcaklık dağılımında hafif düzensizlikler ortaya çıkmaya başlamaktadır. Döşeme yüzeyleri boyunca yerel sıcaklık farklılıkları gözlemlenmekte olup, bu durum içsel termal gradyentlerin oluşmaya başladığını göstermektedir. Bu gradyentler, mikro çatlak oluşumunu tetiklemekte ve yük–deplasman eğrilerinde gözlenen rijitlik azalması ile uyumlu bir davranış sergilemektedir.

Sıcaklığın 450 °C'ye yükselmesiyle birlikte, termal görüntüler daha belirgin sıcaklık farklılıklarını ve yerel sıcaklık yoğunlaşmalarını ortaya koymaktadır. Döşemenin kenar ve orta bölgelerinde farklı sıcaklık seviyeleri gözlemlenmiş olup, bu durum kesit içerisinde artan termal gradyentlerin varlığına işaret etmektedir. Bu homojen olmayan ısı dağılımı, iç gerilmelerin gelişmesine neden olarak daha şiddetli çatlak oluşumuna ve yük taşıma kapasitesinde belirgin bir azalmaya yol açmaktadır.

600 °C sıcaklık seviyesinde, termal dağılımın oldukça düzensiz hâle geldiği ve tüm numunelerde belirgin sıcak bölgelerin (hot zones) açıkça gözlemlendiği görülmektedir. Sıcaklık farklılıklarının şiddeti, geri dönüştürülmüş agrega ikame oranının artmasıyla birlikte yükselmekte; özellikle %40 ve %50 GDBA içeren numunelerde daha yoğun ve lokalize sıcaklık bölgeleri oluşmaktadır. Bu durum, yüksek GDBA içeriğinin, aderanslı eski harç varlığı ve daha yüksek gözeneklilik nedeniyle betonun termal hassasiyetini artırdığını göstermektedir.

Genel olarak, termal görüntüler sıcaklık artışıyla birlikte daha yüksek termal gradyentlerin ve homojen olmayan ısı dağılımının oluştuğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, mikro çatlak oluşumu ve aderans kaybı gibi iç hasar mekanizmalarının hızlanmasına neden olmaktadır. Elde edilen bu bulgular, mekanik deney sonuçlarıyla

güçlü bir uyum göstermekte olup, artan sıcaklık seviyelerinin yük taşıma kapasitesinde azalmaya ve daha şiddetli hasar davranışına yol açtığını doğrulamaktadır.



Şekil 4. 25. Farklı geri dönüştürülmüş agrega ikame oranlarına sahip döşeme numunelerinin yüksek sıcaklıklardaki (150–600 °C) termal görüntüleri.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde, elde edilen bulgular özetlenmekte ve çalışmadan çıkarılan sonuçlar doğrultusunda öneriler sunulmaktadır.

5.1. Mekanik Özellikler Deneyleri

Bu çalışmada, çeşitli ana beton mukavemet sınıflarından elde edilen geri dönüştürülmüş beton agregaları (GDBA) içeren sürdürülebilir betonun mekanik davranışları incelenmiştir.

Agrega fraksiyonu mukavemet kaybını etkiler; geri kazanılmış agregatanelerinin boyutu, mekanik performans açısından önemli bir faktördür. İnce GDBA (0–4 mm) içeren karışımlar, daha gözenekli olmaları ve üzerlerine harcın daha güçlü bir şekilde yapışması nedeniyle en fazla mukavemet kaybı sergilemiştir. Örneğin, düşük mukavemetli ana betonun (C13) %50'sinin İnce GDBA ile değiştirilmesi, basınç mukavemetinde %16,6 ve yarıлма yarmada çekme dayanımında %27'lik bir azalmaya neden olmuştur. Buna karşılık, İri GDBA (5–11 mm) ve çakıl fraksiyonları (12–22 mm) içeren karışımlar, önemli ölçüde daha düşük bozulma oranları sergilemiştir.

Ana beton kalitesinin etkisi: Düşük mukavemetli geri kazanılmış agregat (C13) kullanıldığında, %30 oranında ikame edildiğinde basınç mukavemetinde %12,9'luk bir azalma gözlemlenirken, aynı koşullarda yüksek mukavemetli geri kazanılmış agregat (C50) kullanıldığında ise %2,14 gibi ihmal edilebilir düzeyde bir düşüş meydana geldi. Bu durum, yüksek kaliteli geri kazanılmış agregaların, yapısal bütünlüğü tehlikeye atmadan doğal agregaların %30'una kadarını ikame edebileceğini doğrulamaktadır.

DeneySEL bozulma eğilimleri: Agregat kalitesi ve ikame oranı, geri kazanılmış agregat betonunun mekanik performansını etkilemektedir. Geri kazanılmış agregat içeriğinin artırılması, basınç mukavemeti ve yarıлма yarmada çekme dayanımı değerlerinde tutarlı bir düşüşe yol açmıştır. Daha yüksek gözeneklilik ve yapışkan harc içeriği nedeniyle, ince geri kazanılmış agregalar (0–4 mm) en büyük mukavemet kaybına neden olmuştur (C13 karışımlarında %16,6'ya kadar)1. Buna karşın, yüksek mukavemetli ana betondan (C50) elde edilen GDBA, arayüzey geçiş bölgesine kontrollü bozulma mekanizmalarıyla tutarlı olarak, %30'a varan ikame seviyelerinde mukavemetin kısmen korunmasını göstermiştir.

5.2. Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı

Elde edilen sonuçlar, GDBA ikame oranı ve sıcaklık artışının betonun basınç dayanımı üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğunu göstermektedir. %30'a kadar olan GDBA ikame oranlarında dayanım kaybı sınırlı kalırken, daha yüksek oranlarda belirgin azalmalar gözlenmiştir. Sıcaklık artışıyla birlikte tüm karışımlarda dayanım kaybı artmış, özellikle 450 °C ve 600 °C seviyelerinde ciddi performans düşüşleri meydana gelmiştir. Yüksek GDBA oranı ile yüksek sıcaklık etkisinin birlikte olması, dayanım kaybını daha da artırmıştır.

Ayrıca, yüksek sıcaklık sonrası numunelerde gözlemlenen çatlak oluşumu ve yüzey bozulmaları, betonun iç yapısında meydana gelen hasarı desteklemektedir. Genel olarak, yüksek sıcaklık ve GDBA içeriğinin birlikte betonun mekanik performansını önemli ölçüde azalttığı sonucuna ulaşılmıştır.

5.3. Döşeme Deneyleri

Geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) içeren betonarme döşeme numunelerinin yapısal performansı, yüksek sıcaklık etkisi altında değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme; yük-deplasman davranışı, gözlenen hasar türleri ve döşeme içerisindeki sıcaklık dağılımının incelenmesini kapsamaktadır. Deneysel bulgular, GDBA ikame oranının artmasının genellikle döşeme numunelerinin yük taşıma kapasitesi ve rijitliğinde azalmaya yol açtığını göstermektedir. Bu azalma, özellikle %30–40'ın üzerindeki ikame oranlarında daha belirgin hâle gelmiştir. Buna karşılık, orta düzeyde GDBA içeren (yaklaşık %30'a kadar) döşemeler, referans numunelere benzer yapısal performans sergilemiş olup, bu durum söz konusu karışımların yapısal uygulamalar açısından uygun olduğunu göstermektedir. Yük-deplasman eğrileri, sıcaklık artışıyla birlikte rijitlikte ve maksimum yük değerinde belirgin bir azalma olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle 300 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, döşemelerin daha sünek bir davranış sergilediği ve daha büyük deplasmanlara ulaştığı gözlemlenmiştir. 450 °C ve 600 °C seviyelerinde ise yük taşıma kapasitesinde önemli düşüşler meydana gelmiş; buna ek olarak deformasyon kapasitesinde artış ve daha şiddetli çatlak oluşumları gözlenmiştir.

Gözlenen hasar mekanizmaları ağırlıklı olarak eğilme çatlakları ile başlamış, ardından çatlakların ilerlemesi ve rijitlik ile dayanım kaybı sonucu göçme meydana gelmiştir. Sıcaklık ve GDBA oranının artmasıyla birlikte çatlakların daha geniş ve daha yaygın hâle geldiği belirlenmiş olup, bu durum artan iç hasarın bir göstergesidir. Yüksek

sıcaklık koşullarında, agrega ile çimento hamuru arasındaki aderansın zayıflaması, çatlakların daha erken oluşmasına ve daha hızlı yayılmasına neden olmuştur. Termal görüntü analizleri, sıcaklık arttıkça döşeme numuneleri içerisindeki sıcaklık dağılımının daha düzensiz hâle geldiğini ortaya koymuştur. Özellikle yüksek GDBA içeriğine sahip döşemelerde belirgin termal gradyentler gözlemlenmiş olup, bu durum geri dönüştürülmüş agregaların daha yüksek gözenekliliği ve su emme kapasitesi ile ilişkilendirilmektedir. Oluşan bu termal farklılıklar, iç gerilmelerin artmasına neden olarak mikro çatlak oluşumunu hızlandırmış ve mekanik bozulmayı artırmıştır.

Sonuç olarak, GDBA kullanımının döşeme performansında belirli bir azalmaya yol açmasına rağmen, uygun ikame oranlarında yapısal bütünlüğün korunabildiği görülmektedir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklık koşullarında hem GDBA oranının hem de sıcaklığın döşeme davranışı üzerinde önemli etkileri bulunduğundan, bu iki parametrenin birlikte değerlendirilmesi yapısal tasarım açısından büyük önem taşımaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Adessina, A., Fraj, A. B., ve Barthélémy, J.-F. (2023). Improvement of the compressive strength of recycled aggregate concretes and relative effects on durability properties. *Construction and Building Materials*, 384, 131447. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131447>
- Ahmad, S., Maslehuddin, M., Shameem, M., Faysal, R. Md., ve Adekunle, S. K. (2022). Effect of abrasion and chemical treatment of recycled aggregate on the workability, strength, and durability properties of concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(8), 3276–3291. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1797886>
- Ahmed Memon, B., Oad, M., ve Buller, A. H. (2023). Effect of Fine Aggregate Type on Workability and Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete. *International Journal of Research and Review*, 10(4), 152–162. <https://doi.org/10.52403/ijrr.20230420>
- Akbulut, Z. F., Guler, S., Yavuz, D., ve Avcı, M. S. (2025). Toward sustainable construction: A critical review of recycled aggregate concrete properties and future opportunities. *Case Studies in Construction Materials*, 23, e05133. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05133>
- Amin, A. A., Younis, K. H., Jirjees, F. F., ve Ibrahim, T. K. (2021). Experimental Study on Mechanical Properties of Pervious Concrete Containing Recycled Aggregate. *Civil Engineering and Architecture*, 9(6), 1735–1743. <https://doi.org/10.13189/cea.2021.090607>
- Andreu, G., ve Miren, E. (2014). Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 52, 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.054>
- Anike, E. E., Saidani, M., Olubanwo, A. O., ve Anya, U. C. (2022). Flexural performance of reinforced concrete beams with recycled aggregates and steel fibres. *Structures*, 39, 1264–1278. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.089>
- Arezoumandi, M., Smith, A., Volz, J. S., ve Khayat, K. H. (2015). An experimental study on flexural strength of reinforced concrete beams with 100% recycled concrete aggregate. *Engineering Structures*, 88, 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.01.043>
- Aslani, F., Ma, G., Yim Wan, D. L., ve Muselin, G. (2018). Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules. *Journal of Cleaner Production*, 182, 553–566. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.074>
- Azandariani, M. G., Vajdian, M., Javadi, M., ve Parvari, A. (2024). Durability and Compressive Strength of Composite Polyolefin Fiber-Reinforced Recycled Aggregate Concrete: An Experimental Study. *Composites Part C: Open Access*, 100533. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100533>

- Baena, M., Torres, L., Turon, A., Llorens, M., ve Barris, C. (2016). Bond behaviour between recycled aggregate concrete and glass fibre reinforced polymer bars. *Construction and Building Materials*, 106, 449–460. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.145>
- Bahrami, N., Zohrabi, M., Mahmoudy, S. A., ve Akbari, M. (2020). Optimum recycled concrete aggregate and micro-silica content in self-compacting concrete: Rheological, mechanical and microstructural properties. *Journal of Building Engineering*, 31, 101361. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101361>
- Ben Nakhi, A., ve Alhumoud, J. M. (2019). Effects of Recycled Aggregate on Concrete Mix and Exposure to Chloride. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2019/7605098>
- Bonifazi, G., Grosso, C., Palmieri, R., ve Serranti, S. (2025). Current trends and challenges in construction and demolition waste recycling. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 53, 101032. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2025.101032>
- Çakır, Ö. (2014). Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (GDBA) concrete with mineral additives. *Construction and Building Materials*, 68, 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.032>
- Chachar, K. H., Oad, M., Memon, B. A., Siyal, Z. A., ve Siyal, K. F. (2023). Workability and Flexural Strength of Recycled Aggregate Concrete with Steel Fibers. *Engineering, Technology ve Applied Science Research*, 13(3), 11051–11057. <https://doi.org/10.48084/etasr.5921>
- Chakradhara Rao, M. (2018). Properties of recycled aggregate and recycled aggregate concrete: Effect of parent concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*, 19(1), 103–110. <https://doi.org/10.1007/s42107-018-0011-x>
- Chakradhara Rao, M., Bhattacharyya, S. K., ve Barai, S. V. (2011). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures*, 44(1), 205–220. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9620-x>
- D. N., P. (2012). WORKABILITY STUDY FOR RECYCLED AGGREGATES. *IOSR Journal of Engineering*, 02(05), 1040–1044. <https://doi.org/10.9790/3021-020510401044>
- Dawood, M. H., ve Al-ASADI, A. K. (2023). Mechanical properties and flexural behaviour of reinforced concrete beams containing recycled concrete aggregate. *Scientific Review Engineering and Environmental Studies (SREES)*, 31(4), 259–269. <https://doi.org/10.22630/srees.4250>
- Demirbaş, A. O., Tuğluca, M. S., Şahin, O., İlcan, H., ve Şahmaran, M. (2025). A comprehensive study on the valorization of recycled concrete aggregates in 3D-printable cementitious systems. *Structures*, 77, 109152. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109152>

- Dimitriou, G., Savva, P., ve Petrou, M. F. (2018). Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 158, 228–235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.137>
- Dong, C., Zhang, Q., Chen, C., Jiang, T., Guo, Z., Liu, Y., ve Lin, S. (2022). Fresh and hardened properties of recycled plastic fiber reinforced self-compacting concrete made with recycled concrete aggregate and fly ash, slag, silica fume. *Journal of Building Engineering*, 62, 105384. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105384>
- Duan, Z., Singh, A., Xiao, J., ve Hou, S. (2020). Combined use of recycled powder and recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 254, 119323. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119323>
- Ettxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., ve Barra, M. (2007'a). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 735–742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>
- Ettxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., ve Barra, M. (2007b). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 735–742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>
- Falek, K., Aoudjane, K., Kadri, E. H., ve Kaoua, F. (2017). Influence of recycled aggregates on the mechanical and tribological behavior of concrete. *Energy Procedia*, 139, 456–461. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.237>
- Fawzy, A., Elshami, A., ve Ahmad, S. (2023). Investigating the Effects of Recycled Aggregate and Mineral Admixtures on the Mechanical Properties and Performance of Concrete. *Materials*, 16(14), 5134. <https://doi.org/10.3390/ma16145134>
- Fawzy, Y. A. (2018). Impact of recycled gravel obtained from low or medium concrete grade on concrete properties. *HBRC Journal*, 14(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2016.04.003>
- Fayed, S., Aksoylu, C., Ecemiş, A. S., Madenci, E., ve Özkılıç, Y. O. (2024). Tensile Behavior of Green Concrete Made of Fine/Coarse Recycled Glass and Recycled Concrete Aggregates. *Buildings*, 14(9), 2969. <https://doi.org/10.3390/buildings14092969>
- Fayed, S., Madenci, E., Özkılıç, Y. O., ve Tawfik, T. A. (2024). Effect of Block Size on Bearing Strength of Steel Fiber-Reinforced Recycled Aggregate Concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(4), 5287–5303. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08344-0>
- Fiol, F., Thomas, C., Muñoz, C., Ortega-López, V., ve Manso, J. M. (2018'a). The influence of recycled aggregates from precast elements on the mechanical properties of structural self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 182, 309–323. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.132>

- Fiol, F., Thomas, C., Muñoz, C., Ortega-López, V., ve Manso, J. M. (2018b). The influence of recycled aggregates from precast elements on the mechanical properties of structural self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 182, 309–323. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.132>
- Gao, D., Ji, D., Gu, Z., Yan, H., ve Zhang, Y. (2023). Workability and mechanical properties analysis of hybrid fibers reinforced self-compacting concrete incorporating recycled aggregates based on acoustic emission technique. *Structures*, 51, 1722–1741. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.139>
- Geng, Y., Wang, Y., ve Chen, J. (2016). Creep behaviour of concrete using recycled coarse aggregates obtained from source concrete with different strengths. *Construction and Building Materials*, 128, 199–213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.086>
- Ghorbani, S., Sharifi, S., Ghorbani, S., Tam, V. W., De Brito, J., ve Kurda, R. (2019). Effect of crushed concrete waste's maximum size as partial replacement of natural coarse aggregate on the mechanical and durability properties of concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 664–673. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.06.030>
- Gonzalez-Corominas, A., Etxeberria, M., ve Poon, C. (2017). Influence of the Quality of Recycled Aggregates on the Mechanical and Durability Properties of High Performance Concrete. *Waste and Biomass Valorization*, 8(5), 1421–1432. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9637-7>
- González-Taboada, I., González-Fonteboa, B., Eiras-López, J., ve Rojo-López, G. (2017). Tools for the study of self-compacting recycled concrete fresh behaviour: Workability and rheology. *Journal of Cleaner Production*, 156, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.045>
- González-Taboada, I., González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F., ve Carro-López, D. (2016). Study of recycled concrete aggregate quality and its relationship with recycled concrete compressive strength using database analysis. *Materiales de Construcción*, 66(323), e089. <https://doi.org/10.3989/mc.2016.06415>
- Gorji Azandariani, M., Vajdian, M., Javadi, M., ve Parvari, A. (2024). Durability and compressive strength of composite polyolefin fiber-reinforced recycled aggregate concrete: An experimental study. *Composites Part C: Open Access*, 15, 100533. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100533>
- Guo, K., Yang, Y. Z., Zhou, J. H., ve Wu, X. Y. (2022). Study on flexural behavior of graphene oxide recycled concrete beams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1242(1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1242/1/012017>
- Guo-yao, C. (2005). Experimental study on the basic performance of recycled aggregate concrete with different displacement ratio. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:137898956>

- Hassan, S. S. (2018). Effects of recycled concrete aggregate on some mechanical properties of high strength concrete. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 433, 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/433/1/012033>
- Hawileh, R. A., Quadri, S. S., Abdalla, J. A., Assad, M., Thomas, B. S., Craig, D., ve Naser, M. Z. (2024'a). Residual mechanical properties of recycled aggregate concrete at elevated temperatures. Fire and Materials, 48(1), 138–151. <https://doi.org/10.1002/fam.3168>
- Hawileh, R. A., Quadri, S. S., Abdalla, J. A., Assad, M., Thomas, B. S., Craig, D., ve Naser, M. Z. (2024b). Residual mechanical properties of recycled aggregate concrete at elevated temperatures. Fire and Materials, 48(1), 138–151. <https://doi.org/10.1002/fam.3168>
- Hemida, O. A. R., Abdalla, H. A., ve Fouad, H. E. E. (2023). Flexural behaviour of recycled reinforced concrete beams strengthened/ repaired with CFRP laminates. Journal of Engineering and Applied Science, 70(1), 64. <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00235-3>
- Huang, M., Zhao, Y., Wang, H., ve Lin, S. (2021). Mechanical Properties Test and Strength Prediction on Basalt Fiber Reinforced Recycled Concrete. Advances in Civil Engineering, 2021(1), 6673416. <https://doi.org/10.1155/2021/6673416>
- Hui, C., Liu, Y., Hai, R., ve Liu, M. (2022'a). Experimental Study and Analysis on Workability and Mechanical Performance of High Fluidity Recycled Concrete. Materials, 15(17), 6104. <https://doi.org/10.3390/ma15176104>
- Hui, C., Liu, Y., Hai, R., ve Liu, M. (2022b). Experimental Study and Analysis on Workability and Mechanical Performance of High Fluidity Recycled Concrete. Materials, 15(17), 6104. <https://doi.org/10.3390/ma15176104>
- Islam, Md. J., Islam, K., Shahjalal, Md., Khatun, E., Islam, S., ve Razzaque, A. B. (2022). Influence of different types of fibers on the mechanical properties of recycled waste aggregate concrete. Construction and Building Materials, 337, 127577. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127577>
- Jagadesh, P., Karthik, K., Kalaivani, P., Karalar, M., Althaqafi, E., Madenci, E., ve Özkılıç, Y. O. (2024'a). Examining the Influence of Recycled Aggregates on the Fresh and Mechanical Characteristics of High-Strength Concrete: A Comprehensive Review. Sustainability, 16(20), 9052. <https://doi.org/10.3390/su16209052>
- Jagadesh, P., Karthik, K., Kalaivani, P., Karalar, M., Althaqafi, E., Madenci, E., ve Özkılıç, Y. O. (2024b). Examining the Influence of Recycled Aggregates on the Fresh and Mechanical Characteristics of High-Strength Concrete: A Comprehensive Review. Sustainability, 16(20), 9052. <https://doi.org/10.3390/su16209052>
- Jamil, K., Shabbir, F., ve Raza, A. (2023). Performance evaluation of jute fiber-reinforced recycled aggregate concrete: Strength and durability aspects. Structural Concrete, 24(5), 6520–6538. <https://doi.org/10.1002/suco.202200948>

- Ju, X., Wu, L., Liu, M., Jiang, H., Zhang, W., Guan, L., Chen, X., ve Fan, X. (2024). Influence of the Original Concrete Strength and Initial Moisture Condition on the Properties Improvement of Recycled Coarse Aggregate via Accelerated Carbonation Reactions. *Materials*, 17(3), 706. <https://doi.org/10.3390/ma17030706>
- Kachouh, N., El-Hassan, H., ve El-Maaddawy, T. (2021). Influence of steel fibers on the flexural performance of concrete incorporating recycled concrete aggregates and dune sand. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 10(3), 165–192. <https://doi.org/10.1080/21650373.2020.1809546>
- Kang, M., ve Weibin, L. (2018). Effect of the Aggregate Size on Strength Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(1), 2428576. <https://doi.org/10.1155/2018/2428576>
- Kaplan, G., Bayraktar, O. Y., Gholampour, A., Gencel, O., Koksall, F., ve Ozbakkaloglu, T. (2021). Mechanical and durability properties of steel fiber-reinforced concrete containing coarse recycled concrete aggregate. *Structural Concrete*, 22(5), 2791–2812. <https://doi.org/10.1002/suco.202100028>
- Khan, A.-R., Fareed, S., ve Aziz, T. (2024). Residual Mechanical Properties of Concrete with 30% Recycled Concrete Aggregates Exposed to Elevated Temperatures. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 48(1), 315–327. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01253-0>
- Khoshkenari, A. G., Shafigh, P., Moghimi, M., ve Mahmud, H. B. (2014). The role of 0–2mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete. *Materials ve Design*, 64, 345–354. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.048>
- Kim, S.-W., ve Yun, H.-D. (2013). Influence of recycled coarse aggregates on the bond behavior of deformed bars in concrete. *Engineering Structures*, 48, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.10.009>
- Kou, S. C., ve Poon, C. S. (2012). Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 35, 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.032>
- Kumutha, R., ve Vijai, K. (2008). Effect of Recycled Coarse Aggregates in Properties of Concrete. *Journal of Green Building*, 3(4), 130–137. <https://doi.org/10.3992/jgb.3.4.130>
- Lau, T. L., Elleithy, W., Choong, W. K., Tze, T. Y., Lee, C. M., ve Modhwadia, A. L. (2014). Effects of recycled aggregates on concrete strengths. *Materials Research Innovations*, 18(sup6), S6-372-S6-374. <https://doi.org/10.1179/1432891714Z.000000000982>
- Lavado, J., Bogas, J., De Brito, J., ve Hawreen, A. (2020). Fresh properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 233, 117322. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117322>

- Li, C., Wang, F., Deng, X., Li, Y., ve Zhao, S. (2019). Testing and Prediction of the Strength Development of Recycled-Aggregate Concrete with Large Particle Natural Aggregate. *Materials*, 12(12), 1891. <https://doi.org/10.3390/ma12121891>
- Li, C., Zhao, H., Wu, J., Li, X., ve Zhang, Y. (2021'a). Experimental study on the influence of recycled aggregates on the mechanical properties of concrete. *E3S Web of Conferences*, 283, 01033. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128301033>
- Li, C., Zhao, H., Wu, J., Li, X., ve Zhang, Y. (2021b). Experimental study on the influence of recycled aggregates on the mechanical properties of concrete. *E3S Web of Conferences*, 283, 01033. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128301033>
- Li, C., Zhao, H., Wu, J., Li, X., ve Zhang, Y. (2021c). Experimental study on the influence of recycled aggregates on the mechanical properties of concrete. *E3S Web of Conferences*, 283, 01033. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128301033>
- Li, T., Xiao, J., Zhu, C., ve Zhong, Z. (2016). Experimental study on mechanical behaviors of concrete with large-size recycled coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 120, 321–328. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.110>
- Li, X. (2008). Recycling and reuse of waste concrete in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(1–2), 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.09.006>
- Lima, C., Caggiano, A., Faella, C., Martinelli, E., Pepe, M., ve Realfonzo, R. (2013). Physical properties and mechanical behaviour of concrete made with recycled aggregates and fly ash. *Construction and Building Materials*, 47, 547–559. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.051>
- Limbachiya, M. C., Leelawat, T., ve Dhir, R. K. (2000'a). Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*, 33(9), 574–580. <https://doi.org/10.1007/BF02480538>
- Limbachiya, M. C., Leelawat, T., ve Dhir, R. K. (2000b). Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*, 33(9), 574–580. <https://doi.org/10.1007/BF02480538>
- López Gayarre, F., López-Colina Pérez, C., Serrano López, M. A., ve Domingo Cabo, A. (2014). The effect of curing conditions on the compressive strength of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 53, 260–266. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.112>
- Luo, X., Yao, H., ve Lu, Z. (2017). Research on Physical and Mechanical Characteristics of Recycled Aggregate Concrete. *DEStech Transactions on Materials Science and Engineering*, (amsee). <https://doi.org/10.12783/dtmse/amsee2017/14277>
- Mahakavi, P., ve Chithra, R. (2020). Effect of recycled coarse aggregate and manufactured sand in self compacting concrete. *Australian Journal of Structural Engineering*, 21(1), 33–43. <https://doi.org/10.1080/13287982.2019.1636519>
- Mahmood, W., Khan, A.-R., ve Ayub, T. (2022). Mechanical and Durability Properties of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregates. *Iranian Journal of Science*

- and Technology, Transactions of Civil Engineering, 46(3), 2111–2130.
<https://doi.org/10.1007/s40996-021-00692-x>
- Malešev, M., Radonjanin, V., ve Marinković, S. (2010). Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. Sustainability, 2(5), 1204–1225.
<https://doi.org/10.3390/su2051204>
- Mallikarjuna Reddy, Dr. V., ve Swaroop, M. M. S. (2020). Effect of Recycled Aggregates on Strength and performance of Recycled Aggregate Concrete. E3S Web of Conferences, 184, 01085. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018401085>
- Manzi, S., Mazzotti, C., ve Chiara Bignozzi, M. (2017). Self-compacting concrete with recycled concrete aggregate: Study of the long-term properties. Construction and Building Materials, 157, 582–590.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.129>
- Martínez-García, R., Guerra-Romero, M. I., Morán-del Pozo, J. M., Brito, J. D., ve Juan-Valdés, A. (2020). Recycling Aggregates for Self-Compacting Concrete Production: A Feasible Option. Materials, 13(4), 868.
<https://doi.org/10.3390/ma13040868>
- Mathur, P., Joshi, T., ve Dave, U. (2023'a). Impact of recycled aggregates on mechanical properties of concrete. Materials Today: Proceedings, 80, 674–680.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.067>
- Mathur, P., Joshi, T., ve Dave, U. (2023b). Impact of recycled aggregates on mechanical properties of concrete. Materials Today: Proceedings, 80, 674–680.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.067>
- Matias, D., De Brito, J., Rosa, A., ve Pedro, D. (2013). Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers. Construction and Building Materials, 44, 101–109.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.011>
- McGinnis, M. J., Davis, M., De La Rosa, A., Weldon, B. D., ve Kurama, Y. C. (2017). Strength and stiffness of concrete with recycled concrete aggregates. Construction and Building Materials, 154, 258–269.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.015>
- McNeil, K., ve Kang, T. H.-K. (2013'a). Recycled Concrete Aggregates: A Review. International Journal of Concrete Structures and Materials, 7(1), 61–69.
<https://doi.org/10.1007/s40069-013-0032-5>
- McNeil, K., ve Kang, T. H.-K. (2013b). Recycled Concrete Aggregates: A Review. International Journal of Concrete Structures and Materials, 7(1), 61–69.
<https://doi.org/10.1007/s40069-013-0032-5>
- McNeil, K., ve Kang, T. H.-K. (2013c). Recycled Concrete Aggregates: A Review. International Journal of Concrete Structures and Materials, 7(1), 61–69.
<https://doi.org/10.1007/s40069-013-0032-5>

- Meddah, M., Al-Harthy, A., ve A. Ismail, M. (2020). Recycled Concrete Aggregates and Their Influences on Performances of Low and Normal Strength Concretes. *Buildings*, 10(9), 167. <https://doi.org/10.3390/buildings10090167>
- Medina, C., Zhu, W., Howind, T., Sánchez De Rojas, M. I., ve Frías, M. (2014). Influence of mixed recycled aggregate on the physical – mechanical properties of recycled concrete. *Journal of Cleaner Production*, 68, 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.002>
- Meesala, C. R. (2019a). Influence of different types of fiber on the properties of recycled aggregate concrete. *Structural Concrete*, 20(5), 1656–1669. <https://doi.org/10.1002/suco.201900052>
- Meesala, C. R. (2019b). Influence of different types of fiber on the properties of recycled aggregate concrete. *Structural Concrete*, 20(5), 1656–1669. <https://doi.org/10.1002/suco.201900052>
- Meftah, H., ve Arabi, N. (2024). Effects of elevated temperatures' exposure on the properties of concrete incorporating recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 411, 134612. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134612>
- Michaud, K., Hoult, N., Lotfy, A., ve Lum, P. (2016). Performance in shear of reinforced concrete slabs containing recycled concrete aggregate. *Materials and Structures*, 49(10), 4425–4438. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0798-4>
- Mohammed Ali, A. A., Zidan, R. S., ve Ahmed, T. W. (2020'a). Evaluation of high-strength concrete made with recycled aggregate under effect of well water. *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00338. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00338>
- Mohammed Ali, A. A., Zidan, R. S., ve Ahmed, T. W. (2020b). Evaluation of high-strength concrete made with recycled aggregate under effect of well water. *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00338. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00338>
- Muñoz Pérez, S. P., Pardo Becerra, J. M., García Chumacero, J. M., Sánchez Diaz, E., Diaz Ortiz, E. A., Laffite, E. D. R., Quispe Osorio, J. L., ve Briceño Mendoza, Y. M. (2024). Evaluation of the physical and mechanical properties of concrete with the incorporation of recycled concrete aggregate. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(6), 204. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01517-2>
- Khan, A. R., Fareed, S., ve M. S. (2019'a). Use of recycled concrete aggregates in structural concrete. 152–162. <https://doi.org/10.18552/2019/IDSCMT5078>
- Khan, A. R., Fareed, S., ve M. S. (2019b). Use of recycled concrete aggregates in structural concrete. 152–162. <https://doi.org/10.18552/2019/IDSCMT5078>
- Neupane, B., Sahani, K., ve Khadka, S. S. (2025). Experimental Testing and Numerical Simulation of Recycled Concrete Aggregate in a Concrete Mix. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 19(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s40069-024-00733-5>

- Ngo, N., ve Chai, S. (2004). High-strength structural concrete with recycled aggregates.
- Nieto, D., Dapena, E., Alaejos, P., Olmedo, J., ve Pérez, D. (2019). Properties of Self-Compacting Concrete Prepared with Coarse Recycled Concrete Aggregates and Different Water:Cement Ratios. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2), 04018376. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002566](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002566)
- 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), 1120. <https://doi.org/10.3390/ma12071120>
- Ogbonna, A. C. (2018). Laboratory evaluation of the characteristics of continuously reinforced concrete pavement incorporating recycled concrete aggregate. *Australian Journal of Civil Engineering*, 16(1), 38–45. <https://doi.org/10.1080/14488353.2018.1444910>
- Panghal, H., ve Kumar, A. (2023). Effects of surface modified recycled coarse aggregates on concrete's mechanical characteristics. *Materials Research Express*, 10(9), 095506. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acf915>
- Papamichael, I., Voukkali, I., Loizia, P., ve Zorpas, A. A. (2023). Construction and demolition waste framework of circular economy: A mini review. *Waste Management ve Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 41(12), 1728–1740. <https://doi.org/10.1177/0734242X231190804>
- Pedro, D., De Brito, J., ve Evangelista, L. (2017'a). Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties. *Construction and Building Materials*, 154, 294–309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.215>
- Pedro, D., De Brito, J., ve Evangelista, L. (2017b). Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties. *Construction and Building Materials*, 154, 294–309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.215>
- Pedro, D., De Brito, J., ve Evangelista, L. (2017c). Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties. *Construction and Building Materials*, 154, 294–309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.215>
- Peiris, D., Gunasekara, C., Law, D. W., Patrisia, Y., Tam, V. W. Y., ve Setunge, S. (2025'a). Impact of treatment methods on recycled concrete aggregate performance: A comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(24), 14405–14438. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36497-y>
- Peiris, D., Gunasekara, C., Law, D. W., Patrisia, Y., Tam, V. W. Y., ve Setunge, S. (2025b). Impact of treatment methods on recycled concrete aggregate performance: A comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(24), 14405–14438. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36497-y>
- Pereira, P., Evangelista, L., ve De Brito, J. (2012). The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete

- aggregates. *Construction and Building Materials*, 28(1), 722–729. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.050>
- Piccinali, A., Diotti, A., Plizzari, G., ve Sorlini, S. (2022). Impact of Recycled Aggregate on the Mechanical and Environmental Properties of Concrete: A Review. *Materials*, 15(5), 1818. <https://doi.org/10.3390/ma15051818>
- Prasad Dash, A., Sahoo, K., Sekhar Panda, H., Pradhan, A., ve Jena, B. (2022'a). Experimental study on the effect of superplasticizer on workability and strength characteristics of recycled coarse aggregate concrete. *Materials Today: Proceedings*, 60, 488–493. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.324>
- Prasad Dash, A., Sahoo, K., Sekhar Panda, H., Pradhan, A., ve Jena, B. (2022b). Experimental study on the effect of superplasticizer on workability and strength characteristics of recycled coarse aggregate concrete. *Materials Today: Proceedings*, 60, 488–493. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.324>
- Puthussery, J. V., Kumar, R., ve Garg, A. (2017'a). Evaluation of recycled concrete aggregates for their suitability in construction activities: An experimental study. *Waste Management*, 60, 270–276. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.008>
- Puthussery, J. V., Kumar, R., ve Garg, A. (2017b). Evaluation of recycled concrete aggregates for their suitability in construction activities: An experimental study. *Waste Management*, 60, 270–276. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.008>
- Qasim, O. A., Hilal, N., Al Biajawi, M. I., Sor, N. H., ve Tawfik, T. A. (2024). Studying the usability of recycled aggregate to produce new concrete. *Journal of Engineering and Applied Science*, 71(1), 129. <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00463-1>
- Quan Tran, V., Quoc Dang, V., ve Si Ho, L. (2022). Evaluating compressive strength of concrete made with recycled concrete aggregates using machine learning approach. *Construction and Building Materials*, 323, 126578. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126578>
- Rahu, A. A., Memon, B. A., Oad, M., Dahri, S. A., Memon, A. R., ve Bhutto, A. H. (2023). Assessment of the Flexural Strength of No-Fines Recycled Aggregate Concrete Prisms. *Engineering, Technology ve Applied Science Research*, 13(1), 10067–10072. <https://doi.org/10.48084/etasr.5458>
- Rakshvir, M., ve Barai, S. V. (2006'a). Studies on recycled aggregates-based concrete. *Waste Management ve Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 24(3), 225–233. <https://doi.org/10.1177/0734242X06064820>
- Rakshvir, M., ve Barai, S. V. (2006b). Studies on recycled aggregates-based concrete. *Waste Management ve Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 24(3), 225–233. <https://doi.org/10.1177/0734242X06064820>
- Rao, M. C., Bhattacharyya, S. K., ve Barai, S. V. (2019). Properties of Recycled Aggregates. In M. C. Rao, S. K. Bhattacharyya, ve S. V. Barai, *Systematic Approach of Characterisation and Behaviour of Recycled Aggregate Concrete* (pp. 65–81). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6686-3_3

- Revilla-Cuesta, V., Ortega-López, V., Skaf, M., ve Manso, J. M. (2020). Effect of fine recycled concrete aggregate on the mechanical behavior of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 263, 120671. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120671>
- Revilla-Cuesta, V., Skaf, M., Espinosa, A. B., Santamaría, A., ve Ortega-López, V. (2020). Statistical Approach for the Design of Structural Self-Compacting Concrete with Fine Recycled Concrete Aggregate. *Mathematics*, 8(12), 2190. <https://doi.org/10.3390/math8122190>
- Sabău, M., ve Remolina Duran, J. (2022). Prediction of Compressive Strength of General-Use Concrete Mixes with Recycled Concrete Aggregate. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15(1), 73–85. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00012-6>
- Sadati, S., ve Khayat, K. H. (2016). Field performance of concrete pavement incorporating recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 126, 691–700. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.087>
- Sadeghi-Nik, A., Berenjian, J., Alimohammadi, S., Lotfi-Omran, O., Sadeghi-Nik, A., ve Karimaei, M. (2019). The Effect of Recycled Concrete Aggregates and Metakaolin on the Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete Containing Nanoparticles. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 43(S1), 503–515. <https://doi.org/10.1007/s40996-018-0182-4>
- Safiuddin, Alengaram, U. J., Salam, A., Jumaat, M. Z., Jaafar, F. F., ve Saad, H. B. (2011). Properties of high-workability concrete with recycled concrete aggregate. *Materials Research*, 14(2), 248–255. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392011005000039>
- Safiuddin, Md., Alengaram, U. J., Rahman, Md. M., Salam, Md. A., ve Jumaat, Mohd. Z. (2013). USE OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE IN CONCRETE: A REVIEW. *Journal of Civil Engineering and Management*, 19(6), 796–810. <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.799093>
- Sajan, K. C., Adhikari, R., Mandal, B., ve Gautam, D. (2022a). Mechanical characterization of recycled concrete under various aggregate replacement scenarios. *Cleaner Engineering and Technology*, 7, 100428. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100428>
- Sajan, K. C., Adhikari, R., Mandal, B., ve Gautam, D. (2022b). Mechanical characterization of recycled concrete under various aggregate replacement scenarios. *Cleaner Engineering and Technology*, 7, 100428. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100428>
- Sérifou, M., Sbartaï, Z. M., Yotte, S., Boffoué, M. O., Emeruwa, E., ve Bos, F. (2013a). A Study of Concrete Made with Fine and Coarse Aggregates Recycled from Fresh Concrete Waste. *Journal of Construction Engineering*, 2013, 1–5. <https://doi.org/10.1155/2013/317182>
- Sérifou, M., Sbartaï, Z. M., Yotte, S., Boffoué, M. O., Emeruwa, E., ve Bos, F. (2013b). A Study of Concrete Made with Fine and Coarse Aggregates Recycled from Fresh

- Concrete Waste. *Journal of Construction Engineering*, 2013, 1–5. <https://doi.org/10.1155/2013/317182>
- Silva, P., ve De Brito, J. (2017). Experimental study of the mechanical properties and shrinkage of self-compacting concrete with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(4), 430–453. <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1131200>
- Silva, R. V., De Brito, J., ve Dhir, R. K. (2015). The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: A review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19(7), 825–849. <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.974831>
- Singh, A. K., Verma, A. S. K., ve Kumar, A. A. (n.d.). The Effect on the behavior of Concrete by using Recycled Aggregate Concrete: A Review. (2018).
- Sobuz, Md. H. R., Datta, S. D., Akid, A. S. M., Tam, V. W. Y., Islam, S., Rana, Md. J., Aslani, F., Yalçinkaya, Ç., ve Sutan, N. M. (2022a). Evaluating the effects of recycled concrete aggregate size and concentration on properties of high-strength sustainable concrete. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, S1018363922000356. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.04.004>
- Sobuz, Md. H. R., Datta, S. D., Akid, A. S. M., Tam, V. W. Y., Islam, S., Rana, Md. J., Aslani, F., Yalçinkaya, Ç., ve Sutan, N. M. (2022b). Evaluating the effects of recycled concrete aggregate size and concentration on properties of high-strength sustainable concrete. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, S1018363922000356. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.04.004>
- Sobuz, Md. H. R., Datta, S. D., Akid, A. S. M., Tam, V. W. Y., Islam, S., Rana, Md. J., Aslani, F., Yalçinkaya, Ç., ve Sutan, N. M. (2022c). Evaluating the effects of recycled concrete aggregate size and concentration on properties of high-strength sustainable concrete. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, S1018363922000356. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.04.004>
- Sonawane, T. R., ve Pimplikar, S. S. (2013). Use Of Recycled Aggregate In Concrete. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:135520052>
- Soto-Paz, J., Arroyo, O., Torres-Guevara, L. E., Parra-Orobio, B. A., ve Casallas-Ojeda, M. (2023). The circular economy in the construction and demolition waste management: A comparative analysis in emerging and developed countries. *Journal of Building Engineering*, 78, 107724. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107724>
- Sri Ravindrarajah, R., ve Tam, C. T. (1985a). Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Magazine of Concrete Research*, 37(130), 29–38. <https://doi.org/10.1680/mac.1985.37.130.29>
- Sri Ravindrarajah, R., ve Tam, C. T. (1985b). Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Magazine of Concrete Research*, 37(130), 29–38. <https://doi.org/10.1680/mac.1985.37.130.29>

- Stochino, F., Pani, L., Francesconi, L., ve Mistretta, F. (2017). Cracking of Reinforced Recycled Concrete Slabs. *International Journal of Structural Glass and Advanced Materials Research*, 1(1), 3–9. <https://doi.org/10.3844/sgamrsp.2017.3.9>
- Sun, C., Chen, Q., Xiao, J., ve Liu, W. (2020). Utilization of waste concrete recycling materials in self-compacting concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104930. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104930>
- Sun, H., Luo, L., Li, X., ve Yuan, H. (2024). The treated recycled aggregates effects on workability, mechanical properties and microstructure of ultra-high performance concrete Co-reinforced with nano-silica and steel fibers. *Journal of Building Engineering*, 86, 108804. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108804>
- Surendar, M., Beulah Gnana Ananthi, G., Sharaniya, M., Deepak, M. S., ve Soundarya, T. V. (2021). Mechanical properties of concrete with recycled aggregate and M-sand. *Materials Today: Proceedings*, 44, 1723–1730. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.896>
- Tabsh, S. W., ve Abdelfatah, A. S. (2009). Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2), 1163–1167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.06.007>
- Tang, W. C., Ryan, P. C., Cui, H. Z., ve Liao, W. (2016). Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled Coarse Aggregate. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2016/2761294>
- Thomas, J., Thaickavil, N. N., ve Wilson, P. M. (2018). Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. *Journal of Building Engineering*, 19, 349–365. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.05.007>
- Tu, T.-Y., Chen, Y.-Y., ve Hwang, C.-L. (2006). Properties of HPC with recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 36(5), 943–950. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.022>
- Tuyan, M., Mardani-Aghabaglou, A., ve Ramyar, K. (2014). Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. *Materials ve Design*, 53, 983–991. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.100>
- Urban, K., ve Sicakova, A. (2018). Analysis of compressive strength of concrete prepared by triplemixing technology depending on both the discharge and curing time. *Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering*, 13(1), 113–121. <https://doi.org/10.1515/sspjce-2018-0025>
- Vu, X. H., Vo, T. C., ve Phan, V. T. (2021). Study of the Compressive Strength of Concrete with Partial Replacement of Recycled Coarse Aggregates. *Engineering, Technology ve Applied Science Research*, 11(3), 7191–7194. <https://doi.org/10.48084/etasr.4162>
- Wang, Z., Wang, L., Cui, Z., ve Zhou, M. (2011). Effect of recycled coarse aggregate on concrete compressive strength. *Transactions of Tianjin University*, 17(3), 229–234. <https://doi.org/10.1007/s12209-011-1499-2>

- Waseem, S. A. (2022). An Investigation of Mechanical and Durability Properties of Carbonated Recycled Aggregate Concrete. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 103(2), 349–358. <https://doi.org/10.1007/s40030-021-00608-y>
- Xiao, J., Fan, Y., ve Tawana, M. M. (2013a). Residual compressive and flexural strength of a recycled aggregate concrete following elevated temperatures. *Structural Concrete*, 14(2), 168–175. <https://doi.org/10.1002/suco.201200037>
- Xiao, J., Fan, Y., ve Tawana, M. M. (2013b). Residual compressive and flexural strength of a recycled aggregate concrete following elevated temperatures. *Structural Concrete*, 14(2), 168–175. <https://doi.org/10.1002/suco.201200037>
- Xiao, J., Li, J., ve Zhang, Ch. (2005a). Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1187–1194. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.020>
- Xiao, J., Li, J., ve Zhang, Ch. (2005b). On statistical characteristics of the compressive strength of recycled aggregate concrete. *Structural Concrete*, 6(4), 149–153. <https://doi.org/10.1680/stco.2005.6.4.149>
- Xiao, J., Tang, Y., Chen, H., Zhang, H., ve Xia, B. (2022). Effects of recycled aggregate combinations and recycled powder contents on fracture behavior of fully recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132895. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132895>
- Xie, J., Guo, Y., Liu, L., ve Xie, Z. (2015). Compressive and flexural behaviours of a new steel-fibre-reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 79, 263–272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.036>
- Xie, J., Wang, J., Rao, R., Wang, C., ve Fang, C. (2019). Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled aggregate. *Composites Part B: Engineering*, 164, 179–190. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.067>
- Xu, L., Su, W., ve Su, T. (2022). Influence of recycled clay brick aggregate on the mechanical properties of concrete. *REVIEWS ON ADVANCED MATERIALS SCIENCE*, 61(1), 372–380. <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0034>
- Xu, X., Luo, Y., Sreeram, A., Wu, Q., Chen, G., Cheng, S., Chen, Z., ve Chen, X. (2022). Potential use of recycled concrete aggregate (GDBA) for sustainable asphalt pavements of the future: A state-of-the-art review. *Journal of Cleaner Production*, 344, 130893. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130893>
- Yang, H., Zhao, H., ve Liu, F. (2018). Residual cube strength of coarse GDBA concrete after exposure to elevated temperatures. *Fire and Materials*, 42(4), 424–435. <https://doi.org/10.1002/fam.2508>
- Younes, A., Elbeltagi, E., Diab, A., Tarsi, G., Saeed, F., ve Sangiorgi, C. (2024). Incorporating coarse and fine recycled aggregates into concrete mixes: Mechanical characterization and environmental impact. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 26(1), 654–668. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01834-1>

- Zaharieva, R., ve Dimitrov, G. (2023). Impact of recycled aggregate properties on concrete performance. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1276(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1276/1/012003>
- Zainab Aamer Shamsulddin ve Rafaa Zair Jassim. (2016a). Influence of Recycled Construction Materials Aggregate on Mechanical and Physical Properties of Concrete. Journal of Civil Engineering and Architecture, 10(11). <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2016.11.006>
- Zainab Aamer Shamsulddin ve Rafaa Zair Jassim. (2016b). Influence of Recycled Construction Materials Aggregate on Mechanical and Physical Properties of Concrete. Journal of Civil Engineering and Architecture, 10(11). <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2016.11.006>
- Zhu, J., Dong, H., Cao, W., ve Zhang, J. (2025). Flexural behavior of full-scale high-strength recycled aggregate concrete slabs reinforced with steel trusses under one-way repeated loading. Structures, 73, 108318. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108318>
- Zhu, L., Wen, T., ve Tian, L. (2022). Size effects in compressive and splitting tensile strengths of polypropylene fiber recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials, 341, 127878. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127878>