



**GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ GEOPOLİMER
AGREGALARDAN ÜRETİLEN NORMAL
BETONLARIN ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Sayed Ahmad ANIS

**Danışman: Doç. Dr. Rıza POLAT
Yüksek Lisans Tezi**

**İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2023**

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YAPI MALZEMELERİ ANA BİLİM DALI

**GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ GEOPOLİMER AGREGALARDAN ÜRETİLEN
NORMAL BETONLARIN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

(Investigation of the Properties of Normal Concretes Produced from Recycled Geopolymer
Aggregates)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sayed Ahmad ANIS

Danışman: Doç. Dr. Rıza POLAT

Erzurum

Mayıs, 2023



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ GEOPOLİMER AGREGALARDAN ÜRETİLEN
NORMAL BETONLARIN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Doç. Dr. Rıza POLAT danışmanlığında, Sayed Ahmad ANIS tarafından hazırlanan bu çalışma, 19/06/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Malzemeleri Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (3./3.)** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Rıza POLAT <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Cemal Karaaslan <i>Iğdır Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../.... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek lisans Tezi olarak *Doç. Dr. Rıza POLAT* danışmanlığında sunulan “GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ GEOPOLİMER AGREGALARDAN ÜRETİLEN NORMAL BETONLARIN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	2	30
Kuramsal Temeller	3	30
Materyal ve Metot	11	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	2	20
Sonuçlar ve Öneriler	2	20
Tezin Geneli	8	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Sayed Ahmad ANIS	Doç. Dr. Rıza POLAT
19.6.2023	19.6.2023
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☒ Enstitü Yönetim Kurulunun/.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu tezin oluşturulmasında maddi ve manevi yardımını esirgemeyen, bilgilerini ve pratik deneyimlerini paylaştan ve sabırla yol gösteren danışman hocam Sn. Doç. Dr. Rıza POLAT’a içtenlikle teşekkür ederim.

Çalışmaya bilgileri ve destekleriyle katkı sağlayan Sn. Dr. Öğr. Üyesi Fatma KARAGÖL’e teşekkür etmek istiyorum.

Deneylein yapılması sırasında desteklerinden dolayı Sn. Arş. Gör. Derya TURHAN’a teşekkür ederim.

Çalışmada deneyler için gerekli malzemelerin temininde yardımcı olan Sn. İnşaat Mühendisi Muhammed Halil AKIN'a teşekkür ederim.

Bu yüksek lisans programında başından beri maddi burs desteklerini sağlayan Yurt Dışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığına (YTB) içtenlikle teşekkür ederim.

Eğitimim için çok emek veren ve hayatımın her anında yanımda olan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili anneme, rahmetli babama ve sevgili kardeşlerime çok teşekkür ederim.

Sayed Ahmad ANIS

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ GEOPOLİMER AGREGALARDAN ÜRETİLEN NORMAL BETONLARIN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI Sayed Ahmad ANIS

Danışman: Doç. Dr. Rıza POLAT

Amaç: Normal betona sürdürülebilir bir alternatif olan geopolimer betonlardan geri dönüştürülmüş agregaların, Portland çimentosu ile üretilen betonlarda kullanılabilirliğini araştırmaktır.

Yöntem: Geri dönüştürülmüş geopolimer agregalar (GDGA), perlit, yüksek fırın cürufu, kırmızı çamur, volkanik kül ve uçucu kül esaslı geopolimer beton numunelerden mekanik yöntemle kırılarak elde edilmiştir. Elde edilen agregalar, CEM I çimentosu ile üretilen betonda, ince, iri ve iri+ince olmak üzere üç ayrı boyutta normal agregaya yerine kullanılarak toplamda (yalnızca doğal agregaların kullanıldığı referans karışımı) 4 farklı karışım üretilmiştir. Ayrıca, çimento etkisini de araştırmak için CEM II çimento ile doğal agregaya yerine yalnızca iri agregaya yer değiştirilerek kontrol karışımıyla birlikte 2 karışım üretilmiştir. Üretilen betonların üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, aderans dayanımı, kısıtlanmış rötre, zamana bağlı boy değişimi, UPV (Ultrasonik Darbe Hızı), su emme ve yoğunluk deneyleri yapılmıştır. Ayrıca karışımların yüksek sıcaklık etkisi (300 ve 600°C) sonrası basınç dayanımı, UPV ve ağırlık kaybı özellikleri araştırılmıştır.

Bulgular: GDGA, betona ikame edildiğinde beton basınç dayanımlarının azaldığı ve bu azalmanın eğilme ve aderans dayanımlarında nispeten daha az olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan, GDGA ikamesiyle betonların UPV ve yoğunluk değerlerinde düşüş, çatlama yaşları (ring test), boy değişimleri, su emmeleri ve geçirimli boşluk hacimlerinde ise artış meydana geldiği tespit edilmiştir. GDGA içeren karışımlarda zamanla dayanım kazanma oranı normal betondan fazla olduğu gözlemlenmiştir. İnce GDGA'lı karışım, iri GDGA'lı karışıma göre daha düşük basınç ve eğilme dayanımına sahip olmasına rağmen daha az boy değişim gösterdiği, daha az su emme ve daha geçirimsiz olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç: Geopolimer beton atıkları geri dönüştürülebilir ve Portland çimento betonda mekanik, fiziksel ve diğer özelliklerinde kayıplar oluşması göz önüne alınarak kullanılabilir fakat alkali silika-reaksiyon oluşumu riski vardır.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer beton, geri dönüştürülmüş geopolimer agregaya, geri dönüştürülmüş agregaya, sürdürülebilirlik, küresel ısınma.

Temmuz 2023, 112 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF NORMAL CONCRETE PRODUCED FROM RECYCLED GEOPOLYMER AGGREGATE

Sayed Ahmad ANIS

Supervisor: Doç. Dr. Rıza POLAT

Purpose: The aim of this study is to investigate the usability of aggregates which recycled from geopolymer concrete, which is a sustainable alternative to normal concrete, in concrete produced with Ordinary Portland cement.

Method: Recycled geopolymer aggregates (RGA) were obtained by crushing of perlite, blast furnace slag, red mud, volcanic ash and fly ash based geopolymer concrete samples in two different (coarse and fine) sizes fraction. The obtained aggregates were used instead of normal aggregates in three different CEM I cement type mixtures as fine, coarse and coarse + fine aggregates, and in addition of natural aggregates mixture as a control mixture, totally 4 mixtures were produced. In addition, to investigate the cement effect, 2 mixtures were made with the control mixture by replacing only coarse aggregate with CEM II cement instead of natural aggregate. Compressive strength, flexural strength, bond strength, restrained shrinkage, time-dependent length change, UPV (Ultrasonic Pulse Velocity), water absorption and bulk density tests were performed on the produced concretes. In addition, the compressive strength, UPV and weight loss properties of the mixtures after the effect of high temperature (300 and 600°C) were investigated.

Results: When RGA was added to the concrete, the compressive strengths decreased. It has been determined that it has less effect on flexural strength and bond strength. UPV values and bulk density decrease, cracking ages in ring test, length changes, water absorption, volume of permeable voids increased. It has been observed that the rate of gaining strength over time in mixtures containing RGA is higher than that of normal concrete. It has been determined that although the mixture with fine RGA causes lower compressive and flexural strength than the mixture with coarse RGA, it shows less length change, less water absorption, and more impermeable.

Conclusion: Geopolymer concrete wastes can be recycled and can be used considering the loss of mechanical, physical and other properties of Portland cement concrete, but there is a risk of alkali silica-reaction formation.

Keyword: Geopolymer concrete, recycled geopolymer aggregate, recycled aggregate, sustainability, global warming.

July 2023, 112 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xii
GİRİŞ.....	1
Araştırmanın Amacı	3
KURAMSAL TEMELLER.....	5
Beton	5
Geopolimer Beton	5
İnşaat Atıkları ve Geri Dönüşüm	11
Geri Dönüştürülmüş Beton Agregası	12
GDA ile Üretilen Betonun Özellikleri	13
Basınç dayanımı	13
Eğilme ve çekme dayanımı	16
Kuruma rötresi	16
Aderans dayanımı.....	17
Yüksek sıcaklığa karşı direnci	18
Donma -çözülme etkisi	19
Geri Dönüştürülmüş Geopolimer Agregası (GDGA).....	19
GDGA'nın özellikleri.....	20
GDGA ile üretilen beton özellikleri	21
MATERYAL ve YÖNTEM	26
Materyal	26
Çalışmada kullanılan malzemeler	26
Deneylerde kullanılan aletler	30
Yöntem.....	40
Agregalar üzerine uygulanan yöntemler	41

Karışım tipleri ve numune kodlamaları.....	43
Karışım oranları belirlenmesi.....	44
Beton üzerine yapılmış deneyler.....	46
Yüksek sıcaklık prosedürü	53
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	55
Agrega Deneyleri ile İlgili Bulgular	55
Su emme oranı ve özgül ağırlık	55
Alkali silika reaksiyonu (ASR)	55
Beton Deneyleri ile İlgili Bulgular.....	57
Basınç dayanımı	57
Eğilme dayanımı	62
Aderans dayanımı.....	64
Kısıtlanmış rötre.....	68
Boy değişimi	75
Su emme, yoğunluk ve geçirimli boşluk hacmi	78
Yüksek sıcaklık etkisi	81
SONUÇLAR.....	88
KAYNAKLAR.....	90
ÖZGEÇMİŞ.....	98

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Portland çimentolarının Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	26
Tablo 2. Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı deneyleri için kullanılan agregaların (d_{maks} : 8mm olan) elek analizi değerleri	28
Tablo 3. Pul out ve ring test deneyleri için kullanılan agregaların (d_{maks} 12,5 mm olan) elek analizi değerleri	28
Tablo 4. Doğal agregata ve GDGA'nın fiziksel özellikleri.....	30
Tablo 5. Süper akışkanlaştırıcı katkının özellikleri	30
Tablo 6. PL-60-11 Strain gaugelerin özellikleri	40
Tablo 7. Deneyde kullanılan agreganın tane boyut dağılımı	42
Tablo 8. Deney harcı karışım oranları (gr)	42
Tablo 9. Deneysel çalışmada kullanılan karışımlar ve karışımların kodlanması.....	44
Tablo 10. Basınç ve eğilme dayanımı deneyleri için karışım oranları (1. Grup) (kg/m^3)	44
Tablo 11. Ring test ve pull out numuneler için karışım oranları (2. Grup) (kg).....	45
Tablo 12. Doğal agregaların ve GDGA'ların fiziksel özellikleri	55
Tablo 13. Karışımların aderans dayanımları.....	64
Tablo 14. Karışımların çatlama yaşı, çatlama anındaki gerinim ve beton ringteki ortalama maksimum gerilmeleri	69
Tablo 15. 3, 7 ve 28 günlük gerinim değerleri.....	76

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Geopolimerin analog yapısı	6
Şekil 2. Sürdürülebilir inşaatta geopolimer betonun kullanışlılığının şeması.....	9
Şekil 3. (a) Küresel Değişim Enstitüsünde kullanılan prefabrik geopolimer beton kiriş (b) Avustralya'da Küresel Değişim Enstitüsü (c) Prefabrik istinat duvarı, (e) Prefabrik köprü tabliyesi, (f) Prefabrik tekne rampası ve (g) 1989 yılında Rusya Federasyonu'nun Lieptsk kentinde geopolimer ile yapılan ilk konut binası	10
Şekil 4. Değişken GDA içeriğine sahip GDA ile üretilen beton karışımlarının basınç dayanımı değerleri ile doğal agrega karışımları arasındaki ilişki	14
Şekil 5. Kullanılmış agregaların görüntüleri	27
Şekil 6. $d_{maks} = 8\text{mm}$ olan agrega granülometri eğrisi.....	28
Şekil 7. $d_{maks} = 12,5\text{ mm}$ olan agrega granülometri eğrisi.....	29
Şekil 8. Tane sınıflarına ayrılmış GDGA'ların görüntüsü	29
Şekil 9. Çeneli kırıcı.....	31
Şekil 10. Elekler	31
Şekil 11. Laboratuvar tipi mikser	32
Şekil 12. 50x50x50 mm'lik metal küp kalıplar	32
Şekil 13. 40x40x160 mm'lik metal prizmatik kalıplar.....	33
Şekil 14. 25x25x285 mm'lik metal ucunda vidalı prizmatik kalıplar (ASR deneyler için).....	33
Şekil 15. 100x200 mm'lik silindirik kalıplar	33
Şekil 16. Ring kalıpların görüntüsü.....	34
Şekil 17. Etüv görüntüsü	34
Şekil 18. Yüksek sıcaklık fırını.	35
Şekil 19. Basınç dayanımı test cihazı.....	35
Şekil 20. Eğilme dayanımı test cihazı	36
Şekil 21. Aderans dayanımı testi için kullanılan donatı çekme deneyi test cihazı.....	36
Şekil 22. Dijital komparatör	37
Şekil 23. Su banyosu	37
Şekil 24. Beton büyük mikser (betonyer).....	38
Şekil 25. Veri toplama sistemi kurulumu.....	38
Şekil 26. UPV cihazı	39
Şekil 27. PL-60-11-3LJC-F strain gauge görüntüsü	40
Şekil 28. PFL-30-11-5L strain gauge görüntüsü	40
Şekil 29. GDGA üretim prosedürü.....	41

Şekil 30. ASR deneyi için harç çubuğu numuneleri ve dijital komparatör ile ölçümü	43
Şekil 31. Bir beton ringde çatlağın başladığını gösteren ölçümler	47
Şekil 32. Ring kalıp boyutları	47
Şekil 33. Ring test sistem görüntüsü	47
Şekil 34. 50x50x50 mm boyutlarda basınç dayanımı için üretilen numuneler	48
Şekil 35. 40x40x160 mm boyutlarda eğilme dayanımı için üretilen numuneler	49
Şekil 36. (a) Pull out numuneleri için hazırlanmış donatılar (b) Üretilmiş pull out testi numuneleri ve (c) Pull out testi düzeneği	50
Şekil 37. DASYLAB programı ile alınan verilerin bilgisayar ortamında görünümü	51
Şekil 38. a) Numunelerin suda kaynatılması b) Numunelerin sudaki ağırlığının belirlenmesi	53
Şekil 40. Yüksek sıcaklık fırınının sıcaklık- zaman grafiği	54
Şekil 40. 14 günlük harç çubuklarının genişmesi	56
Şekil 41. 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları	58
Şekil 42. GDGA'lı karışımların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının kontrol karışımına göre azalma oranı	59
Şekil 43. CEM I karışımlarının zamanla basınç dayanımının artışı	60
Şekil 44. CEM II karışımlarının zamanla basınç dayanımının artışı	60
Şekil 45. Eğilme dayanımının test sonuçları	63
Şekil 46. Karışımların aderans dayanımları	65
Şekil 47. Pull out test numunelerinin kırılma şekilleri	66
Şekil 48. Pull out test numuneler kırılma şekilleri	67
Şekil 49. R-CI, C-RGA-CI, F-RGA-CI ve F+C-RGA-CI karışımlarının kısıtlanmış rötre değerleri ve çatlama zamanları	70
Şekil 50. R-CII ve C-RGA-CII karışımlarının kısıtlanmış rötre değerleri ve çatlama zamanları	71
Şekil 51. R-CI ve R-CII karışımlarının kısıtlanmış rötre değerleri ve çatlama zamanları	72
Şekil 52. C-RGA-CI ve C-RGA-CII karışımlarının kısıtlanmış rötre değerleri ve çatlama zamanları	72
Şekil 53. R-CI karışımın çatlak şekilleri	73
Şekil 54. C-RGA-CI karışımın çatlak şekilleri	73
Şekil 55. F-RGA-CI karışımın çatlak şekilleri	74
Şekil 56. F+C-RGA-CI karışımın çatlak şekilleri	74
Şekil 57. R-CII karışımları çatlak şekli	74
Şekil 58. C-RGA-CII karışımları çatlak şekli	74
Şekil 59. Karışımların 72 günlük boy değişimleri	76

Şekil 60. Karışımların 160 günlük boy değişimleri	77
Şekil 61. Karışımların 24 saat suda bekletme sonrası ve kaynatıldıktan sonrası için su emme oranları.....	79
Şekil 62. Karışımların kuru yığın (ρ_{dr}) doygun kuru yüzey (ρ_{sd}) ve görünür yoğunlukları (ρ_a)	80
Şekil 63. Beton karışımlarının geçirimli boşluk hacmi	80
Şekil 64. Numuneler yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan önce ve sonra görüntüleri; a) Normal sıcaklık durumu b) 300°C'den sonra c) 600°C'den sonra d) 300°C'den sonra çatlak deseni e) 600°C'den sonra çatlak deseni.	81
Şekil 65. Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası basınç dayanımları	82
Şekil 66. Normal sıcaklık, 300°C ve 600°C sıcaklıklara maruz kalan beton karışımlarının yüksek sıcaklıktan sonrası/öncesi basınç dayanımının oranları.	83
Şekil 67. Karışımların normal sıcaklıkta ve yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra ultrasonik darbe hızı değerleri.	85
Şekil 68. Karışımların yüksek sıcaklık sonrası/öncesi ultrasonik darbe hızının oranları.....	86
Şekil 69. 300 ve 600 °C sonrası tüm numunelerin ağırlık kayıpları	87

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

AAM	: Alkali ile Aktive Edilmiş Malzemeler
AB	: Avrupa Birliği
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
ASR	: Alkali Silika Reaksiyonu
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
BM	: Birleşmiş Milletler
Ca(OH)₂	: Kalsiyum Hidroksit
CaO	: Kalsiyum Oksit
CEM I	: CEM I Çimento Tipi
CEM II	: CEM II Çimento Tipi
EDS	: Enerji Dağılımlı Spektroskopi
GDA	: Geri Dönüştürülmüş Agregat
GDGA	: Geri Dönüştürülmüş Geopolimer Agregat
Na₂O	: Sodyum Oksit
Na₂SiO₃	: Sodyum Silikat
NaOH	: Sodyum Hidroksit
PÇ	: Portland Çimentosu
R-CI	: Doğal agregat ve CEM I çimento ile yapılan kontrol karışım
RGA	: Recycled Geopolymer Aggregate (Geri Dönüştürülmüş Geopolimer Agregat)
RGA-CI	: Geri Dönüştürülmüş Geopolimer Agregat ve CEM I çimento ile yapılan karışım
RGA-CII	: Geri Dönüştürülmüş Geopolimer Agregat ve CEM II çimento ile yapılan karışım
SAK	: Süper Akışkanlaştırıcı Katkı
TS	: Türk Standardı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
UPV	: Ultrasonik Darbe Hızı

GİRİŞ

Günümüzde çevre kirliliği ve fosil enerji kaynaklarının tükenmesi insanlığın en büyük endişelerinden biridir. Nüfusun artması ve aşırı kentleşme, konut ve altyapı ihtiyaçlarını artırmıştır. Bunun sonucunda yapıların inşasında kullanılan malzemelere olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Çimento, dünyada çok üretilen ve sudan sonra en çok kullanılan ikinci malzemedir. Çevremizdeki yapıların önemli bir kısmı, beton yapılardan oluşmaktadır. BM Çevre et al. raporlara göre, son 65 yılda üretilen çimento miktarı yaklaşık 34 kat artarken, dünya nüfusu 3 kattan daha az artmıştır (Environment et al., 2018).. 2020 yılında üretilen toplam çimento kütlesi 4,17 milyar ton olmuştur. Bu miktar, insanların gıda tüketiminden daha yüksek olan kişi başına yaklaşık 626 kg'a eşdeğerdir (Environment et al., 2018). Geleneksel Portland çimentosunun büyük ölçekli üretiminin, önemli miktarda sera gazı salınımı açısından çevrede ciddi kirliliğe neden olduğu bilinmektedir (Gupta et al., 2021; Youn et al., 2019). Uluslararası Enerji Ajansı tarafından yapılan tahminlerde, tek başına normal Portland çimentosu (PÇ) üretimi toplam CO₂ emisyonlarının yaklaşık %6-7'sinden sorumludur (Hwang et al., 2020). Beton üretimi sırasında açığa çıkan CO₂, hem kireçtaşı kalsinasyon işlemi için yakıtın yanmasından hem de kireçtaşının (kalsiyum karbonat) kalsiyum oksit ve karbondioksit ayrılmasından kaynaklanır. Aslında tüm sera gazları arasında küresel ısınmanın yaklaşık %65'i CO₂ emisyonuna atfedilmektedir. Önümüzdeki 100 yıl içinde dünyanın ortalama sıcaklığının yaklaşık 1,4°C–5,8°C artabileceği tahmin edilmiştir (Rehan & Nehdi, 2005). Küresel olarak, CO₂ emisyonlarının aracılık ettiği iklim değişikliğinin mevcut zemininde, deniz seviyesinin yükselmesi ve ardından doğal afetlerin meydana gelmesiyle büyük ekonomik kayıpların olacağı ifade edilmektedir. Bunun ötesinde, çimento üretim endüstrilerinden yayılan CO₂, SO₃ ve NO_x gibi sera gazları asit yağmurlarına neden olarak toprak verimliliğine zarar vermektedir. Genel olarak, her bir ton PÇ üretimi için yaklaşık hammaddelerin endüstriyel tüketimi 1,5 tondur. Bu tür sorunların üstesinden gelmek için bilim adamları, mühendisler ve endüstriyel personeller, alternatif bağlayıcılar elde etmek ve yeni inşaat malzemeleri geliştirmek için sürekli olarak çaba sarf etmektedirler (Huseien et al., 2022) .

Öte yandan, çimento esaslı malzemelerin yanı sıra agregalarda (kum, çakıl, kırmataş vb.) betonun miktar olarak çok kullanılan temel bileşenleridir. Agregalar, uzun yıllar boyunca, çok çeşitli agrega kaynaklarından temin edilmiştir. Bu temin şekilleriyle nispeten düşük fiyat ve diğer nedenlerle, çok sayıda toprak kaymasına, nehir taşkınlarına ve diğer ciddi çevre sorunlarına neden olmaktadır (Xu et al., 2021). Ayrıca, çok sayıda binanın sürekli inşa

edilmesiyle, eski binaların yenilenmesi ve onarılması artmakta, bu da büyük miktarda inşaat atığının çevreye kolayca salınmasına ve çevreye onarılamaz zararlar vermesine neden olmaktadır. Özellikle deprem gibi afetlerden sonra, binaların yıkılması nedeniyle bir anda milyarlarca ton inşaat atığı oluştuğundan, deprem sonrasında bu atıkların yönetimi ve güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi, deprem bölgelerde hükümetlerin karşılaştığı en ciddi sorunlardan biridir. Zaman içinde dünya çapında birçok yıkıcı deprem meydana gelmiş ve milyarlarca ton atık üretilmiştir. Eylül 1999'da Tayvan'da meydana gelen Chi-Chi depreminden sonra 20 milyon m³'ten fazla atık oluşmuştur (Yang, 2009). 1999 Kosova depreminde 10 milyon ton, 1999 Marmara depreminde 13 milyon ton ve 2010 Haiti depreminde yaklaşık 23 milyon ton atık oluşmuştur (Domingo & Luo, 2017). 24 Ocak 2020'de Türkiye'de meydana gelen 6,8 büyüklüğündeki Elazığ-Sivrice depremi milyonlarca ton enkaz oluşturmuştur (Ulucan & Alyamac, 2022). Sadece birkaç ay önce, 6 Şubat 2023'te Türkiye'nin Kahramanmaraş ilinde 7,8 ve 7,6 büyüklüğünde meydana gelen iki deprem binlerce insanın ölümüne sebep olmuş ve geride milyonlarca ton inşaat atık ve yıkıntı ortaya çıkarmıştır (World Health Organization, 2023). Bu depremde Çevre Mühendisleri Odası'nın raporuna göre en iyimser tahminle 104 milyon ton inşaat ve yıkım atığı oluşmuştur. Tüm depremlerin ortak noktası olan milyarlarca ton atık düşünüldüğünde bu atıkların geri dönüşümü ve yeniden kullanımı oldukça önem kazanmaktadır.

Son yıllarda, geopolimer bağlayıcılar, Portland çimentosuna çevre dostu alternatif bir malzeme olarak ortaya çıkmıştır. İlk olarak 1970'lerde Joseph Davidovits tarafından önerilen geopolimerler, Portland çimentosunun en umut verici alternatifi olarak tanımlanmıştır (Davidovits, 1991). Bunun nedeni, Portland çimentosuyla karşılaştırıldığında, geopolimerin üretim sürecinin daha düşük enerji tüketimine ve CO₂ emisyonlarına sahip olmasıdır (Zhu et al., 2020). Geopolimerler, uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu gibi silika ve alümina açısından zengin hammaddelerin potasyum hidroksit (KOH), sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na₂SiO₄) gibi güçlü alkali çözeltilerle birleştirilmesi sonucu üç boyutlu ağ yapısının oluşmasıyla elde edilir. Mevcut literatürde, geopolimer betonun mekanik özellikleri, dayanıklılığı ve mikro yapısı geniş çapta araştırılmıştır. Geopolimer ürünlerin mükemmel mekanik özelliklere (Jindal, 2019) ve dayanıklılığa (daha yüksek asit direnci (Han et al., 2018), daha iyi yangın direncine (Lahoti et al., 2019) ve daha düşük büzölmeye (Ling et al., 2019) vb.) sahip olduğu rapor edilmiştir (Zhu et al., 2020).

Ayrıca doğal agrega kaynaklarının aşırı tüketimini önlemek ve sürdürülebilir kalkınma kültürünü teşvik etmek için araştırmacıların gündemine alınan yollardan biri de beton atıkların geri dönüşümüdür. Bu yöntem, atık deposunun alanını genişletme ihtiyacının artmasını

engellediği gibi, doğaya geri dönüşü olmayan malzemelerin aşırı tüketimini de engellemektedir. Çevre dostu malzemeler olan geri dönüştürülmüş ince veya iri agregalar, enerji, kaynak ve üretim maliyetlerinden büyük ölçüde tasarruf sağlayabilir ve sürdürülebilir kalkınmanın ihtiyaçlarını tam olarak karşılayabilir.

Bu alanda bugüne kadar normal beton atıklarının geri dönüştürülmesi ve yeni beton üretiminde agrega şeklinde yeniden kullanılması alanında birçok çalışma yapılmıştır. Normal beton atıklarından geri kazanılmış agreganın (GDA) geopolimer beton üretiminde kullanımına ilişkin çalışmalar da bulunmaktadır. Ancak geopolimer beton atıklarının geri dönüşümünü (GDGA) daha çok az dikkat çekmiş ve bu alanda yeterli araştırma bulunmamaktadır. Halihazırda geopolimer beton atıklarına henüz inşaat alanında yaygın olarak kullanılmadığı için rastlanmaması doğal bir durum olarak düşünülmektedir. Ancak geopolimer beton, normal beton için sürdürülebilir bir alternatif malzeme olarak önerildiğinden, kullanım ömrü sonu etkisinin ve geri dönüştürülebilirliğinin araştırılması önem arz etmektedir.

Araştırmanın Amacı

Portland çimentosu esaslı betonun çevre sorunları oluşturması, inşaat atıklarının artması, Portland çimentosuna sürdürülebilir bir alternatif olarak geopolimerlerin kullanımı, geri dönüşümün önemi ve yüksek dayanımlı betona olan talebin artması gibi önceki bölümde ifade edilen konular dikkate alınarak karar verilen bu tez çalışması; geopolimer betonun geri dönüştürülebilirliği alanındaki araştırma boşluğunu doldurmayı ve yüksek dayanımlı beton üretiminde geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların kullanımını araştırmayı amaçlamaktadır.

Bu kapsamda;

- Geopolimer beton atıklarından elde edilen geri dönüştürülmüş agregaların fiziksel özellikleri ve alkali-silika reaksiyonu incelenecektir.
- Yüksek dayanımlı beton üretiminde iri ve ince taneli doğal agregalar yerine ayrı ayrı ve birlikte GDGA kullanılmasının, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, aderans dayanımı, boy değişimi, kısıtlanmış rötre, yüksek sıcaklık direnci, ultrasonik darbe hız geçişi, su emme, kütle yoğunluk ve geçirgen boşluk hacmi üzerindeki etkisi araştırılacaktır.
- İnce taneli geopolimer agrega içeren karışımın ve iri taneli geopolimer agrega içeren karışımın performansı karşılaştırılacaktır.

- Sadece doğal agrega içeren karışım ve doğal ince agrega+iri taneli GDGA içeren karışımın hem CEM I çimento hem CEM II tip çimento ile yapılarak çimento içeriğinin etkisi incelenecektir.



KURAMSAL TEMELLER

Beton

En yaygın kullanılan insan yapımı yapı malzemesi olan beton, sudan sonra, dünyada en çok kullanılan malzemedir. Normal beton; su, çimento ve farklı granülasyonlara sahip agregaların belirli oranlarda birleşiminden yapılır. Elbette bazı durumlarda betonun özelliklerini değiştirmek için bileşiminde çeşitli katkı maddeleri de kullanılmaktadır. Betonun uygulama çeşitliliği, direnci ve makul maliyeti onu dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemesi haline getirmiştir. Dünya nüfusunun %70'inden fazlası beton yapılarda yaşamaktadır. 2020 yılında dünyada üretilen çimento miktarı 4,2 milyar ton ve üretilmiş beton hacmi ise 14 milyar m³ olmuştur (Global Cement and Concrete Association, 2020). Beton, yüksek dayanımı ve dayanıklılığı, bileşenlerinin dünyanın her yerinde bulunabilmesinin yanı sıra en yaygın kullanılan inşaat malzemelerinden biri olarak kabul edilmekle birlikte, sera gazı emisyonu ve kireçtaşı, agrega ve su gibi doğal kaynakların tüketiminde de önemli bir rol oynamaktadır. Bir ton Portland çimentosu üretmek için yaklaşık 1,5 ton hammadde gerekmektedir ve bu durumda üretim sırasında yaklaşık 1 ton karbondioksit çevreye salınmaktadır (Ammenberg et al., 2011). Öte yandan Portland çimentosunun gelişmesi ve üretiminin artması nedeniyle mevcut kalker kaynaklarının yalnız 59 yıl gibi kısa bir sürede daha çimento üretimi için yeterli olacağı ifade edilmiştir (Momeni, 2021).

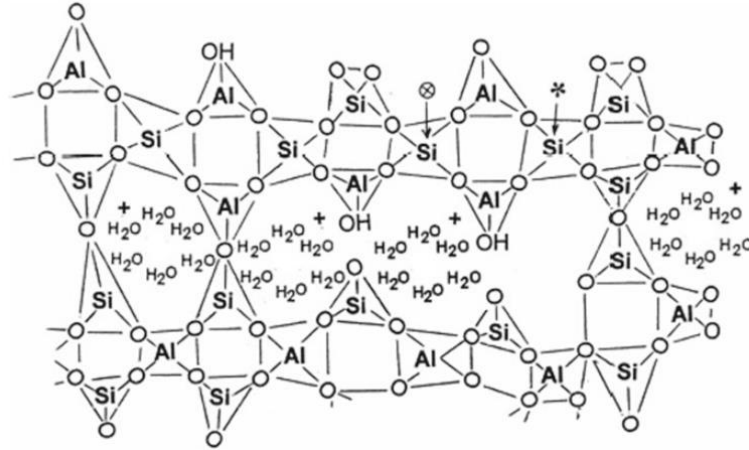
Bu nedenle sürdürülebilir kalkınma yolunda ilerlemek için ortaya çıkan sorunlara göre betonda Portland çimentosunun yerini alacak başka bir malzeme aranmalıdır. Çimento endüstrisinin neden olduğu küresel ısınmayı azaltmak için orta ve uzun vadeli stratejilerde, enerji tüketimi ve CO₂ emisyonlarını azaltma açısından uygun maliyetli teknolojilerin geliştirilmesi ve pazarda geliştirilmesi çok önemli olacaktır.

Geopolimer Beton

Son yıllarda, bilim adamları tarafından Portland çimentosuna iyi ve sürdürülebilir bir alternatif malzeme olarak geopolimerler önerilmiştir.

Geopolimer kavramı ilk olarak 1970'lerde Joseph Davidovits tarafından geliştirilmiştir. Geopolimerler, çapraz bağlı [AlO₄] ve [SiO₄] tetrahedral birimlerden ve alkali metal katyonlarından oluşan üç boyutlu ağ yapısına sahip inorganik polimerik malzemelerdir. 40 yılı aşkın bir süredir, özellikle son 20 yılda, geopolimer, üstün performans özelliklerine sahip yeni bir inorganik metalik olmayan malzeme türü olarak, malzeme bilimcilerinin ve araştırmacıların giderek daha fazla ilgisini çekmiştir.

Alkali ile aktive olan bir tür çimentolu malzeme olan geopolimer, belirli koşullar altında kürlenmektedir. Geopolimerlerin dayanımı, organik polimere (yani organik polimer malzemelere) çok benzeyen $-Si-O-$ ve $-Al-O-$ birimlerinin polimerizasyonundan elde edilir ve geopolimerler tipik olarak amorf veya kısmen kristalleşir. Geopolimerlerde $[AlO_4]$ ve $[SiO_4]$ tetrahedral birimler oksijen atomlarını paylaşarak birbirleriyle çapraz bağlanır. Li^+ , Na^+ , K^+ ve/veya Cs^+ gibi katyonlar, negatif yüklü $[AlO_4]$ birimleri ve geopolimerin yapısı Şekil 1'de gösterilmektedir (Jia et al., 2020).



Şekil 1. Geopolimerin analog yapısı (Davidovits, 2011)

Geopolimer beton, silika ve alümina içeriği yüksek tarımsal ve endüstriyel yan ürünlerin açık bir şekilde bertaraf edilmesiyle elde edilen inorganik bir polimerdir. Geopolimer bağlayıcı, kaolinit ve bentonit gibi termal olarak aktifleştirilmiş doğal malzemeler veya uçucu kül, yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü, buğday samanı külü gibi endüstriyel yan ürünler tarafından sağlanan silika ve alümina ve alkali aktive edici çözeltilerin kombinasyonudur. Sertleştirilmiş bir bağlayıcı oluşturmak için bu malzemeleri moleküler zincirlere ve ağlara polimerize eder. Genel olarak, geopolimer betona genellikle alkali ile aktive edilmiş malzemeler (AAM'ler) denir, ancak her iki sistemin de kimyasal yapısı farklıdır. AAM'deki aktivasyon, kararsız monomerler oluşturan uzun vadeli bir süreç değildir, geopolimerizasyon ise 3 boyutlu kararlı bir polimer yapısı oluşturur. AAM'ler yüksek mukavemete sahiptir ancak geopolimere kıyasla zayıf bir dayanıklılığa sahiptir (Imtiaz et al., 2020).

Kullanılan aluminosilikat kaynağı ve aktivatörlerin türüne bağlı olarak, geleneksel Portland çimentolu betona alternatif olarak geopolimer betonun kullanılması, %80'e varan bir CO_2 azalmasıyla sonuçlanmaktadır (Tayeh et al., 2021).

Geopolimerlerin üretiminde kullanılan aluminosilikatların en yaygın kaynakları metakaolin, volkanik küller, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, maden atıkları, kırmızı çamur gibi diğer endüstrilerden elde edilen yan ürünlerdir. Doğal ve yan ürün formlarında, alümina (Al_2O_3)

ve silis (SiO_2) içeriği bakımından zengin olması, tercihen reaktif amorf formda olması gerekmektedir (Castillo et al., 2021).

Alkali aktivatörler, alüminosilikatın silika ve alümina içeriklerini serbest bırakmak için gereken geopolimer betonun ikinci önemli bileşenidir. En yaygın kullanılan alkali aktivatörler sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksittir (NaOH); ancak potasyum hidroksit ve potasyum silikat gibi herhangi bir hidroksit veya silikat kaynağı aktivatör olarak kullanılabilir. Geopolimerizasyon işlemi, sadece hidroksit kullanımına kıyasla alkali sıvı hidroksitlere ek olarak çözünür silikatlar içeriyorsa yüksek oranda gerçekleşir (Imtiaz et al., 2020).

Aktivatör kaynağı ekleme yöntemine bağlı olarak, geopolimer betonun karışım tasarımı tek parçalı veya iki parçalı olabilir. "Sadece su ekle" olarak da bilinen tek parçalı geopolimer betonda, sıvı aktivatörler yerine katı aktivatörler kullanarak alüminosilikatları ile agrega karıştırılarak ardından su eklenmesiyle oluşturulan bir yöntemdir. Geleneksel geopolimer betonun karışım yöntemi olarak da adlandırılan iki parçalı geopolimer betonun karışımında aktivatörler, katı bir alüminosilikat öncüsü içinde su ile sıvı olarak eklenir (Imtiaz et al., 2020).

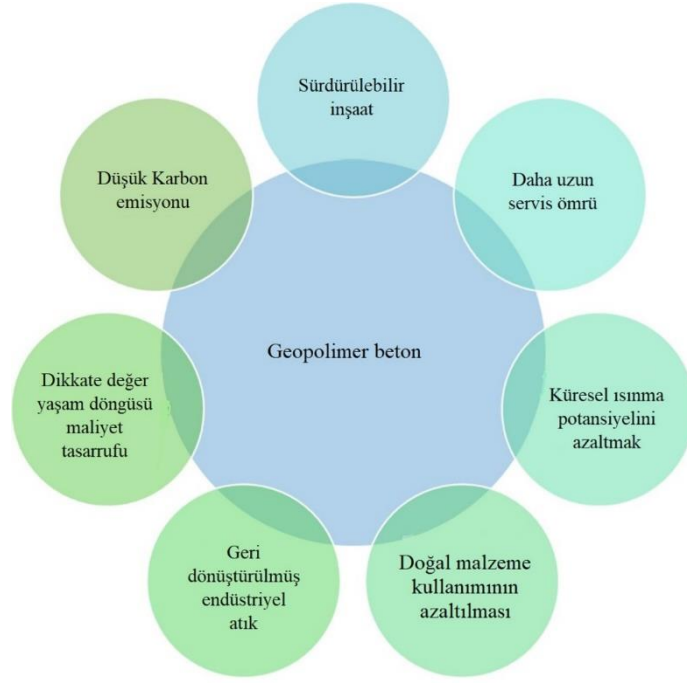
Mevcut yaygın uygulama, geopolimerizasyon kimyasal reaksiyonlarını makul bir dayanım gelişimi oranı elde etmek üzere hızlandırmak için geopolimer betonun yüksek sıcaklıklarda kürlenmesini gerektirir (Rangan, 2009). Isıl işlemin süresi ve sıcaklığı ve kalıplama ile termal kürleme arasındaki gecikme süresi dahil olmak üzere termal kürleme parametrelerini optimize etmek için literatürde birçok girişimde bulunulmuştur. Literatürde sunulan sonuçlar, minimum 24 saat için $60\text{--}80^\circ\text{C}$ 'lik bir optimum kürleme sıcaklığı önermektedir; maksimum mukavemet 2 günden fazla kürleme sürelerinde elde edilmiştir. (Mesgari et al., 2020; Noushini & Castel, 2016; Pangdaeng et al., 2014).

Son on yılda, geopolimer betonun özelliklerini değerlendirmek, karışım tasarımını ve kürleme sürecini optimize etmek ve ayrıca geopolimer üretimi için yönergeler ve standartlar geliştirmek için çok sayıda araştırma yapılmıştır (Abdulkareem et al., 2014; Chithambaram et al., 2019; Imtiaz et al., 2020; Lahoti et al., 2019; Mesgari et al., 2020).

Kürleme gereklilikleri ve vasıfsız işçilerin alkalın aktivatörlere maruz kalmasıyla ilgili güvenlik endişeleri nedeniyle, geopolimer beton uygulaması şu anda esas olarak şantiye dışı prefabrik ve modüler inşaatla sınırlıdır (Mesgari et al., 2020). Bununla birlikte, son zamanlarda, geopolimer betonda ısıl kürleme ihtiyacını ortadan kaldırmak için farklı yaklaşımları araştırılarak önemli çaba sarf edilmiştir ve ümit verici sonuçlar bildirilmiştir (Allahverdi et al., 2011; Chindaprasirt et al., 2007).

Geopolimer betonun mekanik özellikleri, dayanıklılığı ve mikro yapısı mevcut literatürde geniş çapta araştırılmıştır. Geopolimer betonun basınç dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülünün PÇ beton ile karşılaştırılabilir veya onlardan daha yüksek olduğu bulunmuştur; ancak elastisite modülünün belirli beton karışım tasarımına oldukça duyarlı olduğu bildirilmiştir (Akbarnezhad et al., 2015; Rangan, 2009; Sofi et al., 2007). Isı ile kürlen geopolymerlerin sünmesi PÇ betondan daha düşük olduğu bulunmuştur (Castel et al., 2016). Isı ile kürlen geopolymer betonun ayrıca tipik PÇ betonlara göre çok daha düşük kuruma büzülmesi yaşadığı bulunmuştur. Geopolimer betonun ayrıca sülfat ve deniz suyu direnci, asit direnci ve yangın direnci açısından PÇ betondan daha iyi performans gösterdiği bildirilmiştir. Ayrıca, Castel ve ark. çelik takviye çubukları ve geopolimer beton arasındaki aderans kuvvetinin, benzer basınç mukavemeti için PÇ betondan önemli ölçüde daha iyi olduğunu göstermiştir. Mo et al. geopolimer betonu kullanılan betonarme elemanların genel davranışı ve kırılma modu, geleneksel betonarme esaslı beton elemanlarınkilere benzer olduğunu ve geopolimer beton kullanan yapısal elemanları tasarlamak için mevcut uygulama kurallarından kullanılabilir olduğunu belirtmiştir (Maranan et al., 2016; Mo et al., 2016; Sumajouw et al., 2005).

Geopolimerlerin yaşam döngüsü üzerinde yapılan değerlendirmeler, küresel ısınma etkisi ve ötrofikasyon potansiyeli açısından geopolimer betonun PÇ betondan daha iyi olduğunu göstermiştir (Almutairi et al., 2021). Çeşitli inşaat uygulamaları için geopolimer beton kullanmanın avantajları Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Sürdürülebilir inşaatta geopolimer betonun kullanışlılığının şeması (Hassan et al., 2019)

Geopolimer betonun kullanımı, çevresel faydaları, mekanik özellikleri ve iyi dayanıklılığı nedeniyle inşaatla giderek daha popüler hale gelmektedir. Şu anda, geopolimerik beton ve harç aşağıdaki sektörlerde pratik olarak kullanılmaktadır:

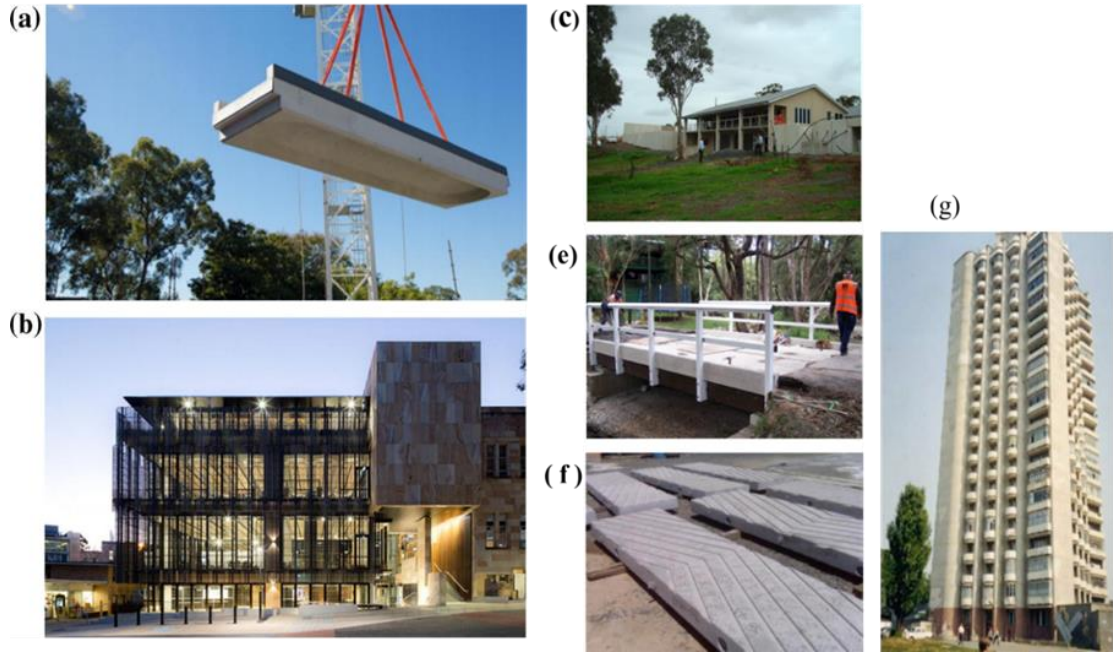
- Kanalizasyon boruları
- Demiryolu traversleri
- Mezarlık mahzenleri
- Duvar panelleri
- Yol kaplamaları
- Tekne rampası
- İstinat duvarı
- Prefabrike beton elemanlar (Aldred & Day, 2012)

Geopolimer beton ile yapılan apartmanlar, prefabrik istinat duvarları, prefabrik köprü tabliyeleri, tekne rampaları gibi yapılar da bulunmaktadır. Geopolimer beton (AAM), 1960'larda Ukrayna'nın Mariupol kentinde 9 katlı iki bina inşasında kullanılmıştır. 50 yılı aşkın bir süre sonra, bu binalar hala ayakta kalmaktadır (Almutairi et al., 2021; Xu et al., 2008).

Rusya Federasyonu'nun Lipetsk şehrinde Portland çimentosu içermeyen alkali aktive edilmiş betondan yapılan 20 katlı ilk konut binası 1989 yılında inşa edilmiştir (Almutairi et al., 2021).

Benzer şekilde Avustralya'da Brisbane Westwell Havaalanı geopolimer betondan inşa edilmiştir. İlgili projede zemin ve kaplama panelleri için yaklaşık 70.000 ton geopolimer beton kullanıldığı belirtilmiştir (Parathi et al., 2021). 2013 yılında prefabrik geopolimer beton döşeme kirişleri, Queensland Üniversitesi Küresel Değişim Enstitüsü'nün inşasında yapısal döşeme elemanları olarak kullanılmıştır (Şekil 3) (Aldred & Day, 2012; Mo et al., 2016).

Geopolimer betonun gelecek vadeden özelliklerinin yanı sıra PÇ betona kıyasla, nispeten düşük karbon tutulması, yan ürünlerin kullanımı ve doğal kaynaklara olan talebin azalması ile karakterize edilen yukarı akış (hammadde girdisi) sürdürülebilirlik avantajlarının, beton endüstrisi ve diğer sektörler tarafından yapı malzemeleri olarak daha fazla benimsenmesini teşvik etmesi beklenmektedir. Bununla birlikte, PÇ betona kıyasla geopolimer betonun gelişmiş sürdürülebilirliğini doğrulamak için, hem yukarı (üretimi için hammadde girdisi) hem de aşağı (ömür sonu çıktıları) etkileri dikkate alan genel bir yaşam döngüsü değerlendirmesi gerekmektedir. Bu alanda Mesgari et al. ve Akbarnezhad et al. tarafından yapılan çalışmalarda geopolimer betonun yüksek oranda geri dönüştürülebilir olduğundan bahsedilmiştir. Ancak geopolimer beton atığının daha fazla değerlendirilmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır ve farklı açılardan çalışılmalıdır. Geleneksel betonun çıktı etkisi, bir sonraki bölümde tartışılan beton yapıların yaşam döngüsünün sonunda üretilen büyük miktarda beton atığıyla ilgilidir.



Şekil 3. (a) Küresel Değişim Enstitüsünde kullanılan prefabrik geopolimer beton kiriş (b) Avustralya'da Küresel Değişim Enstitüsü (c) Prefabrik istinat duvarı, (e) Prefabrik köprü tabliyesi, (f) Prefabrik tekne rampası ve (g) 1989 yılında Rusya Federasyonu'nun Lieptsk kentinde geopolimer ile yapılan ilk konut binası

İnşaat Atıkları ve Geri Dönüşüm

İnşaat ve yıkım atıkları hem konut, bina, yol, köprü ve benzeri altyapı ve üst yapıların inşası sırasında hem yapıların deprem, yangın gibi afetler nedeniyle tahrip olması veya eski binaların onarım, tadilat, yenileme veya yıkım işlemleri sonucunda oluşmaktadır. İnşaat ve yıkım atıkları genellikle beton, ahşap, asfalt, alçıtaşı, metaller, tuğlalar, cam, plastikler ve toprak ve kayalar gibi büyük hacimli ve ağır malzemelerden oluşmaktadır (Wang et al., 2021). Bu tür atığın dünya çapında üretilen toplam katı atığın %30-40'ını oluşturduğu tahmin edilmekte ve küresel üretim yaklaşık 4,5 milyar ton/yıl olmaktadır. Örneğin, sırasıyla Avrupa Birliği, ABD ve Çin her yıl 924 mil, 600 mil ve 2,36 milyar ton inşaat ve yıkım atıkları üretiminden sorumludur. Bu atıkları yeniden kullanma çabalarına rağmen, yaklaşık %35'i düzenli depolama alanlarında bertaraf edilmektedir (Wang et al., 2021). Eurostat, Türkiye'de 2020 yılındaki inşaat ve yıkım atıklarını 107.6 milyon ton olarak bildirmiştir (Eurostat, 2020).

Atık boşaltma alanı az olan büyük şehirlerin çevresinde, nakliye maliyetini azaltmak ve doğal agregalar gibi mevcut yenilenemeyen doğal kaynakların tüketimini azaltmak için geri dönüşüm bir zorunluluk haline gelmiştir. Malzemelerin geri dönüşümü çok eski bir kavramdır, çünkü Romalılar yıkılan heykel malzemelerini yenilerini inşa etmek için yeniden kullanırlardı. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra yıkılan binalardan malzemelerin geri dönüşümü alternatif bir ekonomik çözüm haline gelmiştir. Daha sürdürülebilir bir dünya için, inşaat sektörü şirketleri atık sürdürülebilirliği iş stratejilerine dahil etmektedir. Geri dönüşüm, sürdürülebilir bir inşaat sektörüne ulaşmak için çevre yönetim araçlarından biridir (Kenai, 2018).

Olumsuz çevresel ve ekonomik etkilerini azaltmak için inşaat ve yıkım atıklarının geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanılması konusunda hükümetler, akademik ve endüstriyel kuruluşlar tarafından kapsamlı önlemler almıştır. Örneğin, AB, 2008 yılında, tehlikesiz inşaat ve yıkım atıkları yüzdesinin 2020 yılına kadar ağırlıkça %70 oranında azaltılması hedefini belirlemiştir (Wang et al., 2021).

Ayrıca, çevresel baskılar nedeniyle, yerel mevzuatlarla atık vergileri uygulanmaktadır. Bunun bir sonucu olarak çoğu ülkede geri dönüşüm zorunlu hale gelmektedir. Gelişmiş ülkelerin çoğu, ekonomik ve çevresel nedenlerle inşaat malzemeleri atıklarının yeniden kullanılmasını ve geri dönüştürülmesini zorunlu kılan yasalar çıkarmıştır. Atık betonu agrega haline getirmek için Avrupa'nın her yerinde kurulu olan sabit ve mobil kırma tesislerine gönderilmesi zorunlu hale getirilmiştir (Kenai, 2018). Geleneksel olarak, inşaat ve yıkım atıkları geri dönüştürülebilir ve bahçe kaldırımı, gabyonlar, kilit taşı vb. sokak kaplama malzemelerinde yeniden kullanılabilir.

Geri Dönüştürülmüş Beton Agregası

Katı atıkların önemli bir bölümünü yapısal inşaat atıkları meydana getirmektedir. Yapısal inşaat atıklarının büyük bir kısmı ise beton atıklarından oluşmaktadır. Beton, toplam inşaat ve yıkım atıklarının %40'ını oluşturmaktadır (Oikonomou, 2005). ABD’de inşaat ve yıkıntı atığı kapsamında toplanan atık malzemelerin %70’i beton, %15’i yol betonu, %7’sini ahşap ürünler oluşturmaktadır (EPA 2015). Huang et al., (2002) Hong Kong'daki inşaat ve yıkıntı atıklarının yaklaşık %50'sinin beton atıklarından oluştuğunu belirtmiştir. Ahmad et al. çalışmasında Kanada'daki inşaat ve yıkım atıklarının %52'sinin (ağırlıkça) beton olduğunu belirtmişlerdir. Yapım ve yıkım atıkları arasında en fazla yüzdeye sahip olan beton atıkları, geri dönüştürülme konusunda önceliğe sahiptir.

Farklı ülkelerdeki kuruluşlar, GDA için bir tanım içeren standartlar geliştirmiştir. Örneğin İngiltere’de BS 8500 sınıflamasına göre inşaat ve yıkım molozlarının kırılmasından elde edilen geri kazanılmış agregaları iki gruba ayrılmaktadır (BS EN 206, 2020);

- Birinci grup, "RCA geri dönüştürülmüş beton agregaları" olarak bilinen, en az %95 beton atıklarından oluşan agregaları içermektedir.
- İkinci grup, "RC geri dönüştürülmüş agrega" olarak bilinen tamamen inşaat molozlarından (beton molozları, duvar parçaları, cam, tuğla vb. dahil) oluşur (BS EN 206, 2020). Ancak pratikte, geri dönüştürülmüş beton agregaları, diğer geri dönüştürülmüş agrega türlerine göre çok daha kaliteli olmaları nedeniyle beton üretiminde daha çok kullanılmaktadır (Aghili Lotf et al., 2020).

Portland çimentolu beton karışımından geri kazanılan agregaların (GDA), yeniden normal çimentolu beton karışımlarda kullanımına ilişkin çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Portland çimentosu esaslı yeni karışımlarda geopolimer beton karışımlarından geri dönüştürülmüş agregaların (GDGA) kullanımına ilişkin ise sınırlı araştırma bulunmaktadır. Bu araştırmada, öncelikle GDA'lı beton hakkında mevcut çalışmalar gözden geçirilerek, GDA'ların Portland çimentosu bazlı yeni betonların özellikleri ve performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Daha sonra bu bilgiler, geopolimer beton karışımından geri dönüştürülen agregaların Portland çimentosu bazlı betonların özellikleri ve performansı üzerindeki etkilerini yorumlamak ve karşılaştırmak için kullanılmıştır.

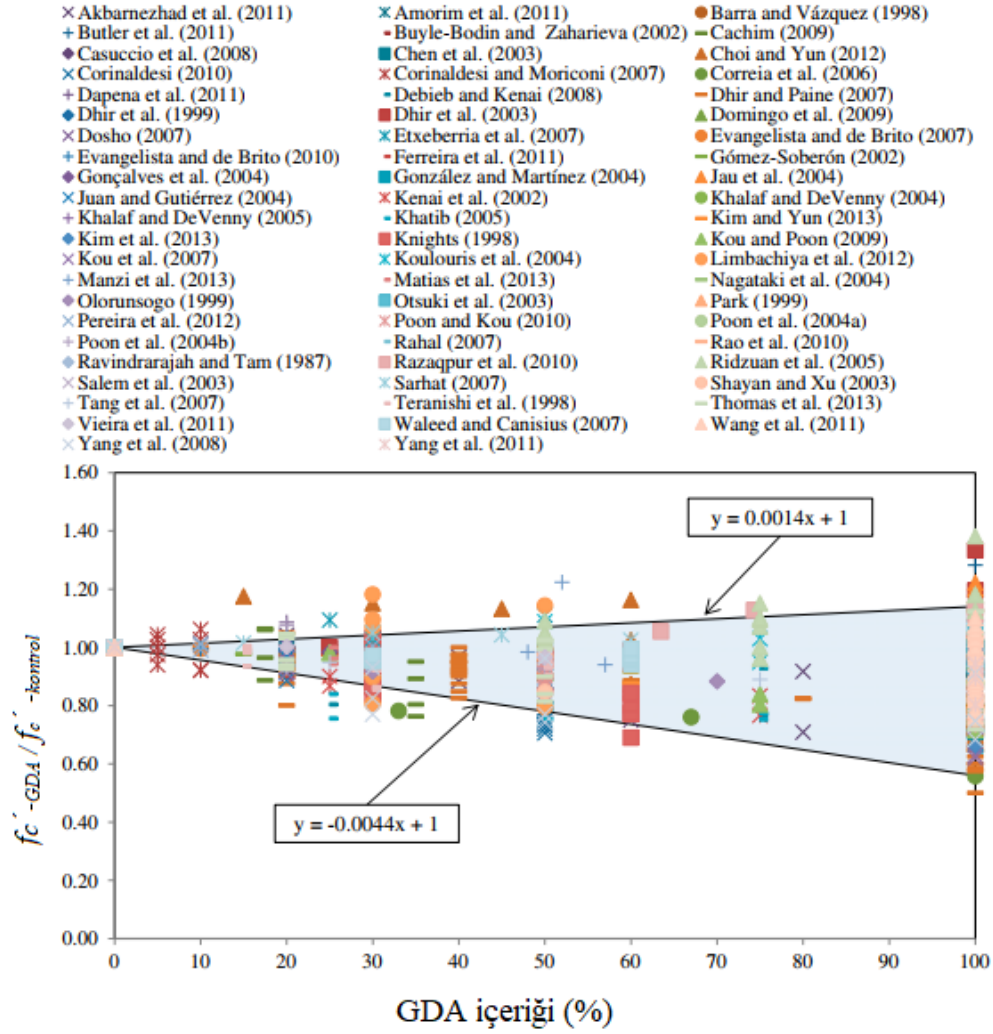
GDA ile Üretilen Betonun Özellikleri

Basınç dayanımı

GDA içeren betonun basınç dayanımı, GDA ikame seviyesi (Silva et al., 2014), su/çimento oranı (Ajdukiewicz & Kliszczewicz, 2002), GDA'nın nem içeriği, temel malzemelerin kalitesi ve kimyasal katkı maddelerinin etkisi gibi birçok parametreye bağlıdır (Beher et al., 2014; Sajedi & Jalilifar, 2019). Yapılan çalışmaların çoğu, betonda GDA'ların ikame miktarının artırılmasının basınç dayanımında bir azalmaya yol açacağı konusunda fikir birliğine varmıştır; ancak basınç dayanımındaki bu azalma, kullanılan geri dönüştürülmüş agregaların tipine, boyutuna ve kalitesine bağlıdır. Çoğu araştırmacılar, %30'a kadar geri dönüştürülmüş iri agregaların ve %20'ye kadar geri dönüştürülmüş ince agregaların değiştirilmesinin betonun basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olmayacağını, ancak ikame miktarının artmasıyla basınç dayanımının kademeli olarak azaldığını göstermiştir (Akbarnezhad et al., 2011; Etxeberria et al., 2007).

Kou ve Poon tarafından yürütülen çalışmalar, uçucu kül gibi alternatif malzemeler kullanılırsa, %50'ye varan ikamelerin de uygun kalitede geri dönüştürülmüş beton yapımına yol açabileceğini göstermiştir (Kou & Poon, 2013). Konin ve Kwadio'da yaptıkları çalışmada %60 ikamelerde normal betondan daha yüksek bir dayanım elde etmenin mümkün olduğunu göstermişlerdir (Konin & Kouadio, 2011). Manzi et al., %80'e varan ikamelerde gerekli tasarım dayanımını elde etmenin mümkün olduğunu belirtmişlerdir (Manzi et al., 2013).

Literatürde bulunan sonuçların farkı, Silva ve ark. tarafından bir inceleme makalesinde araştırılmış, çalışmalarının özeti Şekil 4'te gösterilmiştir. Burada farklı oranlarda GDA içeren karışımların 28 günlük basınç dayanımı oranı ile kontrol karışımları arasındaki ilişki, karşılık gelen değişken GDA yüzdesi ile çizilmiştir. Yazarlara göre, %95 güven aralığının üst ve alt limitlerinin analizi, %100 iri GDA içeriğine sahip GDA ile üretilen betonun, kontrolün 1,14 ile 0,56 katı arasında bir basınç dayanımı sergileme olasılığının %95 olduğunu göstermektedir (Silva et al., 2015).



Şekil 4. Değişken GDA içeriğine sahip GDA ile üretilen beton karışımlarının basınç dayanımı değerleri ile doğal agregra karışımları arasındaki ilişki (Silva et al., 2014).

Pedro et al. (2017), ince taneli GDA kullanımı durumunda basınç dayanımındaki düşüş, iri taneli GDA'dan fazla olduğu sonucuna varmıştır (Pedro et al., 2017). Doğal agregayla %100 yer değiştirme seviyesi için, basınç dayanımındaki azalma, iri ve ince taneli GDA için sırasıyla %5,4– %7,9 ve %9,9 – %15,3 aralığında olmuştur. Bu nedenle, ince taneli GDA'nın ikame seviyesinin sınırlandırılması tavsiye edilmiştir (Kenai, 2018; Poon et al., 2004; Tabsh & Abdelfatah, 2009).

Daha önceki çalışmalardan, geleneksel betondaki gibi su/çimento oranının artmasıyla dayanımda bir azalma olduğu için aynı eğilimi GDA ile üretilen betonun izlediği gözlemlenmiştir. Hansen et al. tarafından yapılan çalışmada, diğer faktörler temelde aynı olduğunda, GDA ile üretilen betonun basınç dayanımının büyük ölçüde orijinal betonun su/çimento oranı tarafından kontrol edildiğini bulunmuştur. Orijinal betonun su/çimento oranı, geri dönüştürülmüş agregalarla üretilen betonun su/çimento oranı ile aynı veya daha düşükse,

yeni dayanımlar orijinal dayanımlar kadar veya daha iyi olacağını ve bunun tersi de geçerli olduğunu belirtmiştir (Hansen, 1986; Hansen & Narud, 1983).

Ancak, Li et al. araştırmalarından, tüm ikame oranları için su/çimento oranındaki artışla birlikte basınç dayanımının azaldığını bildirmişlerdir (Li, 2004). Bunun aksine, bazı yazarlar GDA ile üretilen betonun basınç dayanımının bazen doğal agregalı betondan daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunun nedeni, GDA'nın betondan yüksek oranda su emmesi ile GDA ile üretilen betondaki etkili su/çimento oranının düşmesi ve bunun da dayanımın artmasına neden olması olabilmektedir (Beher et al., 2014).

Su/çimento oranının GDA içeren beton dayanımı üzerindeki etkisi, GDA'nın nem durumu ile doğrudan ilişkilidir, öyle ki, eğer GDA doygun-yüzey kuru formda kullanılırsa, su/çimento oranın GDA ile üretilen betonun dayanımına etkisi normal betona benzer olacaktır; yani su/çimento oranının artmasıyla GDA ile üretilen betonun dayanımı azalmaktadır. GDA'nın beton karışımında kuru olarak kullanılması halinde, karışımdaki su, geri dönüştürülen agregalar tarafından emilir ve efektif su/çimento oranını düşürmektedir. Bu nedenle su/çimento oranı yüksek olan karışımlarda, geri dönüşüm agregasının betondaki olumsuz etkisi, su/çimento oranını düşürerek telafi edilebilir ve hatta bazı durumlarda doğal agregadan daha yüksek dayanım sağlanmaktadır (Şekil 4). Su/çimento oranı düşük olan karışımlarda, kuru GDA'nın su emmesi betonun işlenebilirliğini düşürür ve dayanımın daha da düşmesine neden olmaktadır. Çünkü betonun düşük su/çimento oranındaki işlenebilirliği daha düşüktür ve GDA tarafından karışımın serbest suyunu emerek betonun işlenebilirliği daha da düşürür ve bu da betonun daha iyi yerleştirmemesine ve dayanımını düşmesine neden olur (Björnström & Chandra, 2003; Silva et al., 2015).

GDA ile betonun su emmesini engellemek ve literatürde yer alan efektif su/çimento oranını sabit tutmak için araştırmacılar iki karıştırma yöntemi kullanmışlardır.

1. Önceden ıslatma yöntemi (*pre-saturated method*): Hansen (1992), GDA'nın kuru yüzey doygun durumda kullanılması gerektiğini öne sürmüştür. Bu yöntem, GDA'nın karışıma işlenebilirlik sağlayan serbest suyu emmesini engeller. Literatürde çoğunlukla bu yöntem kullanılmaktadır.
2. Su telafisi yöntemi (*water compensation method*; Leite, 2001); Bu yöntem, serbest su içeriğini sabit tutmak amacıyla GDA tarafından emilen miktara karşılık gelen fazladan karışım suyunun eklenmesinden oluşur. Doğal olarak, ilave su ve onu absorbe etme süresi, agreganın boyutuna ve potansiyel absorpsiyon kapasitesine bağlıdır.

Ayrıca süper akışkanlaştırıcıların kullanımı, toplam su ihtiyacını azalttığı için basınç dayanımının artmasına da katkıda bulunmaktadır (Beher et al., 2014). GDA'nın nispeten yüksek su emmesi ve daha pürüzlü yüzeylere sahip olması nedeniyle, eşdeğer bir doğal agrega beton bileşimi ile aynı işlenebilirliği korumak için daha fazla miktarda suya ihtiyaç vardır. Akışkanlaştırıcılar betonun işlenebilirliğini artırır ve daha iyi yerleştirir, bunun sonucunda beton gözenekliliği azalır ve betonun basınç dayanımı artar (Prakash & Krishnaswamy, 1998).

Eğilme ve çekme dayanımı

Basınç dayanımı gibi, GDA ile üretilen betonun eğilme dayanımı da doğal agregalı betonun eğilme dayanımından daha düşüktür. Çoğu araştırmacıların bulgularına göre, geri dönüştürülmüş iri agregalardan ve doğal ince agregalardan yapılan betonun eğilme dayanımının, genellikle aynı veya en fazla %10 azalma olduğunu göstermektedir (American Concrete Institute (ACI), 2001). Chen et al. (2002), bazı kırık kiremit ve tuğlalar içeren GDA ile üretilen betonun eğilme dayanımının geleneksel betona göre %9 ile %22 oranında azaldığını belirlemiştir. Bazı yazarlar, geleneksel betona kıyasla %100 GDA içerse bile GDA ile üretilen betonun eğilme dayanımında önemli bir fark bulunmadığını bildirmişlerdir (Chakradhara Rao et al., 2011; Sri Ravindrarajah & Tam, 1985).

Basınç ve eğilme dayanımı gibi, GDA ile üretilen betonun yarmada çekme dayanımı da GDA'nın doğal agrega ikamesi olarak dahil edilmesiyle azalır. Bununla birlikte, birçok çalışma, GDA'nın etkisinin, çekme ve eğilme dayanımlarına kıyasla basınç dayanımı üzerinde daha belirgin olduğunu ortaya koymuştur. Genel olarak, geri dönüştürülmüş iri ve ince agregalardan yapılan betonun çekme dayanımlarında %10'dan daha az azalma ve en kötü durumda maksimum %20 azalma vardır (American Concrete Institute (ACI), 2001). Örneğin, çeşitli çalışmalar, yarma çekme dayanımındaki maksimum düşüşün, farklı GDA değiştirme yüzdeleri ile sadece %10 olduğunu göstermiştir. GDA'nın betonun yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkisinin daha az olması, GDA'lı betonun yarmada çekme dayanımının, ikame seviyesi yerine esas olarak GDA'nın yüzey özelliklerinden ve kalitesinden etkilenmesinden kaynaklanmaktadır (Male sev et al., 2010).

Kuruma rötresi

Betonun hacminde değişiklik, uzun vadeli dayanıklılığını ve stabilitesini etkileyen en belirleyici özelliklerden biridir. Rötne veya büzülme; betonun hacminde azalma, çimento hamurun yapısına emilen suyun betondan kaybedilmesi veya çıkarılması ile ortaya çıkmasıdır. Kuruma büzülmesi, çimento matrisinin mezo-gözenekli yapısı içinde geliştirilen kılcal gerilimin gelişmesiyle sonuçlanan kılcal nem kaybı nedeniyle sertleşmiş betonun hacmindeki

azalma veya b z lme ile ilgili GDA ile üretilen betonun çok belirgin bir özelliğidir. Taze betondaki toplam su miktarı ile kuruma rötresi birbiriyle doğrudan ilişkilidir (Beher et al., 2014). GDA'nın betona dahil edilmesi daha fazla kuruma büzülmesi oluşur ve GDA ile üretilen betonun kuruma rötresi, geleneksel betonunkinden önemli ölçüde daha yüksektir (Yang et al., 2008). Bunun nedeni, daha düşük elastisite mod l ne sahip olan GDA'nın,  imento hamurunun potansiyel büzülmesine karşı daha az direnç göstermesi olabilir. Yang ve ark., agreganın sertliğinin beton b z lme miktarına önemli ölçüde katkıda bulunduğunu bildirmiştir (Yang et al., 2008).

Betonun kuruma büzülmesi bağlayıcı içeriğine, su/ imento oranına ve agrega tipine bağlıdır. Artan GDA ikame seviyesi, GDA ile üretilen betonun b z lme seviyesini arttırır ve b z lme seviyesindeki bir artıŐın GDA'nın değiştirme seviyesi ile doğrusal bir iliŐkisi vardır (Yang et al., 2008).

GDA içeren beton, yüksek bağlayıcı içeriğine (eski ve yeni hamur) sahip olduğundan, doğal agrega betondan %20-50 daha fazla rötre seviyesine sahiptir. Doğal agrega tamamen GDA ile yer deĐiŐtirildiĐinde, GDA'lı betonun b z lme seviyesi doğal agregalı betona göre yaklaşık %80 artmaktadır (Corinaldesi, 2010). Araştırmacıların çoğuna göre, ince taneli GDA ile hazırlanan GDA'lı betonun b z lme deformasyonu, iri taneli GDA içeren GDA ile üretilen betondan daha fazladır (Etxeberria et al., 2007). GDA içeren betonun b z lme deformasyonu,

(i) su kompanzasyonlu yöntem (Ferreira et al., 2011) ve iki aŐamalı karıştırma yöntemi gibi geliŐtirilmiŐ karıştırma yöntemi (Tam & Tam, 2008),

(ii) yüksek bağıl nem k r  (Amorim et al., 2012),

(iii) kimyasal katkıların dahil edilmesi (Kanema et al., 2016) ve

(iv) mineral katkıların dahil edilmesi (uçucu kül gibi) (Corinaldesi & Moriconi, 2009) gibi çeşitli tekniklerle azaltılabilir

Aderans dayanımı

Beton ve donatı arasındaki adezyon miktarı, betonarme yapıların davranıŐlarında olduğu kadar göçme Őekillerinde de belirleyici bir role sahiptir. Aderans dayanımı olarak bilinen bu adezyon, çoğunlukla kenetlenme aderans ile sağlanır ve beton bileşimi değişimi ile deĐiŐebilir. Betonun kaplaması, donatı çapı, sargı Şekli, kenetlenme uzunluğu ve betonun basınç dayanımı aderans dayanımını etkileyen en önemli parametrelerdir (Song et al., 2015).

Çubuk uzunluğu boyunca ortalama aderans gerilimi olarak tanımlanan aderans kuvveti, aderans kırılma yükünün donatının bağlı yüzey alanına bölünmesiyle hesaplanır. Çekme testi için gömülü uzunluk boyunca gerilim dağılımı tekdüze değildir. Bununla birlikte, aşağıdaki ilişki ile ortalama bir aderans gerilimi tanımlamak yaygındır:

$$\tau = \frac{P_u}{\pi d_b l_d}$$

Burada P_u maksimum çekme yük, d_b donatı çapı ve l_d gömülü donatı uzunluğudur.

GDA'lı betonun diğer dayanım özellikleri hakkında önemli sonuçlar elde edilirken, matris ve çelik donatı arasındaki aderans dayanımı hakkında nispeten az bilgi rapor edilmiştir. Bazı deneysel araştırmalar, GDA'nın ve miktarının aderans kuvveti üzerindeki etkisinin diğer mekanik özelliklerden oldukça düşük olduğunu ortaya koymuştur. GDA içeriğinin beton ve donatı arasındaki aderans üzerinde fazla bir etkisi yoktur. Bununla birlikte, aderans dayanımına katkıda bulunan faktörler, GDA durumunda donatı tipi ve donatı yüzey profilidir (Rao et al., 2007). Literatürden, %100'e kadar bir yer değiştirme seviyesinde aderans kuvvetinin %10'a kadar düşebileceği gözlemlenmiştir (Beher et al., 2014).

Xiao et al. GDA ile üretilen betonun farklı tipte donatı ile çekme testi ile bağlanma davranışını incelemişlerdir ve doğal agregalı betona göre GDA'nın %50 ve %100 ikame seviyesinde düz donatı için sırasıyla %12 ve %6 oranında aderans dayanımının azaldığını ve nervürlü donatı için, farklı değiştirme seviyelerinden bağımsız olarak birbirine oldukça benzer olduğunu bildirmişler (Xiao & Falkner, 2007). Muhtemel sebep, nervürlü donatıda aderans mekanik ankraj ve sürtünmeden, düz donatıda ise donatı ile beton arasındaki aderanstan kaynaklanmaktadır (Beher et al., 2014; Xiao & Falkner, 2007).

Yüksek sıcaklığa karşı direnci

Çeşitli bileşenlerden oluşan betonun yangına dayanıklılığı bu bileşenlerin yüksek sıcaklıktaki özelliklerine bağlıdır. Sıcaklık yükseldiğinde tüm bu bileşenlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri değişecek ve bu değişikliklerin sonucunda ısıнын betona nasıl ve ne şekilde aktarıldığı, bileşenlerin boyutları, moleküller arasındaki fiziksel ve kimyasal kuvvetler değişecektir. Nihai olarak ise betonların mekanik dayanımlar etkilenir. Betonun yaklaşık %75'i agregalardan oluştuğu için betonun yüksek sıcaklığa karşı direnci üzerinde büyük etkisi olacaktır. Bu nedenle, betonun ısı özellikleri büyük ölçüde agrega tipine bağlıdır, çünkü farklı agrega türleri yüksek sıcaklıklara çok farklı tepki verir. Bazı araştırmacılar, yüksek sıcaklıkların GDA performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sarhat ve Sherwood beton numuneleri

hazırlamak için doğal agregaları kısmen geri dönüştürülmüş agregalarla değiştirmiş ve bunları 20° C, 250°C, 500°C ve 750°C sıcaklığa maruz bırakmıştır. Farklı oranlarda geri dönüştürülmüş agrega içeren betonun kalan mekanik özelliklerinin, bazı farklılıklarla birlikte geleneksel betonunkilerle karşılaştırılabilir olduğu sonucuna varılmıştır (Sarhat & Sherwood, 2013). Salau et al. betondaki doğal agregaların %30'una kadar geri dönüştürülmüş agregalarla ikame edilmiş ve numuneler 200°C, 400°C ve 600°C'ye maruz bırakılmıştır. Betonun basınç dayanımında 200°C'den 450°C'ye kademeli bir iyileşme görüldü ve ardından sabit bir düşüş meydana geldiği tespit edilmiştir. GDA ile üretilen beton GDA ile üretilen betonun normal beton ile hemen hemen benzer davranış sergilediği belirlenmiştir (Salau et al., 2015).

Vieira et al. ayrıca değişen oranlarda geri dönüştürülmüş agregalarla yapılan ve 400, 600 ve 800°C ortam sıcaklığına maruz bırakılan beton karışımlarının kalan mekanik performansını yani basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastik modülü araştırmışlardır. Sonuçlar, doğal agregalarla hazırlanan kontrol karışımına kıyasla, geri dönüştürülmüş agregalarla yapılan betonun kalan mekanik davranışında önemli bir fark olmadığını göstermiştir (Vieira et al., 2011).

Donma -çözülme etkisi

GDA'lı betonun donma-çözülme direnci genellikle doğal agregalı betona göre daha düşüktür (Zaharieva et al., 2004). Ancak, muhtemelen orijinal betonun beton kalitesinden dolayı farklı araştırmacılardan çelişkili bulgular vardır. Bazı araştırmacılar, beton molozunun kalitesi iyi olduğunda betonun GDA ile karşılaştırılabilir performansını bulmuşlardır. Ancak çoğu araştırmacı, GDA'lar hava sürükleyici içerikli betonlardan elde edilmedikçe düşük donma çözülme direnci bildirmiştir. Donma-çözülme etkisi altındaki performansın düşük olması, esas olarak, GDA yüzeyine yapışmış eski harcın, karışım suyunu emen ve dolayısıyla hamurun kıvamdan dolayı su/çimento oranını artıran gözenekli yapısına atfedilir. İnce doğal agreganın ince taneli GDA ile tamamen ikamesi, 300 donma çözülme döngüsünden sonra betonda doğal agrega ile %12,6 kütle kaybına kıyasla yaklaşık %37,9 kütle kaybına yol açmıştır. GDA'nın önceden ıslatılması performansı artırıyor gibi görünmektedir ve doğal agregalı betonla karşılaştırılabilir sonuçlar vermektedir ve yapışmış harç içeriğinin azaltılması da donma çözülme direncini artırmaktadır (Kenai, 2018).

Geri Dönüştürülmüş Geopolimer Agregası (GDGA)

Geleneksel Portland çimentosu betonu üretiminde ve geopolimer beton üretiminde normal betondan elde edilmiş geri dönüştürülmüş agregaların kullanılması ile ilgili birçok

çalışma bulunmaktadır. Ancak taze beton üretiminde geopolimer betondan elde edilmiş geri dönüşüm agregalarının kullanımı hakkında çok az araştırma bulunmaktadır. Bu alanda yapılan çalışmalar aşağıda sunulmuştur;

GDGA'nın özellikleri

Su emme ve özgül ağırlık

Geri dönüştürülmüş geopolimer agregalar doğal agregalara kıyasla, birincil agregaya yapışmış geopolimer hamur nedeniyle daha fazla su emme ve daha düşük özgül ağırlığa sahiptir. Akbarnezhad et al. ve Mesgari et al. tarafından yapılan çalışmalarda yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve kaolin esaslı geopolimer betondan elde edilen iri taneli GDGA'yı tane sınıflarına ayırarak su emme ve özgül ağırlıklarını tespit etmiştir. Çalışmada 4,7-6,7 mm, 6,7-9,5 mm ve 9,5-13,2 mm boyutlara sahip GDGA'nın kuru özgül ağırlıklarını sırasıyla 2,2, 2,3 ve 2,35 olduğunu ve su emmesini sırasıyla %9,1, %5,1 ve %4,9 olarak bulunmuştur (Akbarnezhad et al., 2015; Mesgari et al., 2020).

Chaliasou (2020), üç tip uçucu kül ve yüksek fırın cürufu bazlı geopolimer karışımından geri dönüştürülmüş agregaların etüv kurusu özgül ağırlığını 2,45 ile 2,29 ve doymun kuru yüzey özgül ağırlığını 2,54 ile 2,44 olarak elde etmiştir. İri agreganın (maksimum boyutu 20 mm olan) su emme oranı %3,6 ile %4,5 ve ince agreganın (maksimum boyutu 1 mm olan) su emme oranı ise %11,4 ile %10,3 olduğu belirtilmiştir (Chaliasou, 2020).

Agrawal et al., tarafından yapılan çalışmada uçucu kül esaslı geopolimer kumunun kuru özgül ağırlığının 2,46 ve su emme miktarını %5,61 elde etmişler (Agrawal et al., 2019). Zhu et al., metakaolin esaslı geopolimer atıkları geri dönüştürülerek ince taneli GDGA elde etmiş, GDGA'nın su emme özgül ağırlığını sırasıyla %15,04 ve 1,85 elde etmişlerdir (Zhu et al., 2020).

Alkali silika reaksiyonu (ASR)

Alkali-silika reaksiyonu, betonda meydana gelen zararlı bir iç reaksiyondur. Bu reaksiyon, aktif silika ile bazı agregalardaki reaktivite ve çimento hamurundaki alkaliler arasındaki reaksiyonun bir sonucu ve bu da hidrofilik bir jel üretimine yol açmaktadır. Jel boşluklarda hareket eder ve onları doldurur. Endişelerden biri, Portland çimento betonunda geri dönüştürülmüş geopolimer agrega kullanımının betonda alkali silika reaksiyonu olasılığını artırabileceğidir. Agrawal et al. (2019), ince taneli uçucu kül esaslı geopolimer agrega ve nehir kumunun alkali silika reaktivitesini sırasıyla %0,023 ve %0,031 olarak bulmuşlardır (Agrawal et al., 2019). Agrawal et al. (2017), ince taneli uçucu kül esaslı geopolimer agrega ile yaptıkları

başka bir çalışmada. %0,06 mm'lik bir ASR nedeniyle betondaki zamana bağlı uzunluk değişimini ölçmüşlerdir (Agrawal et al., 2017).

Eryılmaz et al. bir inceleme çalışmada geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların alkali silika reaktivitesinin standart değerlerden düşük olduğu ve betonda kullanımının herhangi bir soruna yol açmadığı gözlemlenmiştir (Eryılmaz et al., 2023). Geopolimer betonların düşük ASR genleşmesi, esasen geopolimer matrisindeki düşük portlandit (CH) miktarı ile açıklanabilir (Rashidian-Dezfouli & Rangaraju, 2021). Chaliasou, nispeten yüksek bir alkali içeriğine sahip GDGA'nın PÇ betonda dahil edilmesinin, matriste güvenli eşiğin ötesinde bir alkalinite artışına yol açmadığını belirtmiştir. 1,5 yıla kadar test edilen numunelerde ASR oluşmadığını söylemiştir (Chaliasou, 2020).

GDGA ile üretilen beton özellikleri

Basınç dayanımı

Akbarnezhad et al. tarafından yapılan çalışmada GDGA ağırlıkça %0, %20, %50 ve %100 oranlarında doğal iri agregaya yerine ikame edilerek yeni geopolimer beton ve GDA'yı kullanarak ise aynı ikame oranlarında Portland çimento esaslı beton üreterek basınç dayanımı deney sonuçlarını karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, geri dönüştürülmüş agreganın yer değiştirme oranının artmasıyla basınç dayanımının düştüğünü, ancak bu dayanım düşüşünün GDA ile yapılan çimentolu betonda daha fazla olduğunu göstermiştir. %100 GDGA kullanılarak üretilen geopolimer betonun basınç dayanımı kontrol numuneye göre %12,9 oranında düşüş gösterirken; %100 GDA kullanılarak üretilen Portland çimento betonun basınç dayanımında %28,1'lik bir azalma gözlemlenmiştir (Akbarnezhad et al., 2015). Mesgari et al. benzer çalışmada aynı ikame oranlarla GDGA ile geopolimer beton ve PÇ beton, GDA ile PÇ beton üreterek basınç dayanımı deney sonuçlarını karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, PÇ betonda doğal iri agreganın %20'sinin GDGA ile yer değiştirilmesinin basınç dayanımında %14'lük bir azalmaya neden olduğunu ve doğal iri agreganın %100'ünün GDGA ile değiştirilmesinin basınç dayanımında maksimum yaklaşık %33'lük bir azalma ile sonuçlandığını gösterirken; aynı ikame oranlarla GDA ile yapılan PÇ betonun basınç dayanımında sırasıyla %8,2 ve %27,5 düşüş göstermiştir (Mesgari et al., 2020).

Chaliasou, üç uçucu kül-yüksek fırın cüruf bazlı geopolimer beton karışımı numunelerinden GDGA elde etmiştir. GDGA'lar, aşağıdaki bileşimlere sahip üç geopolimer karışımından geri dönüştürülmüştür.

- Na_2O = %3 toz bağlayıcı kütlesi başına $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı =1 "standart geopolimer karışım" olarak,
- Na_2O = %4 prekürsör kütlesi başına ve $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı =1 "yüksek alkali",
- Na_2O = %3 prekürsör kütlesi başına ve $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı=1,5 "yüksek silika"

Elde edilen agregalar, doğal iri agrega yerine %20 oranında ikame edilerek iki grup PÇ beton karışımında kullanılmıştır. Biri normal, diğeri yüksek dayanımlı beton karışımları grubu tasarlanmıştır. Karışımların basınç dayanımları kontrol numunelerine göre çok farklılık göstermediğini bildirilmiştir (Chaliasou, 2020).

Zhu et al. (2020) yaptığı çalışmada, dere kumu ince taneli GDGA ile ikame edilerek geopolimer harç üretmişler. Sonuçlara göre; dere kumu ince taneli GDGA ile %0, %20, %50, %80 ve %100 ikame edildiğinde basınç dayanımında kontrol numunelerine göre sırasıyla %3,4, %8,8, %18,8 ve %39,4 oranlarıyla düşüş göstermiştir (Zhu et al., 2020).

Chamila et al. (2018) yaptığı çalışmada geopolimer hamurdan üretilmiş agrega ile Portland çimentosu esaslı beton yapılmıştır. geopolimer agregalı betonun 90 günlük basınç dayanımı doğal agrega betona göre %26 azaldığını, ancak doğal agregalı betona göre zamanla dayanım kazanım hızı daha arttığını göstermiştir (Chamila et al., 2018). Bu husus Agrawal et al.(2019) çalışmalarında da görülmektedir; uçucu kül esaslı geopolimer hamurdan üretilmiş ince agrega ile üretilen betonun 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanımını doğal kum ile üretilen betonun sırasıyla %81,75, %95,54 ve %97,32 olarak belirlemişlerdir (Agrawal et al., 2019).

Eğilme dayanımı

Akbarnezhad et al., GDGA ile üretilen geopolimer betonun eğilme dayanımının, doğal agrega ile üretilen betonun eğilme dayanımından %15,2 daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. GDA ile üretilen betonun eğilme dayanımı ise doğal agrega ile üretilen betonun eğilme dayanımından %20,5 daha düşük olduğunu belirtmiştir (Akbarnezhad et al., 2015). Mesgari et al. benzer çalışmada %100 GDGA ile yapılan normal betonun eğilme dayanımında %17,6, GDA ile yapılan betonun ise %19,6 eğilme dayanımında azalma gösterdiğini belirtmiştir (Mesgari et al., 2020). Zhu et al. (2020) yaptığı çalışmada, dere kumu ince taneli GDGA ile ikame edilerek geopolimer harç üretmişler. Sonuçlara göre; dere kumu ince taneli GDGA ile %0, %20, %50, %80 ve %100 ikame edildiğinde eğilme dayanımında kontrol numuneye göre sırasıyla %4,1, %10,1, %13,6 ve %19,5 oranlarıyla düşüş göstermiştir (Zhu et al., 2020).

George ve ark.(2022) yaptığı çalışmada, %100 geopolimer agrega ile yapılan betonun, normal agregalı betonun %80 eğilme dayanımına kadar ulaştığını bildirmiştir (George & Asha,

2022). Agrawal et al.(2019) çalışmalarında uçucu kül esaslı ince taneli GDGA ile üretilen betonun 28, 56 ve 90 günlük eğilme dayanımını doğal kum ile üretilen betonun sırasıyla %88,93, %93,97 ve %95,88 olarak belirlemişlerdir (Agrawal et al., 2019).

Elastisite modülü

Akbarnezhad et al. (2015), GDGA ile üretilen geopolimer betonun ve GDA ile üretilen geleneksel betonun elastisite modülünü araştırmışlardır. %100 GDGA ile üretilen geopolimer betonun elastisite modülünün, kontrol numunenin elastisite modülüne göre %10,7 oranında azalma gösterirken; GDA ile üretilen geleneksel betonun elastisite modülünde, kontrol numunenin elastisite modülüne kıyasla %21,1'lik bir düşüş göstermiştir (Akbarnezhad et al., 2015).

Mesgari et al. (2020), farklı GDGA içeriği (%0, %20, %50 ve %100 doğal iri agregaya yerine ikamesi) ile üretilen geopolimer betonun, GDA ile üretilen geleneksel betonun ve GDA ile üretilen konvansiyonel betonun elastisite modülünü araştırmışlardır. GDGA'nın %100'ünün doğal agregaya ile değiştirilmesiyle, elastisite modülünde maksimum %8,3'lük bir düşüş meydana gelmiştir (Mesgari et al., 2020).

Ramos ve arkadaşları. (2020), geopolimer beton atık parçacıkları ile birleştirilmiş, soldurulmuş düz veya oleik asit ile yüzeyi modifiye edilmiş geri dönüştürülmüş polipropilen matrisli çevre dostu kompozitlerin elastisite modülünü incelemiştir. Yüzeyi modifiye edilmiş geopolimer beton atıklarının ikame oranı arttıkça kompozitlerin elastisite modülü arttığını bildirmiştir. (Eryılmaz et al., 2023; Ramos et al., 2020).

Kuruma rötresi

Agrawal ve ark., çimentolu beton üretiminde doğal kum yerine geopolimer hamur atıklardan üretilen kumu kullanmışlar ve betonun kuru büzülmesini araştırmışlardır. Geopolimer kum ile yapılan beton ile doğal kum ile yapılan betonun kuruma rötresi değerlerinde çok büyük bir fark olmadığını belirtmişlerdir. Geopolimer agregaya ile yapılan beton, kuruma büzülmesinde çok iyi performans göstermiştir. Nehir kumu betonu ile karşılaştırıldığında, yüksek su emmeye rağmen kuruma büzülmesinin iyileşmesinin nedeni, Davidovits tarafından geopolimer beton için açıklanan "blok polimerizasyon" kavramından kaynaklanıyor olabilir. Ona göre, uçucu külde bulunan Si ve Al, sıvı çözelti ile polimerize olur ve böylece beton granüllerinin içeriğini artıran geopolimer bağlayıcılar içeren "bloklar" oluşturur. Bu aynı zamanda geopolimer kum betonu için de geçerli olabilir. Alkali sıvı ve uçucu

kül, beton gözenekliliğini doldurmaya yardımcı olan ve böylece beton dayanıklılık özelliklerini iyileştiren bloklar oluşturmak üzere reaksiyona girebilir (Agrawal et al., 2019).

Chamila et al., geopolimer hamurdan üretilmiş agrega betonunun kuruma rötresini 91 günde 420 mikrostrain elde etmişler. Avustralya'da beton kullanımı için AS3600 standardı (AS 2009) tarafından önerilen maksimum izin verilen değerden (800 μ s gerinim) önemli ölçüde düşük olmuştur (Chamila et al., 2018).

Mikroyapı analizi (ITZ)

Öncelikle çimento ve geri dönüştürülmüş agreganın ITZ'sine genel olarak gözden geçirilerek ardından geri dönüştürülmüş geopolimer agrega ve çimento matrisinin ITZ'sini incelenmiştir. Çimento hamuru ile agrega arasındaki arayüzey geçiş bölgesi (ITZ), betondaki en önemli arayüzdür. Geleneksel betonda, doğal agrega ile matris arasındaki ara yüze genellikle geçiş bölgesi (ITZ) denir. Geri dönüştürülmüş agrega temel olarak eski doğal agrega ve üzerine yapılmış harçtan oluşur, ikisi birbirinden ayrılamaz bir parçasıdır. Bu nedenle, geri dönüştürülmüş agregalar genellikle aşağıdaki üç tip ITZ'ye sahiptir (Xu et al., 2021):

- Doğal agrega ile taze çimento matrisi arasındaki ITZ,
- Doğal agrega ile eski artık çimento(bağlayıcı) matrisi arasındaki ITZ ve
- Eski ve yeni harç arasında ITZ.

Çoğu araştırmacılar, GDA'lı beton dayanımının, doğrudan ITZ'den etkilendiğine inanmaktadır. Ancak, ITZ etkisinin sonuçları hakkında iki görüş vardır. Speath ve Wong et al., beton basınç altında hasar gördüğünde, çatlakların önce ITZ'den kaynaklandığına ve yavaş yavaş diğer alanlara yayıldığına inanmaktadır. Bu nedenle, ITZ betonun dayanımını ve geçirimsizliğini azaltır (Spaeth & Tegger, 2013; Wong et al., 2009). Tersine, Diamond ve Huang, ITZ'deki boşlukların $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve C-S-H jeli tarafından doldurulması nedeniyle, GDA'lı betondaki ITZ'nin gözenekliliğini çevreleyen çimentolu malzemeden dolayı biraz daha yüksek olduğuna inanmaktadır(Diamond & Huang, 2001). Bu nedenle, GDA ile üretilen beton GDA ile üretilen betondaki ITZ'nin beton üzerinde mutlaka olumsuz bir etkisi yoktur. Özetle, geri dönüştürülmüş agregaların mikroskobik özellikleri esas olarak ITZ'nin özellikleri tarafından belirlenir ve ITZ'nin betonun dayanımı üzerinde önemli bir etkisi vardır (Xu et al., 2021).

Literatürde geri dönüştürülmüş geopolimer agrega (GDGA) ve çimento matrisi arasındaki ITZ hakkında yeterli bilgi bulunmamakla birlikte, GDGA ve yeni geopolimer matrisinin arasındaki ITZ bazı makalelerde incelenmiştir. Bu arada, Zhu et al. (2020), metakaolin bazlı geopolimer beton karışımında doğal kum yerine geopolimer atıklarından geri

dönüştürülen ince agregaları (ince GDGA) kullanmıştır. İnce GDGA ile yeni geopolimer matris arasındaki ITZ'nin doğal agrega ile geopolimer matris arasındaki ITZ'lerden daha yüksek aderans dayanımına sahip olduğunu belirtmiştir. Özetle, geopolimer geri dönüştürülmüş ince taneli GDGA ile yapılan harçlarda daha sıkı ITZ'ler elde edilmiş ve ITZ'lerin iyileştirilmesi ikincil geopolimerizasyona atfedilmiştir. Aynı zamanda doğal kumun geri dönüştürülüş geopolimer ince taneli GDGA yer değiştirilmesiyle mekanik özelliklerde azalma meydana gelmiş ve ince taneli GDGA harcının mekanik özelliklerindeki bu düşüşü ITZ'ye değil ince GDGA'nın zayıf özelliklerine bağlamışlardır (Zhu et al., 2020).

Chaliasou (2020), ITZ'nin morfolojisinin karışımlar arasında farklı olduğunu ve nedenlerinin kesin olarak belirlenemediğini belirtmiştir. Bununla birlikte, bulgular, ITZ oluşumunun, bağlanmış eski hamurun gözenekliliği tarafından belirlenen GDGA'nın yüzey adsorpsiyonu ve su absorpsiyonundan etkilendiğini kuvvetle doğrulamaktadır. Bu, ITZ oluşumunun ve temel olarak geri dönüştürülmüş agregalı betonun dayanımının büyük ölçüde GDGA'nın gözenekliliğine ve onu etkileyen faktörlere bağlı olduğu sonucunu doğrulamaktadır (Chaliasou, 2020).

MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde çalışmanın amacı doğrultusunda kullanılan doğal agrega, GDGA, çimento, karma suyu, SAK maddesi ve diğer malzemeler ile çalışmalarda kullanılan deney düzenekleri, ölçüm cihazları ve deney aletleri hakkında bilgi verilmektedir. Yapılan agrega deneyleri, beton karışımları ve yapılacak deneysel çalışmaların yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

Materyal

Çalışmada kullanılan malzemeler

Çimento

Bu çalışmada Aşkale Çimento Fabrikasından temin edilen CEM I 42,5 ve CEM II 42,5 çimentoları kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Portland çimentolarının Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Kimyasal Bileşenler	Kimyasal Bileşen Oranı (%)		
	CEM I 42,5 R	CEM II 42,5 R	TS EN 197-1
SiO ₂	19,17	21,98	
Al ₂ O ₃	4,50	5,07	
Fe ₂ O ₃	3,04	3,09	
CaO	63,08	57,97	
MgO	1,78	1,71	
SO ₃	2,89	2,66	max, 4,0
Cl ⁻	0,0116	0,0121	max, 0,1
Eşdeğer alkali (Na ₂ O cinsinden)	0,76	1,11	
Kızdırma Kaybı	3,93	-	
Çözünmeyen Kalıntı	0,98	-	
Fiziksel Özellikler			
Yoğunluk (gr/cm ³)	3,12	3,04	
Priz Başlama Süresi (dakika)	155	160	min, 60
Priz Bitiş Süresi (dakika)	210	215	
Hacim Genleşmesi (mm)	1,0	1	max, 10
İncelik, 32 micron (%)	12,1	12,7	
Blaine (cm ² /g)	3486	4044	
Basınç Dayanımı, 2 gün, (MPa)	27,2	25,9	min, 20
Basınç Dayanımı, 28 gün (MPa)	55,6	52,4	42,5 - 62,5

Normal agrega

Bu çalışmada dere agregaları ve kırmataş agregaları olmak üzere iki tip doğal agrega kullanılmıştır.

Basınç ve eğilme dayanımı deneyleri için dere agregaları maksimum tane çapı (d_{maks}) 8 mm ve tane sınıf aralıkları ise 0-2 mm (kum olarak), 2-4 mm (ince agrega) ve 4-8 mm (iri agrega)'dır.

Aderans dayanımı (pull-out) ve ring test (kısıtlanmış rötire) numunelerinin karışımında ise ASTM C 1581 standardındaki maksimum agrega boyutu koşulunu sağlamak için maksimum agrega boyutu 12,5 mm agrega seçilmiştir. Agregalar 2, 4, 8 ve 12,5 mm'lik eleklerden elenerek 0-2 mm (kum), 2-4 mm (ince agrega), 4-8 mm (iri agrega 1) ve 8-12,5 mm (agrega iri 2) olmak üzere 4 sınıfa tane sınıflarına ayrılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Kullanılmış agregaların görüntüleri

Beton karışımındaki her bir agrega sınıfının ağırlık yüzdesi, en büyük tane boyutuna bağlı olarak TS 706 EN 12620+A1 (2009) ve TS 802 (2009)'de belirtilen ideal bölgeye yerleştirilecek şekilde seçilmiştir (TS 706 EN 12620+A1, 2009; TS 802, 2016).

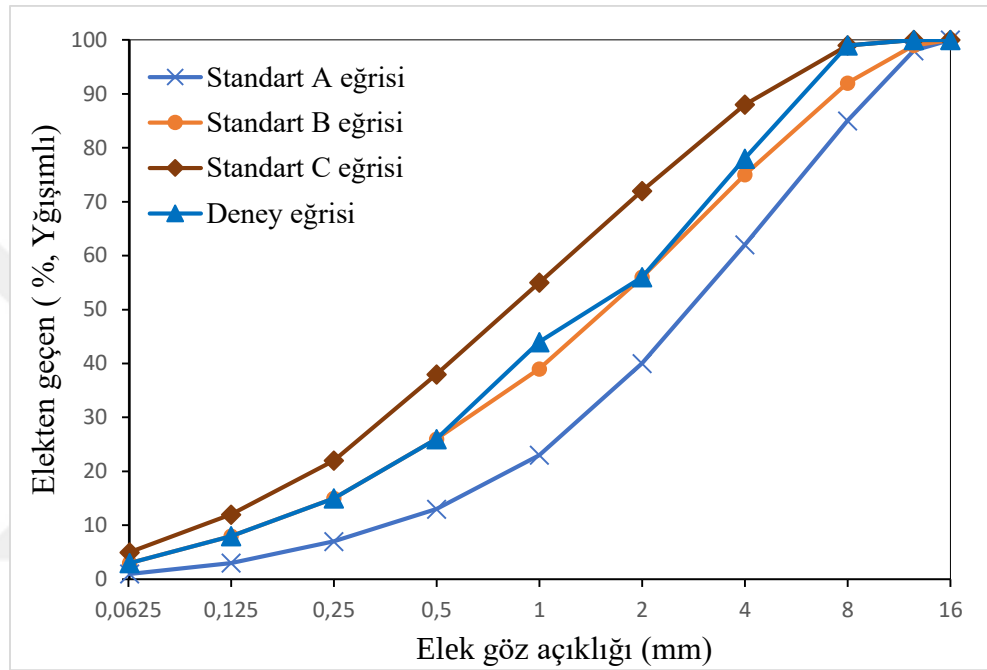
Basınç ve eğilme dayanımı deneyleri için beton karışımlarda %22'si (4-8 mm), %22'si (2-4 mm) ve %56'sı (0-2 mm) agrega oranları kullanılmıştır.

Aderans dayanımı (pull out) ve ring test (kısıtlanmış rötire) karışımlarında ise toplam agrega kütlelerinden %15'i (8-12,5 mm), %20'si (8-4 mm), %18'i (2-4 mm) ve %47'si (0-2 mm) agrega kullanılmıştır TS 802 (2016) standardına göre agregaların yapılmış elek analizi sonuçları Tablo

2 ve Tablo 3'te verilmiştir. Doğal agregaların granülometri eğrisi Şekil 6 ve Şekil 7'de göstermiştir.

Tablo 2. Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı deneyleri için kullanılan agregaların (d_{maks} : 8mm olan) elek analizi değerleri

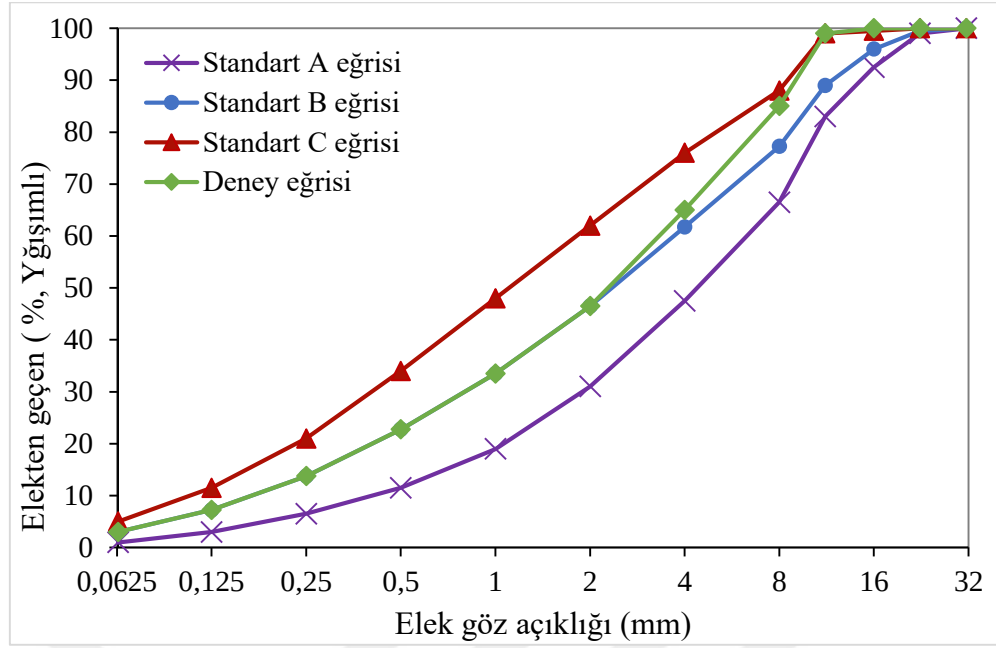
Elek Açıklığı (mm)	16	12,5	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Elekten Geçen (%)	100	100	99	78	56	44	26	15	8	3



Şekil 6. d_{maks} = 8mm olan agrega granülometri eğrisi

Tablo 3. Pul out ve ring test deneyleri için kullanılan agregaların (d_{maks} 12,5 mm olan) elek analizi değerleri

Elek Açıklığı (mm)	31,5	22,4	16	12,5	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Elekten Geçen (%)	100	100	100	99	85	65	47	34	23	14	7	3



Şekil 7. $d_{maks} = 12,5$ mm olan agreg granülometri eğrisi

Doğal agreganın su emme oranı, doymun kuru yüzey özgül ağırlığı ve ince madde oranı gibi fiziksel özellikler TS EN 1097-6, ve TS EN 933-10'a göre standartlarına uygun olarak yapılmış ve sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir. Karışımlarda doğal agregalar doymun kuru yüzey durumunda kullanılmıştır (TS EN 933-10; TS EN 1097-6, 2013)

Geri dönüştürülmüş geopolimer agreg

İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemeleri Laboratuvarında daha önceden üretilmiş (farklı içeriklere sahip, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve volkanik kül esaslı ve NaOH ve Na₂SiO₄ alkalilerle üretilen geopolimer beton atıkları) ve mekanik testlere tabi tutulmuş ve atık olarak ortaya çıkan geopolimer beton atıkları toplanarak çeneli kırıcı ile boyut fraksiyonu ayarlanarak kırılmıştır. Daha sonra elekler kullanılarak ince ve iri (2-4 mm, 4-8 mm ve 8-12,5 mm) olmak üzere üç farklı agreg sınıfına ayrıştırılmıştır (Şekil 8).



Şekil 8. Tane sınıflarına ayrılmış GDGA'ların görüntüsü

GDGA'nın su emme oranı, doygun kuru yüzey özgül ağırlığı ve organik madde tayini gibi fiziksel özellikler TS EN 1097-6 ve TS 3527'ye göre standartlarına uygun olarak yapılmış ve sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Doğal agrega ve GDGA'nın fiziksel özellikleri

	Doğal agregalar			GDGA'lar	
	0-2 mm	2-4 mm	4-12,5 mm	2-4 mm	4-12,5 mm
Su emme oranı (%)	1,66	1,66	1,80	6,06	6,23
Özgül ağırlık	2,48	2,48	2,66	2,41	2,43
İnce madde (%)	1,90	1,90	-	-	-

Süper akışkanlaştırıcı katkı (SAK)

Beton karışımlarında gerekli işlenebilirliği sağlamak için TS EN 934-2 (2014) standardına uygun olan MGLENİUM 51 Master Builders Kimya Ltd. Şan.'den sağlanan polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı katkının özellikleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Süper akışkanlaştırıcı katkının özellikleri

Görünüm	Kahverengi- Sıvı
Özgül Ağırlık (20°C'de)	1,058-1,098
Görünüm	Kahverengi
pH	6-7
Alkali içeriği (%)	≤ 3,00 (ağırlıkça)
Klor iyon içeriği (%)	≤ 0,10 (ağırlıkça)

Karışım suyu

Çalışmada karışım suyu olarak Atatürk Üniversitesi musluk suyu kullanılmıştır.

Deneylerde kullanılan aletler

Çeneli kırıcı

Geopolimer atık numuneleri öğütmek için Atatürk Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan elektrikli çeneli kırıcı makinası kullanılmıştır (Şekil 9).



Şekil 9. Çeneli kırıcı

Elekler

Deneylerde TS ISO 3310-2 (2015)'e uygun, Şekil 10'de gösterildiği gibi, 31,5mm-0,063 mm göz açıklığına sahip olan kare delikli tel elekler agregaların elek analizinde kullanılmıştır. Doğal agregata ve GDGA'nın boyut fraksiyonu ayırmak için 2, 4, 8 ve 12,5 mm elek çaplarından kullanılmıştır.



Şekil 10. Elekler

Laboratuvar harç mikseri

Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yüksek sıcaklık direnci testi ve boy değişimi için gerekli numunelerin karışımını hazırlamak için TS EN 196-1 (2016) standardına uygun olacak şekilde 280 dev/dk karıştırma hızına sahip 10 lt kapasiteli laboratuvar mikseri kullanılmıştır (Şekil 11)



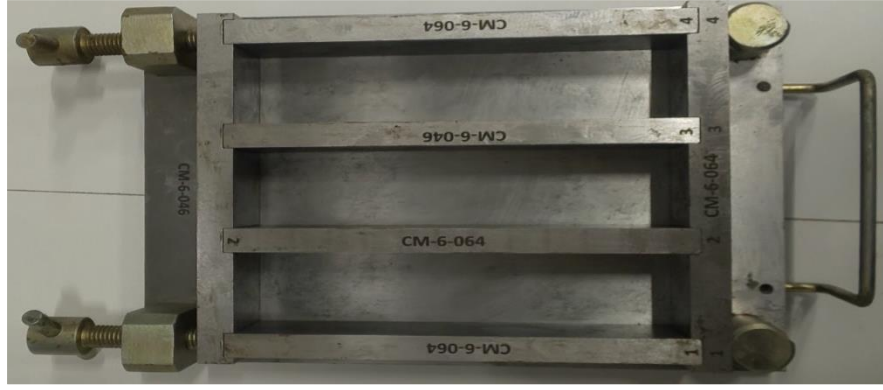
Şekil 11. Laboratuvar tipi mikser

Kalıplar

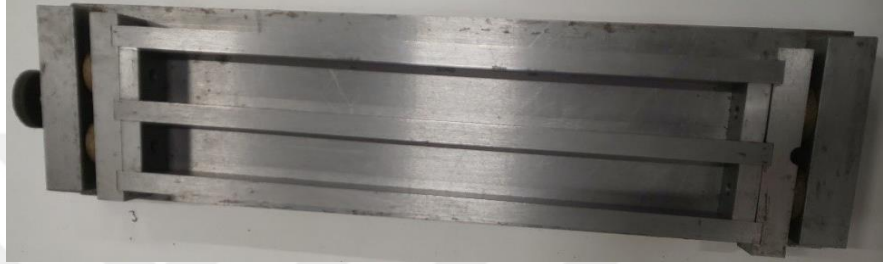
Betonların basınç dayanımı, yüksek sıcaklık etkisi ve UPV değerlerinin tespitinde 50x50x50 mm boyutlarında TS EN 12390-1 (2013)'e uygun metal küp kalıplar, eğilme dayanımı ve boy değişimlerinin tespitinde TS EN 12390-1 (2013)'e uygun 40x40x160 mm'lik metal prizmatik kalıplar kullanılmıştır. ASR deneyler için TS 13516 ve ASTM C490 (2014)'e uygun 25x25x285 mm'lik metal ucunda vidalı prizmatik kalıplar kullanılmıştır. Ayrıca betonun aderans dayanımı değerlendirmek için (pull out testi) 100x200 mm'lik silindirik numuneler ve çatlak ilerlemesinin, çatlak yaşının ve oluşacak gerilmelerin tespiti için ASTM C 1581- 04'e göre ring kalıpları kullanılmıştır. Kalıplara ait fotoğraflar Şekil 12, Şekil 13, Şekil 14, Şekil 15 ve Şekil 16'da görülmektedir.



Şekil 12. 50x50x50 mm'lik metal küp kalıplar



Şekil 13. 40x40x160 mm'lik metal prizmatik kalıplar



Şekil 14. 25x25x285 mm'lik metal ucunda vidalı prizmatik kalıplar (ASR deneyler için)



Şekil 15. 100x200 mm'lik silindirik kalıplar



Şekil 16. Ring kalıpların görüntüsü

Etüv

Numuneleri oluşturan malzemelerin hazırlanmasında, özelliklerinin saptanmasında ve numunelerin kür aşamasında dijital termostata sahip etüv kullanılmıştır (Şekil 17).



Şekil 17. Etüv görüntüsü

Yüksek sıcaklık fırını

Maksimum 1000°C sıcaklık kapasiteli ISO-834 (2002) standardına uygun belirlenen sıcaklık ve süre ayarlanabilen yüksek sıcaklık fırını kullanılmıştır (Şekil 18).



Şekil 18. Yüksek sıcaklık fırını.

Beton basınç dayanımı test cihazı

BESMAK marka bilgisayar kontrollü otomatik tek eksenli basınç dayanımı test presinin, maksimum kapasitesi 1000 kN (100 Ton) dur. Numunelerin basınç dayanımlarının tayininde kullanılmıştır (Şekil 19).



Şekil 19. Basınç dayanımı test cihazı

Eğilme dayanımı test cihazı

Betonların eğilme dayanımlarının tespitinde maksimum 60 ton kapasitesi olan BESMAK marka bilgisayar kontrollü bir makineden kullanılmıştır. (Şekil 20)



Şekil 20. Eğilme dayanımı test cihazı

Aderans dayanımı deneyi test cihazı

Betonun aderansının tayininde (pull out testi) TS EN ISO 6892-1, TS EN ISO 7500-1 standartlarına uygun, BESMAK marka bilgisayar kontrollü yükleme hızı otomatik olarak ayarlanabilen Servo Hidrolik Universal Test Makinesi kullanılmıştır (Şekil 21)



Şekil 21. Aderans dayanımı testi için kullanılan donatı çekme deneyi test cihazı

Dijital komparatör

ASR numunelerinin genleşmesini ölçmek için 0,001 mm hassasiyetinde okutabilen HEIDENHAIN markalı dijital komparatör kullanılmıştır. (Şekil 22)



Şekil 22. Dijital komparatör

Su banyosu

ASR numunelerini 80°C sıcaklıkta kür işlemi için kullanılan elektrikli su banyosu Şekil 23'te verilmiştir.



Şekil 23. Su banyosu

Betonyer

Bu çalışmada 60 dm³ kapasiteli ve karıştırma hızı 25 devir/ dakika olan mikserden kullanılmıştır (Şekil 24).



Şekil 24. Beton büyük mikser (betonyer)

Veri toplama sistemi (data logger)

Boy değişimi (serbest rötre) ve kısıtlanmış rötre (ring testi) ölçümleri için strain gaugeler (gerinim ölçerler) ve bilgisayar veri toplama sistemi kullanılmıştır. Şekil 25'de görüldüğü gibi gerinim ölçerler ve sıcaklık ölçümü için “thermocouple”ler modüller kullanarak veri toplama sistemine bağlanmıştır. Bilgisayarda veriler DAYSLAB programı tarafından sürekli olarak kaydedilmekte ve Microsoft Access yazılımına aktarılmaktadır.



Şekil 25. Veri toplama sistemi kurulumu

Ultrasonik hız ölçüm cihazı (UPV)

Bu çalışmada Proceq markalı bir Ultrasonik hız ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 26). Bu cihaz yardımıyla ultrasonik dalgalar üretilerek beton ortama gönderilir. Bu dalgaların gönderilme ve alınma süreleri arasındaki fark ölçülerek ve dalgaların yayılma hızlarına dayalı hesaplamalar yardımıyla beton benzeri malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri tahmin edilebilmektedir.



Şekil 26. UPV cihazı

Strain guage

Betonun boy değişiminin ölçümü için beton üzerine yapıştırılabilen strain gaugeler Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. firmasından temin edilmiştir. Betonun boy değişimini belirlemek için 60 mm uzunluğunda PL-60-11-3LJC-F strain gauge 40x40x160 mm'lik numuneler üzerine yapıştırılmıştır. PL-60-11-3LJC-F, bir polyester reçine desteği kullanan tel gerinim ölçerlerdir. Genel olarak beton, harç veya kaya üzerinde yüzey gerinimi ölçümü için kullanılırlar. Strain gaugelerin çalışma sıcaklıkları -20°C ile 80°C arasındadır. Kısıtlanmış rötre (ring test) ölçümleri için ve metal üzerine yapıştırılabilen PFL-30-11-5L strain gaugeler Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. firmasından temin edilmiştir. PFL-30-11-5L strain gaugeler, metal üzerinde gerinim ölçümü için uygundur. Betonun boy değişim ve ring test deneylerinde kullanılmış strain gaugeler özellikleri Tablo 6'da ve görüntüleri Şekil 27 ve Şekil 28'de verilmiştir.

Tablo 6. PL-60-11 Strain gaugelerin özellikleri

Özellikleri	Uygulanabilir malzeme	
	Beton, Hamur	Metal
Model	PL-60-11-3LJC-F	PFL-30-11-5L
Çalışma sıcaklığı (°C)	-20 ila +80 °C	-20 ila +80 °C
Sıcaklık kompanzasyon aralığı (°C)	+10 ila +80 °C	+10 ila +80 °C
Gerinim ölçer boyu(mm)	60	30
Gerinim ölçer direnci (Ω)	120	120
Gauge Faktör	2,09 $\pm$ %1	2.11 $\pm$ %1
Termal Genleşme Katsayısı	11x10 ⁻⁶ /°C	11,8x10 ⁻⁶ /°C



Şekil 27. PL-60-11-3LJC-F strain gauge görüntüsü



Şekil 28. PFL-30-11-5L strain gauge görüntüsü

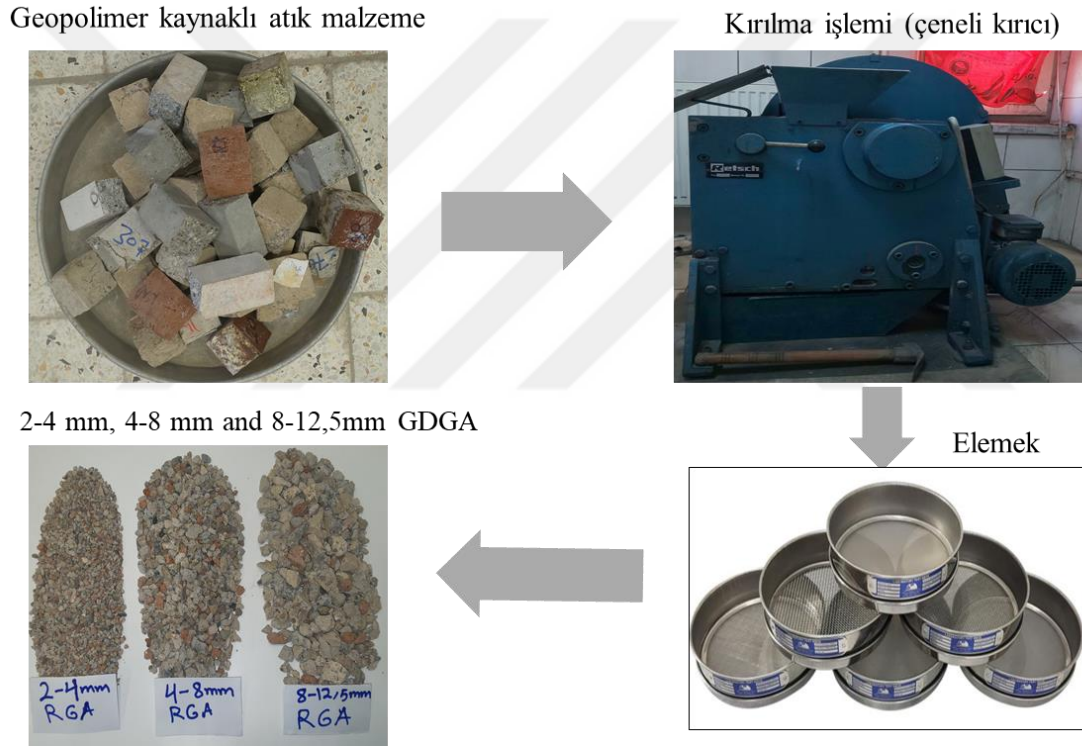
Yöntem

Bu kısımda, geopolimer beton atık numunelerinin öğütülmesi ve GDGA üretimi, GDGA ve doğal agregaların özelliklerinin belirlenmesi, karışım tipleri, geri dönüşümlü ve doğal agregalar ile üretilen beton karışımlarının hesaplanmasında kullanılan yöntemler, deneysel çalışmalar ve deneysel çalışmalarda kullanılan yöntemler anlatılmıştır.

Agregalar üzerine uygulanan yöntemler

GDGA üretimi

Geopolimer beton atık numuneleri önce çeneli kırıcı ile kırılarak daha sonra 2, 4, 8 ve 12,5 mm eleklerden geçirilerek, 2-4 mm, 4-8 mm ve 8-12,5 mm olmak üzere üç sınıf GDGA elde edilmiştir. Agregaların gradasyonu, betonun özelliklerini etkileyen önemli bir parametredir. Bu nedenle, farklı agrega türlerinin betonun özellikleri üzerindeki etkileri araştırılırken (doğal agregave GDGA dahil) farklı agrega türlerinin granülometrisi arasındaki farklar en aza indirilmelidir. Granülometrideki farklılıkların sonuçlar üzerindeki etkilerini ortadan kaldırmak için, GDGA'lar doğal agregalarının aynı tane büyüklük aralıklarına ayrılmıştır. GDGA üretim süreci şematik olarak Şekil 29'da verilmiştir.



Şekil 29. GDGA üretim prosedürü

Agrega deneyleri

Agregaların fiziksel özellikleri

Doğal agregalar ve GDGA'ların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için TS EN 1097-6'ya göre su emme ve kuru özgül ağırlık ve TS 706 EN 12620+A1 (2009)' göre ince madde tayini deneyleri yapılmıştır. Her bir deney için, üçer numune alınarak üzerinde deneyleri yapılmış ve sonuçların aritmetik ortalamaları alınmıştır. Agregaların deney sonuçları, Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

Alkali silika reaksiyonu (ASR)

GDGA'nın alkali-silika reaksiyon potansiyelini değerlendirmek için TS 13516'ya uygun hızlandırılmış harç çubuğu test yöntemi uygulanmıştır. Bu amaç için R-CI (doğal agrega), RGA-CI (geri dönüştürülmüş geopolimer agrega ve CEM I çimento) ve RGA-CII (geri dönüştürülmüş geopolimer agrega ve CEM II çimento) karışımlarından 280×25×25 mm ölçülerinde 2'şer adet harç numunesi hazırlanmıştır. Üretilmiş harç çubuğu numunelerin görüntüleri Şekil 30'de verilmiştir. Deneyde kullanılan agreganın tane boyutu dağılımı Tablo 7'de ve deney harcı karışım oranları detayları Tablo 8'da verilmiştir.

Çubukların genleşme değerleri 14 güne kadar her iki günde komparatör ile boy değişimi ölçülerek tespit edilmiştir. Çubuğun genleşmeleri yüzdesi olarak Araştırma Bulgular ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

Tablo 7. Deneyde kullanılan agreganın tane boyut dağılımı

Elek Boyutu		Kütlece, %
Geçen	Kalan	
4,75 mm	2,36 mm	10
2,36 mm	1,18 mm	25
1,18 mm	600 µm	25
600 µm	300 µm	25
300 µm	150 µm	15

Tablo 8. Deney harcı karışım oranları (gr)

		R-CI	RGA-CEM I	RGA-CEM II
Çimento (CEM I & II 42,5)		300	300	300
Su		141	141	141
Su/Çimento oranı		0,47	0,47	0,47
Agrega	Doğal agrega	150-300 µm	101,25	101,25
		300-600 µm	168,75	168,75
		600 µm-1,18 mm	168,75	101,25
		1,18-2,36 mm	168,75	-
		2,36-4,75 mm	67,50	-
	RGA	600 µm-1,18 mm	-	67,50
		1,18-2,36 mm	-	168,75
		2,36-4,75 mm	-	67,50



Şekil 30. ASR deneyi için harç çubuğu numuneleri ve dijital komparatör ile ölçümü

Karışım tipleri ve numune kodlamaları

Bu çalışmada doğal ve geopolimer geri dönüştürülmüş farklı taneli agrega kombinasyonlarının birleştirilmesinin betonun mekanik ve durabilite performansı üzerindeki etkisini araştırmak için altı farklı beton karışımı tasarlanmıştır. Öncelikle yalnızca doğal agrega ile beton karışımları (CEM I ve CEM II çimentoları ile ayrı ayrı) tasarlanmıştır. Daha sonra, GDGA olarak elde edilen ince ve iri agregaların beton özelliklerine etkisini değerlendirmek için 2-4 mm doğal ince agrega ve 4-8 mm (4-12,5 mm) doğal iri agrega yerine GDGA agregaları tekli (yalnızca ince ya da iri) ve ikili (ince ve iri) olarak yer değiştirilerek karışımlar tasarlanmıştır. Bu şekilde CEM I çimentosu ile 4 adet karışım tasarlanmıştır. Ayrıca çimento etkisini değerlendirmek için GDGA ile doğal iri agreganın yer değiştirildiği karışım aynı şekilde CEM II çimentosu ile de üretilmiştir. Dolayısıyla toplamda 6 farklı karışım yapılmıştır.

Diğer taraftan, deneysel çalışmalarda kullanılan kalıp boyutlarındaki kısıtlardan dolayı karışımlar da iki farklı grup oluşturulmuştur.

Birinci grup karışımlar; maksimum agrega boyutu 8 mm ve çimento dozajı 500 kg/m^3 olacak bir şekilde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yüksek sıcaklık etkisi ve boy değişim deneyleri için tasarlanmıştır.

İkinci grup karışımlar ise maksimum agrega boyutu 12,5 mm ve çimento dozajı 525 kg/m^3 olacak bir şekilde pull out ve ring test deneyleri için tasarlanmıştır.

Metinde anlaşılmasını kolaylaştırmak için karışımlar, doğal agreganın GDGA ile birleşimine ve kullanılan çimento tipine göre isimlendirilmiştir. Karışımların isimlendirilmesi Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Deneyisel çalışmada kullanılan karışımlar ve karışımların kodlanması

Numune kodlama*	Karışım tipinin açıklaması
R-CI	Referans karışım; tam doğal agrega ve CEM I çimentosu ile yapılmış karışım
R-CII	Referans karışım; tam doğal agregalar ve CEM II tipi çimento ile yapılmış karışım
C-RGA-CI	Doğal ince agrega, iri taneli GDGA ve CEM I tipi çimento ile yapılmış karışım
F-RGA-CI	İnce GDGA ve doğal iri agregalar ile CEM I tipi çimentodan yapılmış karışım
F+C-RGA-CI	İnce ve iri taneli GDGA ve CEM I tipi çimento ile yapılmış karışım
C-RGA-C II	Doğal ince agrega ve iri taneli GDGA ve CEM II tipi çimento ile yapılmış karışım

*Kısaltmalar: **R**: Referans, **CI**: CEM I çimento tipi, **CII**: CEM II çimento tipi, **RGA**: Geri dönüştürülmüş geopolimer agrega (Recycled geopolimer aggregate) **F**: İnce agrega (Fine aggregate) **C**: İri agrega (Coarse aggregate)

Karışım oranları belirlenmesi

Beton bileşenlerinin oranlarını, birinci ve ikinci grup için ayrı ayrı maksimum agrega boyutu 8 mm ve 12,5 mm dikkate alınarak TS 802 standardına göre belirlenmiştir.

Birinci grup karışımlarda; doğal agregaların yerine ikamesi için 2-4 mm ince agrega ve 4-8 mm iri agrega iki farklı grup olarak GDGA'dan kullanılmıştır. CEM I tipi çimento kullanılan karışımlarda 2-4 mm ve 4-8 mm’lik agregalar tek tek ve birlikte olmak üzere üç ayrı karışımda kullanılmış olup kontrol karışımı ile birlikte toplamda 4 karışım üretilmiştir. Ayrıca, çimento etkisini de araştırmak için CEM II çimentonun kullanıldığı karışımlarda yalnızca 4-8 mm iri agrega yer değiştirilerek kontrol karışımıyla birlikte 2 karışım yapılmıştır. İncelenen betonların karışım oranlarının detayları Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 10. Basınç ve eğilme dayanımı deneyleri için karışım oranları (1. Grup) (kg/m³)

Malzemeler (kg)		Karışımlar					
		R-CI	C-RGA-CI	F-RGA-CI	F+C-RGA-CI	R-CII	C-RGA-CII
Su		190	190	190	190	190	190
SAK %1,5		7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Çimento	CEM I	500	500	500	500	-	-
	CEM II	-	-	-	-	500	500
Doğal agregalar	4-8 mm	339	-	337	-	336	-
	2-4 mm	339	333	-	-	336	330
	0-2 mm	862	847	875	840	854	839
GDGA’lar	4-8 mm	-	333	-	330		330
	2-4 mm	-	-	337	330		

Pull out ve ring test numuneler için ikinci grubun karışımları, birinci grubun karışımları gibi, aynı adlandırma ve hesaplama işlemine sahip olup, sadece agregaların boyut ve oranlarında farklılık mevcuttur. Yani önceki karışımlardan farklı olarak (4-8 mm iri agrega açısından), iri agregalar 4-8 mm ve 8-12,5 mm olarak yer değiştirilmiştir. İkinci grup karışımlar karışım oranları Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. Ring test ve pull out numuneler için karışım oranları (2. Grup) (kg)

Malzemeler (kg)		Karışımlar					
		R-CI	C-RGA-CI	F-RGA-CI	F+C-RGA-CI	R-CII	C-RGA-CII
Su		200	200	200	200	200	200
SAK %1,5		7,88	7,88	7,88	7,88	7,88	7,88
Çimento	CEM I	525	525	525	525	-	-
	CEM II	-	-	-	-	525	525
Doğal agregalar	8-12,5 mm	228	-	227	-	228	-
	4-8 mm	304	-	303	-	304	-
	2-4 mm	274	265	-	-	274	265
	0-2 mm	714	692	711	688	714	692
	8-12,5 mm	-	221	-	220	-	221
GDGA’lar	4-8 mm	-	295	-	293	-	295
	2-4 mm	-	-	272	263	-	-

Beton karıştırma yöntemi

Tüm karışımlarda su/çimento oranı sabit ve 0,38’e eşit tutulmuştur. Tüm karışımlarda doğal agregalar kuru yüzey doygun (SSD) formunda kullanılmıştır. Serbest su içeriğini sabit tutmak ve GDGA tarafından emilen suyu telafi etmek için, GDGA’nın 24 saatlik su emmesinin %50’si su karışımında eklenmiştir. Karışım yapılırken,

- 1) sırasıyla önce agregalar mikserde 1 dakika,
- 2) çimento ilave edilerek 1 dakika,
- 3) karışım suyunun %50’si eklenerek 2 dakika ve son olarak ise
- 4) %50 kalan suyu %1,5 oranında akışkanlaştırıcı ile birleştirerek karışıma ilave edilmiş 3 dakika daha karıştırılmıştır.

Hazırlanan taze beton karışımı ilgili kalıplara yerleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler 1 günlük kalıpta 20-23°C’de ve üzerileri nemli bezle örtülerek bekletildikten sonra 28. güne kadar standart su küründe bekletilmişlerdir. Fakat bazı deneylere uygulanan yöntemler farklılık arz etmektedir. Sonraki bölümde detaylandırılmıştır.

Beton üzerine yapılmış deneyler

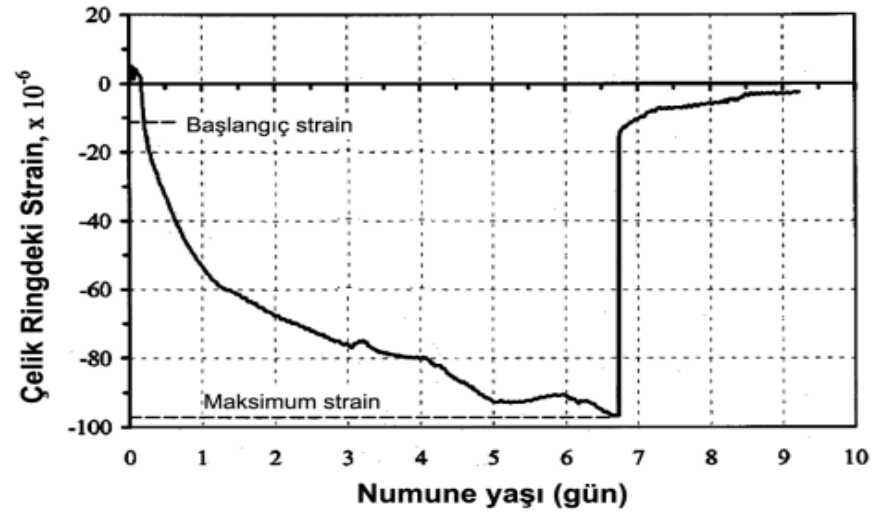
Ring test

Kısıtlanmış rötre, ring test yöntemi ile ölçülmektedir. Bu testte beton bir metal halkanın etrafına yerleştirilir ve zamanla beton büzölmeye başladığında metal halka betonun büzölmesini engeller. Sonuç olarak, beton ringde/halkada çekme gerilmesi oluşur ve betonun çatlamasına neden olur. Tersine, metal ringde basınç gerilimi oluşur.

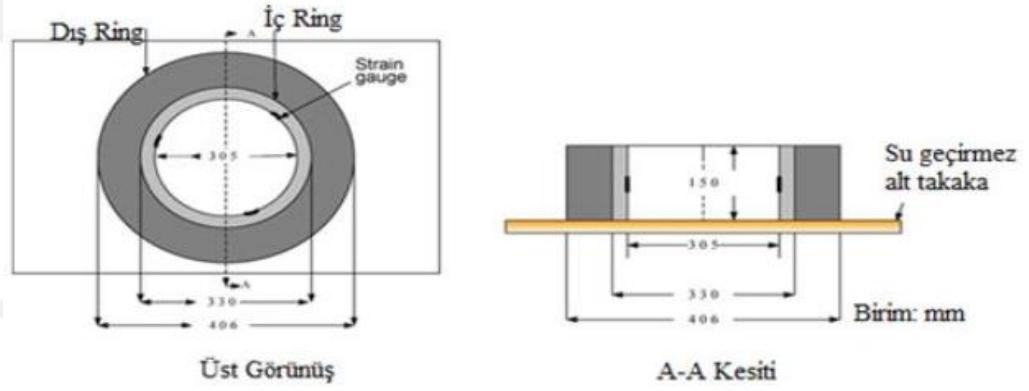
Yaşa göre metal ringdeki basınç gerilmesindeki artış, metal ringe takılan strain gaugeler tarafından kaydedilen gerinimdeki artışla yansıtılır. Çatlama, bir beton halkada yaratılan maksimum çevresel çekme gerilimi betonun çekme dayanımını aştığında başlar. Daha sonra çatlama meydana geldiğinde betondaki çekme gerilmesi serbest kalır ve betonun metal ring üzerine uyguladığı basınç ortadan kalkar ve sonuç olarak metal ringdeki basınç gerilmesinde keskin bir düşüş olur ve bu da strain gaugeler tarafından kaydedilen gerinim ani düşüşle yansıtılır. Bu nedenle, çatlama yaşı ASTM C1581/C1581M-16 (ASTM C1581, 2016) tarafından önerilen sınırlandırılmış ring testinde çatlak tespiti için kullanılan tekniğin aynısı olan ölçülen gerinim düşüşünden belirlenebilir. Şekil 31, veri toplama sistemi kullanılarak dairesel bir ringden kaydedilen gerinimin grafiksel bir temsiliğini göstermektedir.

Bu çalışmada, Şekil 32'de gösterilen boyutlara sahip ring kalıplar kullanılmıştır. Her karışımdan bir ring numunesi üretilmiş ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde metal halkanın iç yüzeyine eşit mesafeli üç strain gauge (gerinim ölçer) yapıştırılmıştır. Bu strain gaugelerden biri ringin iç yüzeyine dikey, diğerleri yatay olarak takılmıştır. Dikey strain gauge, sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan birim gerinimleri tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu değişiklikler, hesaplamalarda diğer strain gaugelerden elde edilen değerleri düzeltmek için kullanılır. Daha sonra, metal ringin iç yüzeyinin çevresel gerilimini sürekli olarak kaydetmek için bir veri toplama sistemine bağlanmıştır (Şekil 33).

Ring deneyinde, maksimum agrega tane çapı 12,5 mm sahip olan beton karışımları kullanılmıştır. Önce ring kalıbı yağlanmış, daha sonra taze beton kalıp içinde dökölerek ve 2-3 tabaka halinde şişlenerek ve tokmaklanarak yerleştirilmiştir. Daha sonra betonun nemini kaybetmemesi için numunenin üst kısmı dış ring açılana kadar nemli bir bezle kapatılmıştır. 24 saat sonra dış ring açılarak numune 6 gün daha (betonun kalıba dökölmesinden itibaren 7 gün) nemli bir bezle 23°C sıcaklıkta kür işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 33). 7 gün sonra nemli bez çıkarılarak 23°C sıcaklıkta ve laboratuvar koşullarında beton çatlayıncaya kadar havaya maruz bırakılmıştır.



Şekil 31. Bir beton ringde çatlağın başladığını gösteren ölçümler (ASTM C1581/C1581M-16, (Polat, 2013))



Şekil 32. Ring kalıp boyutları (Polat, R., 2013)



Şekil 33. Ring test sistem görüntüsü

Basınç dayanımı

Basınç dayanımı deneyi için maksimum tane çapı 8 mm olan karışım grubundan kullanılmıştır. Her karışım için taze betondan 50x50x50 mm boyutlarında toplam 24 adet küp numune üretilerek (Şekil 34), 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve 28 güne kadar standart kür yöntemine tabi tutulmuştur. Her karışımdan 3'er numune 7, 28 ve 90 günde basınç dayanımları (TS EN 12390-3, 2019) standardına göre belirlenmiştir. Deneylerde yükleme hızı sabit olarak 0,6 MPa/s ayarlanmıştır. Sonuçlar her grup için üç numunenin aritmetik ortalaması alınarak Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.



Şekil 34. 50x50x50 mm boyutlarda basınç dayanımı için üretilen numuneler

Eğilme deneyi

Eğilme dayanımı için numuneler basınç dayanımları numunelerinin üretiminde kullanılan karışımlardan üretilmiştir. Her karışım için taze betondan 40x40x160 mm boyutlarında 3 adet kiriş numune üretilerek (Şekil 35), 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve 28 güne kadar standart su kürüne tabi tutulmuştur. Her karışımdan 3'er numune TS EN 12390-5 (2010) standartlarına göre yükleme hızı 50 N/s olarak test edilmiştir. Sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir (TS EN 12390-5, 2019).



Şekil 35. 40x40x160 mm boyutlarda eğilme dayanımı için üretilen numuneler

Pull out test

Pull out test numuneleri üretmek için d_{maks} : 12,5 mm olan beton karışımı kullanılmıştır. Taze beton, ortasına çapı 10 mm boyu 30 cm olan donatı yerleştirilmiş 100x200 mm'lik silindirik kalıplara dökülmüştür. İlk önce, beton ve donatı arasındaki aderans boyunun silindirik numune yüksekliğine eşit (20 cm) olarak düşünülmüştür. Numuneler standart kür koşullar altında 28 güne kadar kür havuzuna bırakılmıştır. 28 gün sonra numuneler test edilmiştir. Numunenin merkezine gömülü donatı, bir donatı çekme test makinesi ile (Servo Hidrolik Üiversal Test) 1 KN/s hızla teste tabi tutulmuştur. Betonun dayanımının yüksek olması ve

aderans boyunun uzun olması nedeniyle, beton-donatı arasında kayma nedeniyle donatı betondan çıkmadan veya beton numunesi kırılmadan önce, uygulanan yük donatıların nihai çekme gerilmesini aşmış ve donatılar kopmuştur. Dolayısıyla aderans dayanımı tespit edilememiş ve karşılaştırılamamıştır. Deneylerin yenilenmesine karar verilmiştir.

İkinci kez donatı çapı 16 mm ve donatı ile beton arasındaki aderans uzunluğu yaklaşık 6d (100 mm) olarak belirlenmiştir. Donatı boyunun geri kalanı, betonla temas etmeyecek şekilde Şekil 36'da gösterildiği gibi plastik borunun içine yerleştirilmiştir. Daha sonra aynı beton karışımı prosedürü ile numuneler yeniden üretilmiştir. Deneyde aderans dayanımını belirlemek için aşağıdaki denklemi kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\tau = \frac{P_u}{\pi d_b l_d}$$

Burada P_u maksimum çekme yükü, d_b donatı çapı ve l_d gömülü donatı uzunluğudur. Sonuçlar, Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

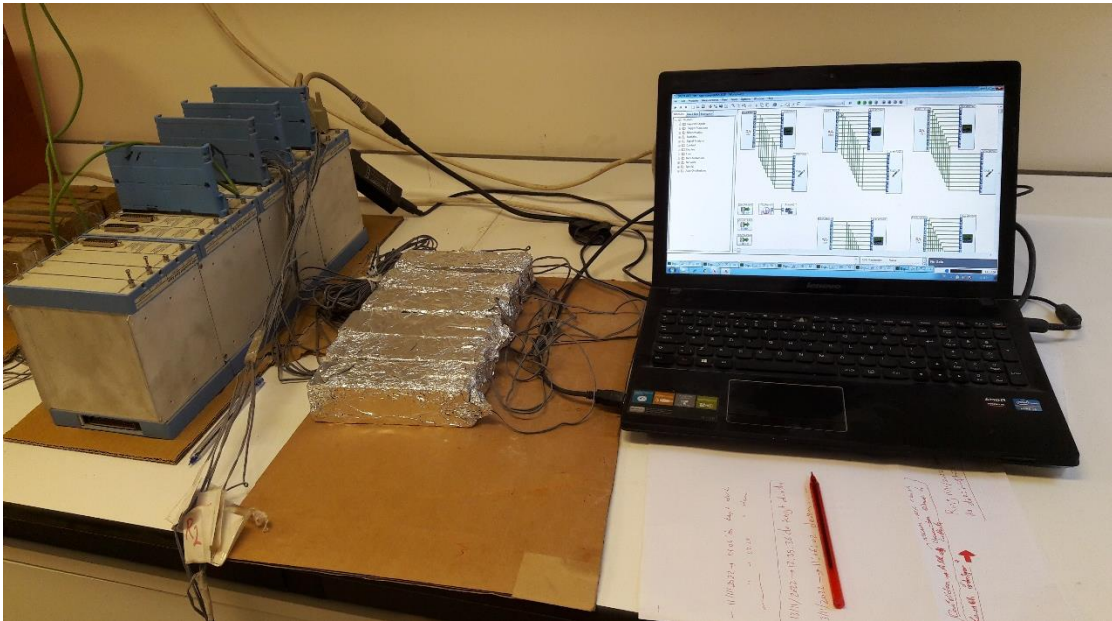


Şekil 36. (a) Pull out numuneleri için hazırlanmış donatılar (b) Üretilmiş pull out testi numuneleri ve (c) Pull out testi düzeneği

Boy değişimi

Kontrollü sıcaklık ve nem ile laboratuvar koşullarına yerleştirilen sertleşmiş beton numunelerinde, uygulanan kuvvet veya sıcaklık değişimi dışında çeşitli nedenlerle betonda

hacim genleşmesi veya büzülmesi meydana gelir. Betonda meydana gelebilecek bu tür boyuna değişimler LVDT'ler, karşılaştırıcılar, gerinim ölçerler veya lazerler kullanılarak ölçülebilir (Polat 2013). Bu çalışmada, 40x40x160 mm beton numunelerin boy değişimini ölçmek için PL-11-5L gerinim ölçer kullanılmıştır. Gerinim ölçerler beton numunelerin yan yüzey ortasına özel bir yapıştırıcı ile yapıştırılarak veri toplama sistemine bağlanmıştır. Beton numunelerin nem içeriğinin değişmemesi için numuneler ince bir alüminyum folyo ile sarılmıştır (Şekil 37). Gerinim ölçerlerden alınacak veriler DAYSLAB programları yardımıyla veri toplama sistemi aracılığıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Numuneler oda sıcaklığına ulaştıktan sonra ölçümlere başlanmıştır. Tüm ölçümler $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ve $\%50\pm 4$ bağıl nemde laboratuvar koşullarında yapılmıştır.



Şekil 37. DAYSLAB programı ile alınan verilerin bilgisayar ortamında görünümü

Su emme, yoğunluk ve geçirimli boşluk hacmi

50 x 50 x 50 mm boyutlarında numuneler, su emme, yoğunluğu ve geçirimli boşluk hacmi kullanıldı. Test işlemi ASTM C642 standardına göre yapılmıştır. İlk olarak numunelerin kuru kütlelerini belirlemek için numune etüvde 110°C 'de 24 saat süreyle kurutulmuştur. Daha sonra numuneler etüvden alınarak soğutularak ağırlıkları (A) belirlenmiştir. Kurutma, soğutma ve nihai kütlelerin belirlenmesinden sonra, numune en az 36 saat yaklaşık 21°C sıcaklıktaki suya daldırılmıştır. 36 saat sonra numuneler sudan çıkarılmış, numunelerin yüzey nemi havlu ile kurularak kütleleri belirlenmiş ve bu kütle B olarak kaydedilmiştir (ASTM C642, 2001).

Numuneler daha sonra, musluk suyu dolu bir tepsi konularak 5 saat kaynatılmıştır. Daha sonra soğuması için en az 14 saat laboratuvar sıcaklığında bekletilmiştir. Numuneler sudan

Çıkarılmış, yüzey nemleri kuru ve numunelerin kütleleri tayin edilmiştir. Bu kütle C olarak kaydedilmiştir. Numune şekil 38 gibi Arşimet prensibi yöntemiyle su içinde tartılıp ağırlığı D olarak kayıt edilmiştir.

Yukarıda açıklanan prosedürlere göre belirlenen kütle değerlerini kullanarak aşağıdaki hesaplamaları yapılmıştır (ASTM C 642):

$$\text{Daldırma sonrası su emme oranı, (\%)} = \left[\frac{B-A}{A} \right] \times 100$$

$$\text{Daldırma ve kaynatma sonrası su emme oranı, (\%)} = \left[\frac{C-A}{A} \right] \times 100$$

$$\text{Yığın yoğunluğu, kuru, kg/m}^3, \rho_{dr} = \left[\frac{A}{C-D} \right] \times \rho_w$$

$$\text{Daldırma sonrası yığın yoğunluğu, kg/m}^3, \rho_{SSD} = \left[\frac{B}{C-D} \right] \times \rho_w$$

$$\text{Daldırma ve kaynatma sonrası yığın yoğunluğu, kg/m}^3, \rho_{boy} = \left[\frac{C}{C-D} \right] \times \rho_w$$

$$\text{Görünür yoğunluk, kg/m}^3, \rho_{boy} = \left[\frac{A}{A-D} \right] \times \rho_w$$

$$\text{Geçirgen boşluğu hacmi (boşluklar), (\%)} V_{void} = \left[\frac{\rho_{boy} - \rho_{dr}}{\rho_{dr}} \right] \times 100$$

A = fırında kurutulmuş numunenin havadaki kütlesi, g

B = daldırmadan sonra havadaki yüzey kuru numune kütlesi, g

C = daldırma ve kaynatmadan sonra havadaki yüzey kuru numune kütlesi, g

D = Daldırma ve kaynatma işleminden sonra numunenin su içindeki görünen kütlesi, g

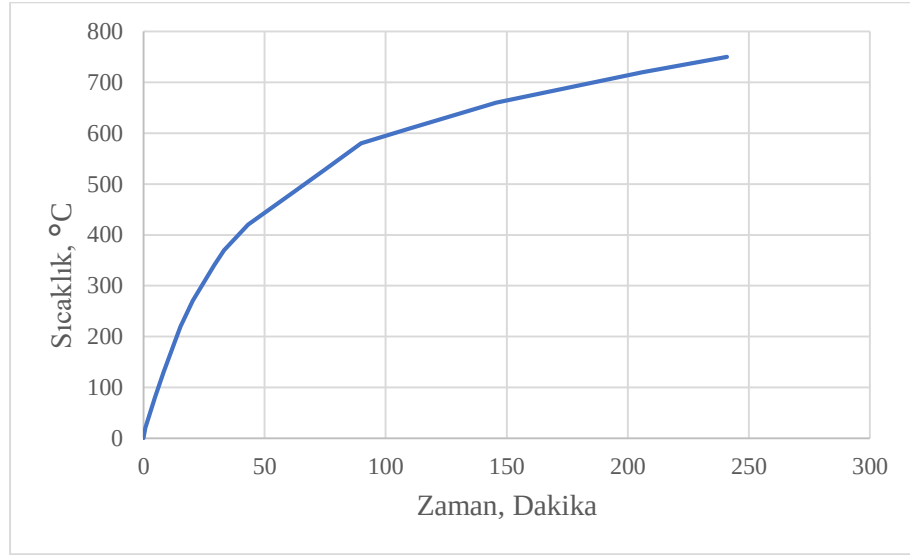
ρ = suyun yoğunluğu = 1 g/cm³=1000 kg/m³



Şekil 38. a) Numunelerin suda kaynatılması b) Numunelerin sudaki ağırlığının belirlenmesi

Yüksek sıcaklık prosedürü

GDGA'lı betonda yüksek sıcaklığın etkisini incelemek için her karışımdan 6'şar numune üretilmiştir. Numuneler önce etüv kurusu hale getirip sonra tartılıp ağırlığı kayıt edilmiştir. Daha sonra ısıtma işlemi için fırına yerleştirilmiştir. Fırın ısıtma hızı Şekil 39'a göre 300 ve 600°C sıcaklığa ulaşincaya kadar ısıtılmış ve belirtilen sıcaklıklarda 2 saat bekletilmiştir (Şekil 39). İki saatin sonunda numunelerin yavaşça soğuması için fırın kapısı 20 saat yarı açık bırakılmıştır. 20 saat sonra ise numuneler fırından çıkarılmış ve tamamen soğuması için 4 saat daha laboratuvar sıcaklığında bekletilmiştir. Soğutulduktan sonra numuneler tartılmıştır. Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası numunelerin basınç dayanımları, UPV değerleri ve ağırlık değişimleri tespit edilmiştir.



Şekil 39. Yüksek sıcaklık fırınının sıcaklık- zaman grafiği

Ağırlık kaybı

Bu çalışmada, numunelerin etüvde 105°C de kurutulmasından sonra ve aşağıdaki denklemi esas alınarak numunelerin ağırlık kaybı hesaplanmıştır.

$$\text{Ağırlık kaybı} = \frac{W1 - W2}{W1} \times 100$$

Burada, W1 ve W2 sırasıyla numunenin yüksek sıcaklığa koymadan önceki ve koyduktan sonraki etüv kuru ağırlığını temsil eder.

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde GDGA ve GDGA ile yapılan betonun üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuç ve bulgular, tablo ve grafikler kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiş ve sonuçlar literatür bulguları ile karşılaştırılmıştır.

Agrega Deneyleri ile İlgili Bulgular

Su emme oranı ve özgül ağırlık

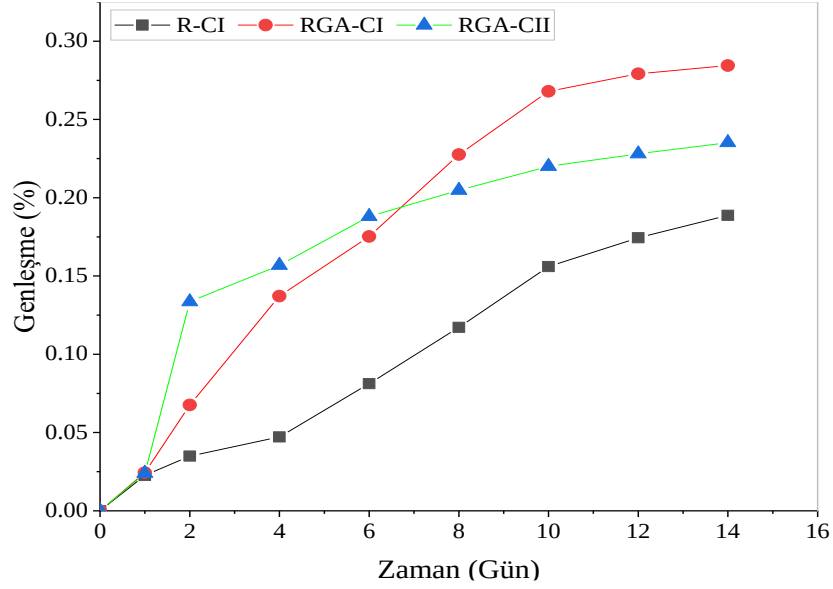
GDGA ve doğal agreganın ortalama özgül ağırlığı ve su emme değerleri TS EN 1097-6'ya (EN, 2013) göre belirlenmiş ve Tablo 12'de gösterilmiştir. GDGA'nın 2-4 mm ve 4-8 mm boyut fraksiyonlarının kuru yüzey doygun özgül ağırlığı (SSD) sırasıyla 2,41 ve 2,43 ve su emme oranları sırasıyla %6,23 ve %6,06 olarak tespit edilmiştir. Doğal agregalara göre aynı tane aralıklarıyla özgül ağırlığı sırasıyla %3 ve %8,65 düşüş ve su emmesi yaklaşık 3,46 ve 3,65 katına çıktığını göstermektedir. GDGA'nın özgül ağırlığının azalması ve yüksek su emmesi, doğal agregaya yapışık geopolimer hamurun gözenekli yapısından kaynaklanmaktadır. Benzer sonuçlar Agrawal ve ark. (Agrawal et al., 2019) tarafından yapılan çalışmada uçucu kül esaslı geopolimer hamurdan geri dönüştürülmüş kumun kuru özgül ağırlığını 2,46 ve su emme miktarını %5,61 elde etmişlerdir. Akbarnezhad et al. ve Mesgari et al. tarafından yapılan çalışmalarda 4,7-6,7 mm, 6,7-9,5 mm ve 9,5-13,2 mm boyutlara sahip GDGA'nın kuru özgül ağırlıklarının sırasıyla 2,2, 2,3 ve 2,35 olduğunu ve su emme değerlerinin ise doğal agregaların su emme değerlerinin sırasıyla 5,0, 2,8 ve 2,7 katı olduğunu bulmuşlardır (doğal agregaların su emmesi %1,9). Ayrıca tane boyutu arttıkça agregaların su emme miktarının azaldığını gözlemlemişlerdir (Akbarnezhad et al., 2015; Mesgari et al., 2020).

Tablo 12. Doğal agregaların ve GDGA'ların fiziksel özellikleri

Özellikler	Doğal agregası (mm)				GDGA (mm)		
	0-2	2-4	4-8	8-12,5	2-4	4-8	8-12,5
Doygun Kuru Yüzey Özgül Ağırlık	2,48	2,48	2,66	2,66	2,41	2,43	2,46
Kuru Özgül Ağırlık	2,44	2,44	2,63	2,61	2,26	2,28	2,29
Görünen Özgül Ağırlık	2,52	2,52	2,75	2,77	2,62	2,7	2,76
Su emme oranı (%)	1,66	1,66	1,84	1,8	6,06	6,23	6,85

Alkali silika reaksiyonu (ASR)

Harç çubuklarının alkali silika reaksiyonu potansiyelinin tespiti amacıyla ölçülen 14 günlük boy değişim diyagramı Şekil 40'de sunulmuştur. Çubuğun genleşme yüzdesi her iki günde komparatör ile boy değişimi ölçülerek tespit edilmiştir.



Şekil 40. 14 günlük harç çubuklarının genleşmesi

14 gün sonra çubukların ölçülen uzunluğundaki değişiklik, kontrol numunesi için %0,116, RGA-CI numunesi için %0,284 ve RGA-CII numunesi için %0,235 olmuştur. Bu, doğal agreganın yalnızca %45'inin GDGA ile ikame edildiği zamandır. Doğal agregayı GDGA ile daha yüksek oranlarda değiştirme, genleşme yüzdesini daha da artırabilir.

Görüldüğü gibi CEM II çimento ile yapılan numune CEM I çimento ile yapılan numuneye göre daha az genleşme göstermiştir. CEM II çimento ile yapılan numunenin daha az genleşmesi, CEM II çimentonun puzolanik içeriğine bağlanabilir. Puzolanik malzemeler hidroksil, potasyum ve sodyum iyonlarının konsantrasyonunu tüketilerek azalttırır ve böylece alkali silika reaksiyonunu yavaşlatmaktadır (Shumuye & Jun, 2018).

TS 13516'ya göre değerlendirildiğinde geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların betonda kullanılması ASR açısından zararlı olduğu söylenebilir. Çünkü, TS 13516 standardına göre %0,10'dan daha az olan genleşmeler zararsız, %0,20'den daha fazla olan genleşmeler potansiyel zararlı ve %0,10 ile %0,20 arasında olan genleşmeler hem zararlı hem zararsız denilebilir. TS 13516 standardı, belirtilen aralığın üzerinde bir genleşme gözlemlendiğinde, genleşmenin gerçekten de alkali-silika reaksiyonundan kaynaklandığını doğrulamak için ek bilgi edinilmesini önerir. Bu tür ek bilgilerin kaynakları şunları içerir: 1) aktif bileşenlerin mevcut olup olmadığını belirlemek için TS 10088 EN 932-3 (ASTM C295/C295M) agreganın petrografik analizi, 2) Alkali silika reaksiyonu sonucu oluşan maddeleri tayin etmek için numunelerin deneylerden sonra petrografik muayenesi (ASTM C856), 3) Uygun olduğunda arazi/saha kontrol ve bakım kayıtları (ASTM C1260, 1994; TS13516, 2017). Hazırlanmış harç çubuğu testlerinin sonuçları ve ek bilgiler, agreganın potansiyel olarak zararlı bir şekilde reaktif olduğunu gösteriyorsa, düşük alkali içerikli Portland çimentosu, mineral katkıları veya

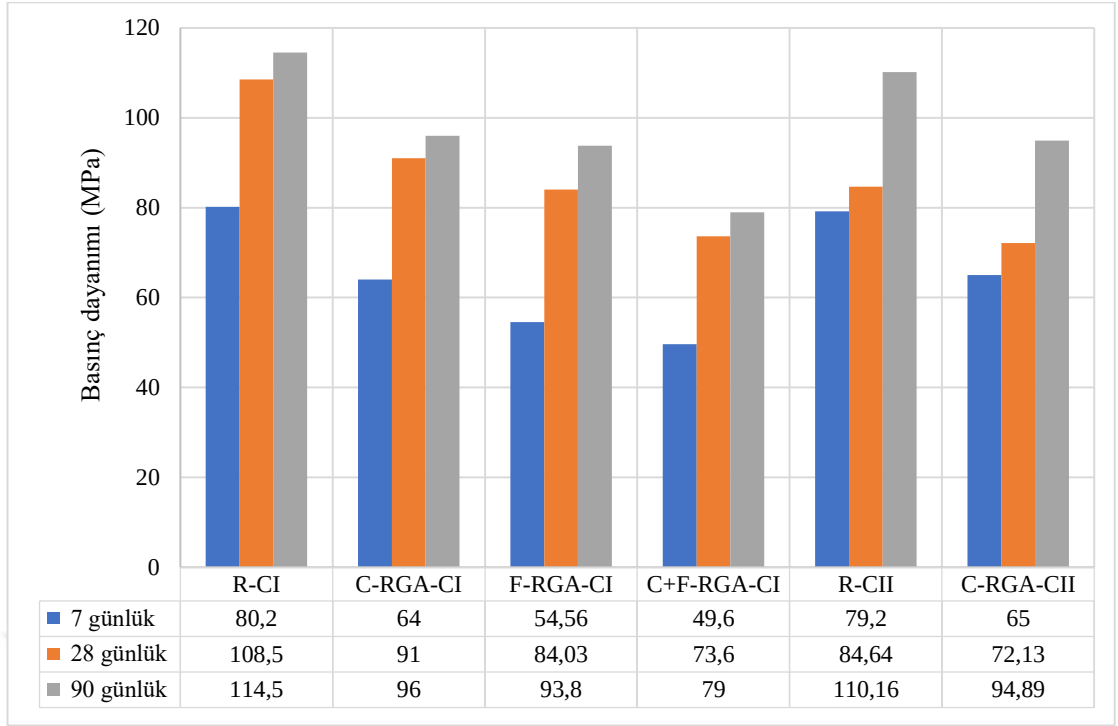
öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu gibi genleşmeyi azaltıcı önlemlerin uygulanması değerlendirilmelidir (ASTM C1260, 1994; TS13516, 2017).

Beton Deneyleri ile İlgili Bulgular

Basınç dayanımı

7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımının sonuçları Şekil 41'de gösterilmektedir. Farklı çimento ve farklı çapta GDGA içeren tüm karışımlarının basınç dayanımlarının kontrol karışımlarına göre daha düşük olduğu görülmektedir. Kontrol numunenin 28 günlük basınç dayanımı 109 MPa iken, C-RGA-CI, F-RGA-CI ve C+F-RGA-CI karışımların basınç dayanımı sırasıyla 91 MPa, 84 MPa ve 73,6 MPa olmuştur. CEM II çimentosu karışımlarında, kontrol karışımının 28 günlük basınç dayanımı 84,6 MPa ve C-RGA-CII karışımı 72 MPa olmuştur. 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları kontrol karışımına göre düşüş göstermektedir. GDGA betonlarının basınç dayanımındaki düşüşü, düşük yoğunluk, yüksek su emme ve GDGA'nın zayıf mekanik performansı gibi nedenlere bağlanabilir. Ayrıca tüm karışımlardaki basınç dayanımının zamanla arttığı ve 90 günlük numunelerin 28 ve 7 günlük numunelere daha yüksek basınç dayanımı gösterdiği görülmektedir.

CEM II ile yapılan karışımlarda, basınç dayanımında en büyük artış 28 ile 90 günlük yaşlar arasında meydana gelmiştir. CEM II karışımlarında 7 ve 28 günlük basınç dayanımı CEM I ile yapılan karışımlarından daha düşükken, 90 günlük basınç dayanım CEM I karışımlara yaklaşık eşit olmuştur. Bunun nedeni, CEM II çimentosunun bileşiminde puzolan içermesidir ve puzolan çimentonun hidrasyon sürecini yavaşlatarak 28 günde nispeten düşük basınç dayanımına neden olmasıdır. Puzolan içeren çimentolarda dayanım kazanma hızı yavaştır ancak dayanım gelişimi uzun süre devam eder.

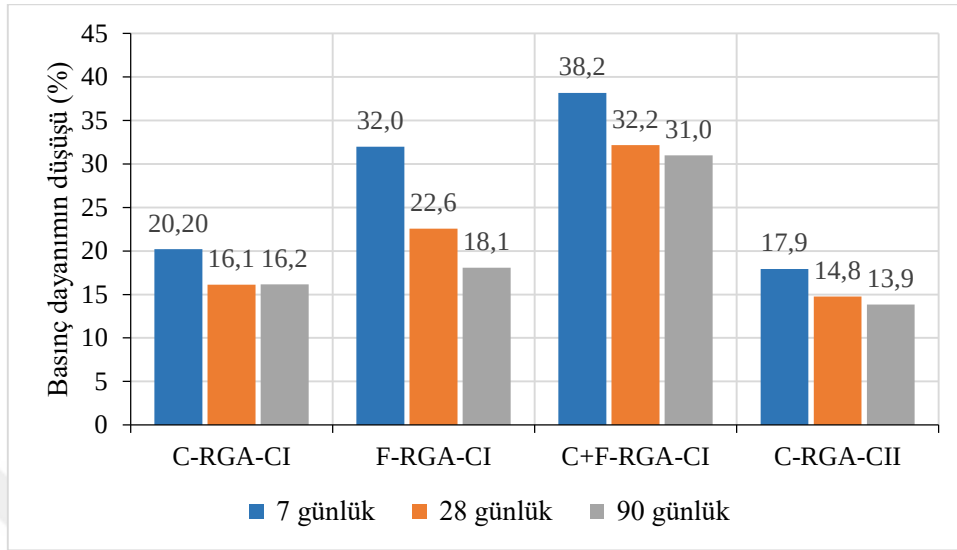


Şekil 41. 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları

Şekil 42, kontrol numunelerine göre GDGA'lı karışımların basınç dayanımlarının düşüş oranını göstermektedir. En yüksek basınç dayanımı düşüşü C+F-RGA-CI karışımında, ikinci olarak F-RGA-CI karışımında meydana gelmektedir. CEM I karışımlarında en düşük dayanım düşüşünü ise C-RGA-CI karışımı göstermektedir. C-RGA-CI karışımında basınç dayanımındaki düşüş oranı, F-RGA-CI karışımından daha az olmuştur. Bu durum, iri taneli GDGA'nın ince taneli GDGA'ya göre daha iyi performans sergilediğini göstermektedir. Pedro'nun normal betondan geri dönüştürülmüş agrega (GDA) ile yapılan beton üzerinde yaptığı çalışmalarda, ince taneli GDA'nın iri taneli GDA'ya kıyasla daha düşük performans gösterdiği gözlemlenmiştir. %100 değiştirme seviyesi için, basınç dayanımındaki azalma iri taneli GDA ve ince taneli GDA için sırasıyla %5,4-%7,9 ve %9,9-%15,3 olmuştur (Pedro et al., 2017). İri taneli GDGA ince taneli GDGA'dan daha pürüzlü yüzeyi ve köşeli şeklini sahip olması için çimento ile iri GDGA agregası arasında daha iyi aderans ve kenetlenmesini sağlar (Behera et al., 2014; Sajan et al., 2022). Bu nedenle C-RGA-CI, F-RGA-CI'a göre daha yüksek basınç dayanımı göstermektedir.

GDGA karışımlarının basınç dayanımındaki düşüş oranı, erken yaşlarda daha fazladır ve numunelerin yaşı ilerledikçe bu düşüş oranı azalmaktadır. Örneğin F+C-RGA-CI 7 günlük basınç dayanımında %38,2 düşüş gösterirken, 28 ve 90 günlük basınç dayanımında sırasıyla 32,2 ve %31 oranında düşüş göstermiştir. Böyle bir sonuç Gunasekara et al. ve Agrawal et al. tarafından yapılan çalışmalarda da gözlemlenmiştir. Bunun olası sebebini, geopolimer agrega

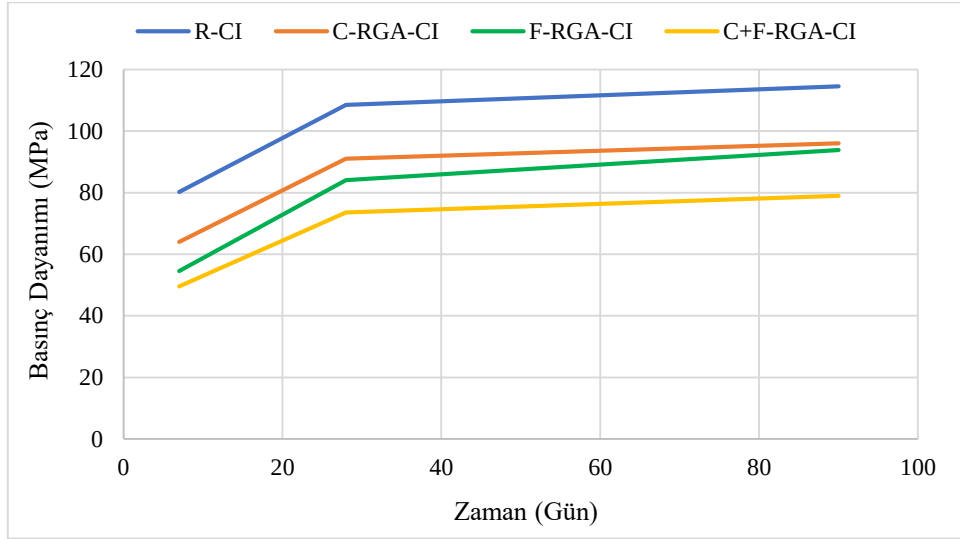
tanelerinde bulunan ve kalsiyum hidroksit gibi çimento hidrasyon ürünü ile reaksiyona girerek ve uzun vadeli dayanıma katkıda bulunmuş olabilecek reaksiyona girmemiş uçucu kül parçacıklarına bağlamışlardır (Agrawal et al., 2019).



Şekil 42. GDGA'lı karışımların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının kontrol karışımına göre azalma oranı

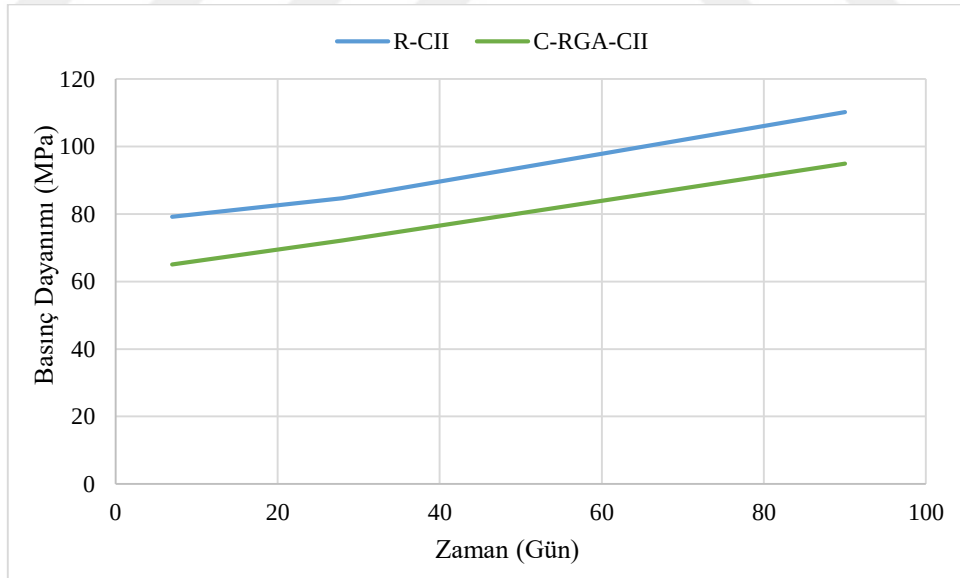
Chamila et al. (2018) yaptığı çalışmada, geopolimer hamurdan üretilmiş agrega ile yapılan betonun 90 günlük basınç dayanımının doğal agrega içeren betona göre %26 azaldığını, ancak doğal agregalı betona göre zamanla dayanım kazanım hızının daha arttığını göstermektedir (Chamila et al., 2018). Agrawal et al. (2019) çalışmalarında uçucu kül esaslı ince taneli GDGA ile üretilen betonun 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanımını doğal kum ile üretilen betonun dayanımının sırasıyla %81,75, %95,54 ve %97,32'si olarak belirlemişlerdir (Agrawal et al., 2019). Ayrıca benzer bir eğilim, Pedro'nun normal betondan geri dönüştürülmüş agrega (GDA) ile yapılan betonla ilgili çalışmalarında da gözlemlenmiştir (Pedro et al., 2017).

Bu hususta önemli olan nokta ince taneli GDGA ile yapılan F-RGA-CI karışımında bu işlemin diğer GDGA'lı karışımlara göre daha belirgin olmasıdır. Yani F-RGA-CI karışımında zamanla dayanım kazanma hızı diğer CEM I karışımlara göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. CEM I çimento ile yapılan karışımların zamanla basınç dayanımının artışı Şekil 43'te gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kontrol, C-RGA-CI ve C+F-RGA-CI karışımlarının basınç dayanımları sırasıyla 7 ile 28 gün arasında ortalama 1,35 MPa/gün, 1,28 MPa/gün ve 1,14 MPa/gün, 28 ile 90 gün arasında 0,1 MPa/gün, 0,08 MPa/gün ve 0,09 MPa/gün olarak değişirken, F-RGA-CI karışım aynı yaş aralıklarında sırasıyla 1,4 MPa/gün ve 0,17 MPa/gün dayanım kazanma hızı göstermiştir.



Şekil 43. CEM I karışımlarının zamanla basınç dayanımının artışı

CEM II çimento ile yapılan karışımları için zamana bağlı basınç dayanımı gelişimi Şekil 44'te gösterilmiştir. Kontrol ve C-RGA-CII karışımlarının basınç dayanımları sırasıyla 7 ile 28 gün arasında ortalama 0,26 MPa/gün ve 0,34 MPa/gün; 28 ile 90 gün arasında 0,43 MPa/gün ve 0,38 MPa/gün dayanım kazanma hızı göstermiştir. Eğer kontrol ve C-RGA-CII karışımları için 7 ile 90 gün arasında ortalama olarak hesaplanmış dayanım artış hızı sırasıyla 0,35 MPa/gün ve 0,36 MPa/gün olarak hesaplanmıştır.



Şekil 44. CEM II karışımlarının zamanla basınç dayanımının artışı

Bu nedenle ince taneli GDGA ile yapılan betonun küçük yaşlarda iri taneli GDGA ile yapılan betona göre daha düşük mekanik performans göstermesine rağmen ileri yaşlarda bu farkın azaldığı ve iri taneli GDGA ile yapılan betonla yaklaşık aynı mekanik performansı gösterdiği sonucuna varılmıştır. İri GDGA betona kıyasla ince taneli GDGA betonun

performansındaki bu gelişme, sonraki bölümlerde gelecek olan boy değişimi ve su emme testlerinin sonuçlarında da görülebilmektedir.

Aynı miktarda iri taneli GDGA ve farklı çimentolarla yapılan C-RGA-CI ve C-RGA-CII karışımlarını karşılaştırsak; C-RGA-CII karışım kontrol karışımına (R-CII) kıyasla basınç dayanımındaki düşüşün, C-RGA-CI karışım kontrol karışımına (R-CI) kıyasla dayanım düşüşünden daha az olduğunu görebiliriz.

Literatüre bakıldığında hem GDGA ile yapılan betonlarda hem de GDA ile yapılan betonlarda benzer sonuçlar görülmektedir.

Chaliasou, üç (standart geopolimer karışım, yüksek alkali, yüksek silika) uçucu kül-yüksek fırın cüruf bazlı geopolimer beton karışımı numunelerinden GDGA elde etmiştir. Elde edilen agregaları, doğal iri agrega yerine %20 oranında ikame edilerek iki grup PÇ beton karışımında kullanılmıştır. Biri normal, diğeri yüksek dayanımlı beton karışımları grubu tasarlanmıştır. Normal dayanımlı betonda karışımların basınç dayanımları kontrol numuneye göre sırasıyla standart geopolimer GDGA ile yapılan beton, yüksek alkali GDGA ile yapılan beton ve yüksek silika GDGA ile yapılan betonun +%2, -%1 ve +%20 farklılık göstermişken; yüksek dayanımlı betonda sırasıyla +%1, -%31 ve -%21 farklılık göstermiştir (Chaliasou, 2020).

Akbarnezhad et al., GDGA ile yapılan geopolimer beton ile GDA ile yapılan çimento betonu karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sonuçlar, geri kazanılmış agreganın yer değiştirme oranının artmasıyla basınç dayanımının düştüğünü, ancak bu dayanım düşüşünün GDA ile yapılan çimento betonunda daha fazla olduğunu göstermiştir. %100 GDGA kullanılarak üretilen geopolimer betonun basınç dayanımı kontrol numuneye göre %12.9 oranında düşüş gösterirken; %100 GDA kullanılarak üretilen Portland çimento betonun basınç dayanımında %28,1'lik bir azalma gözlemlenmiştir (Akbarnezhad et al., 2015). Mesgari et al. benzer çalışmada aynı ikame oranlarla GDGA ile geopolimer beton ve PÇ beton, GDA ile PÇ beton üreterek basınç dayanımı deney sonuçlarını karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, PÇ betonunda doğal iri agreganın %20'sinin GDGA ile değiştirilmesinin basınç dayanımında %14'lük bir azalmaya neden olduğunu ve doğal iri agreganın %100'ünün GDGA ile değiştirilmesinin basınç dayanımında maksimum yaklaşık %33'lük bir azalma ile sonuçlandığını gösterirken; aynı ikame oranlarıyla GDA ile yapılan PÇ betonun basınç dayanımında sırasıyla %8,2 ve %27,5 düşüş göstermiştir. GDGA betonunun dayanımının GDA ile üretilen betona göre daha fazla düşmesinin nedenini, GDGA ile çimento bağlayıcısı arasındaki uyumun GDA'ya göre daha düşük olduğunu belirtmişlerdir (Mesgari et al., 2020).

GDA ile yapılan betonlar bağlamında, GDA ile %100 ikame edilen doğal agregalı betona kıyasla basınç dayanımındaki azalmanın %30'a kadar olduğu yaygın olarak bildirilmiştir (Beher et al., 2014; Hansen & Narud, 1983). Benzer şekilde, bazı araştırmacılar, %100 GDA ikamesi ile dayanım azalmasının %12 ile %25 arasında olduğu sonucuna varmışlardır (Beher et al., 2014). Diğer bazı çalışmalarda, %100 GDA ile yapılan betonun basınç dayanımının, geleneksel betonun basınç dayanımının %60'ı (Bairagi et al., 1993), %76'sı (Katz, 2003) olduğu bildirilmiştir. Pedro ve ark. çalışmalarında, doğal agregaların %100 GDA ile değiştirilmesi, basınç dayanımını %16-14,9 oranında düşüş göstermiştir (Pedro et al., 2017).

Önemli olan nokta, GDGA'nın çimento betonundaki performansını GDA ile karşılaştırıldığında, GDGA'nın betonda yer değiştirmesinin basınç dayanımında daha büyük bir azalmaya neden olduğunu görebilmektedir.

Örneğin mevcut çalışmanın sonuçları Pedro'nun çalışması ile karşılaştırıldığında; doğal agregalar GDA ile ikame edildiğinde, basınç dayanımında %16'lık bir azalma gösterirken, bu çalışmada betonda iri ve ince doğal agregalar GDGA ile ikame edildiğinde ise basınç dayanımında %32,2'lik bir düşüş göstermiştir. Ancak 4-8 mm ve 2-4 mm boyutlarına sahip iri ve ince agregaların ikame edilmesi, betonda kullanılan toplam agreganın sadece %45'ini oluşturmaktadır. Agregaların %55'i 0-2 mm kum olup, tüm karışımlarda doğal kum kullanılmıştır.

Beton heterojen bir malzeme olduğu için test sonuçlarındaki sapma ve hata yüzdesi çok yüksektir ve birçok parametre sonuçları etkilenmektedir. Bu nedenle kesin bir fikir vermek mümkün olmamakla birlikte daha önce Akbarnezhad ve ark. tarafından da belirtildiği gibi GDGA'nın GDA'ya oranla daha fazla dayanım düşüşüne sebep olmasının nedenlerinden biri, GDGA ile çimento hamuru arasındaki uyumun GDA ile çimento hamuru arasındaki uyuma göre daha düşük olmasıdır.

GDGA ile yapılan beton, GDA ile yapılan betona göre basınç dayanımında fazla düşüş gösterse de yine de çimento betonunda kullanılabilir. Bu çalışmada betonda iri ve ince agreganın eş zamanlı olarak yer değiştirmesi ile 7, 28 ve 90 günlük dayanım sırasıyla 43,6, 73,6 ve 79 MPa'lara ulaşmıştır. Gösterdiği basınç dayanımları mühendislik açısından kabul edilebilir bir dayanımdır.

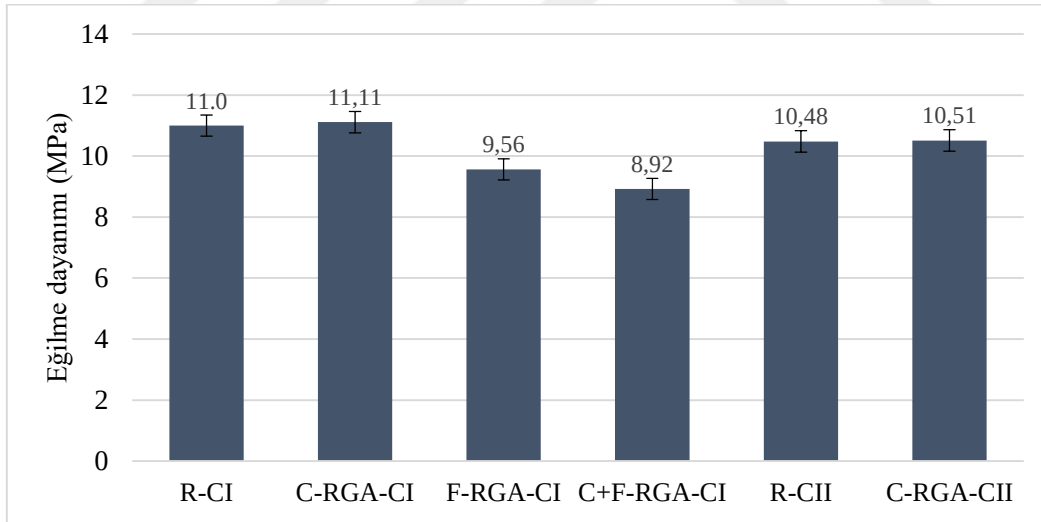
Eğilme dayanımı

GDGA içeren karışımların ve kontrol karışımların 28 günlük eğilme dayanımları Şekil 45'te göstermektedir. Şekilde görüldüğü üzere C-RGA-CI karışımı, kontrol karışımına kıyasla

eğilme dayanımında hafif bir artış (%1) göstermektedir. Aynı zamanda F-RGA-CI karışımın eğilme dayanımı, kontrol beton karışımına göre %13,1 oranında azalma göstermektedir. Her iki karışım da GDGA miktarı aynı oranda kullanılmıştır. Bu, ince taneli GDGA'nın betonda kullanılmasının, iri taneli GDGA'ya kıyasla düşük kalitesi nedeniyle dayanımda daha fazla düşüşe neden olduğunu göstermektedir. Pürüzlü yüzeyi ve köşeli şekli nedeniyle geri dönüştürülmüş iri agrega, çimento ile GDGA agregası arasında daha iyi yapışma ve kilitleme sağlar ve kırılma anında daha fazla enerji tüketmektedir.

F+C-RGA-CI karışımı, %18,9'luk bir düşüşle, kontrol karışımına kıyasla eğilme dayanımında en büyük düşüşü göstermiştir. Bunun nedeni, iri ve ince doğal agregaların eş zamanlı olarak GDGA ile yer değiştirmesinin, betondaki birincil doğal agregadaki yapışmış geopolimer hamuru yüzdesini artırması ve eğilme dayanımında daha büyük bir azalmaya neden olmasıdır.

CEM II çimentolu karışımlar, CEM I ile yapılan muadillerine göre düşük eğilme dayanımı göstermiştir. Karışım C-RGA-CII, kontrol karışımına (R-CII) kıyasla eşit eğilme dayanımı göstermiştir. Görüldüğü gibi iri agrega hem CEM I çimentolu karışımlarda hem de CEM II çimentolu karışımlarda daha iyi performans göstermektedir.



Şekil 45. Eğilme dayanımının test sonuçları

Tüm karışımlarda GDGA kullanımının eğilme dayanımından daha çok basınç dayanımını azalttığı görülmektedir. Şöyle ki, F+C-RGA-CI karışımı 28 günlük eğilme dayanımında kontrol karışıma göre %18,9'luk bir azalma gösterirken basınç dayanımında %32,2'lik bir azalma göstermiştir. Bunun nedeni, beton prizma numunesinin uzunluğu boyunca daha büyük boyutlarda kaba agregaların yerleştirilmesine atfedilmiştir ç Mesgari et al., çalışmalarında hem GDGA içeren betonlarda ve hem GDA içeren betonlarda benzer eğilim

gözlemlemiştir. %100 iri taneli GDGA ile yapılan normal betonun eğilme dayanımında %21 gösterirken, basınç dayanımında %33'lük bir düşüş meydana gelmiştir. Ayrıca GDGA ile yapılan betonda basınç dayanımında düşüşü GDA ile yapılan betona göre fazla olduğunu bildirmiştir.

Zhu et al. (2020) yaptığı çalışmada, dere kumu ince taneli GDGA ile %100 ikame edilmiş karışımlarda eğilme dayanımında kontrol numunelerine göre %19,5 oranlarında düşüş olduğunu ifade etmiştir. Chen et al. (2002), bazı kırık kiremit ve tuğlalar içeren GDA ile üretilen betonun eğilme dayanımının geleneksel betona göre %9 ile %22 oranında azaldığını belirlemiştir. Sonuç olarak, bu çalışma sonuçları literatürdeki bulgularla uymaktadır.

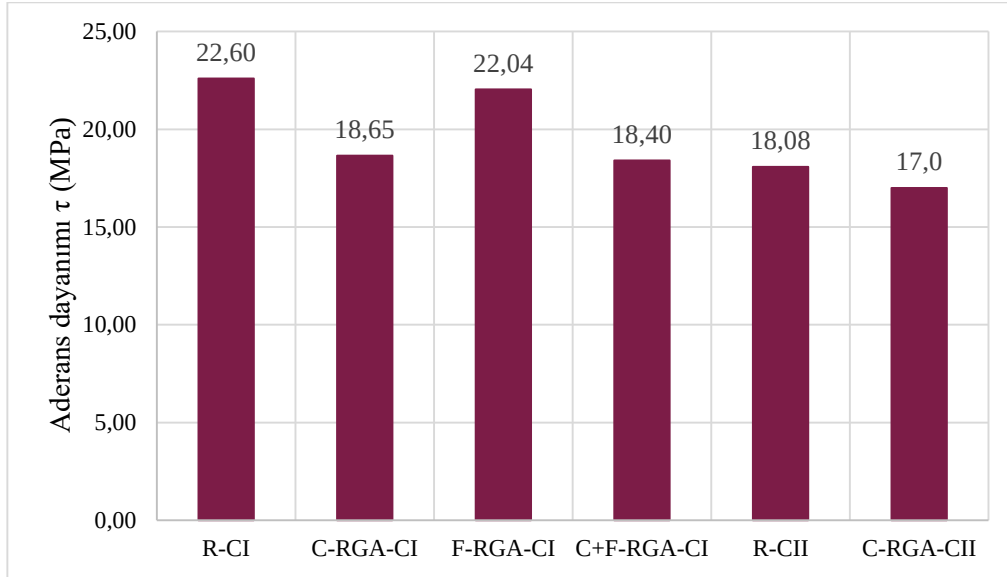
Aderans dayanımı

Aderans dayanımları, 28 günlük 100x200 mm boyutlarındaki silindirik numuneler test edilerek belirlenmiştir. Ayrıca, pull out testi için kullanılan karışımların basınç dayanımları, 50x50x50 mm kübik numuneler test edilerek ayrı ayrı belirlenmiştir. Testlerin sonuçları Tablo 13 ve Şekil 46'da verilmiştir. Şekilde GDGA içerikli tüm karışımlarda genel olarak aderans dayanımının bir miktar düştüğü görülmektedir. F-RGA-CI karışımında kontrol karışımına göre önemli bir azalma görülmemesine rağmen, C-RGA-CI ve F+C-RGA-CI karışımlarında, kontrol karışımına göre sırasıyla %17 ve %18,6 azalma ortaya çıkmıştır. Karışım C-RGA-CI ve F+C-RGA-CI'nin F-RGA-CI 'e kıyasla daha fazla dayanım düşüşü, karışım F-RGA-CI 'e kıyasla GDGA içeriği daha yüksek olmasıdır. Basınç dayanımı deneylerindeki C-RGA-CI ve F-RGA-CI karışımlarında, ince ve iri taneli GDGA içeriği aynı seviyedeyken, karışım C-RGA-CI daha iyi performans göstermiştir.

Aynı zamanda CEM II karışımlarında, C-RGA-CII karışım kontrol numunesine göre %6'lık bir azalma göstermektedir. Bu durum puzolanik bileşimli çimentonun geri dönüşümlü agregalı betonun aderans dayanımını artırmada olumlu etkisi olduğunu göstermektedir.

Tablo 13. Karışımların aderans dayanımları

Karışım kodu	Basınç dayanımı, f'_c (MPa)	Yük (KN)	Aderans dayanımı (MPa)	Aderans dayanımı/ $\sqrt{f'_c}$
R-CI	93,0	113,5	22,60	2,34
C-RGA-CI	66,9	93,73	18,65	2,28
F-RGA-CI	79,7	110,78	22,04	2,47
F+C-RGA-CI	58,3	92,48	18,40	2,41
R-CII	73,0	90,86	18,08	2,12
C-RGA-C II	53,6	85,40	17,00	2,34



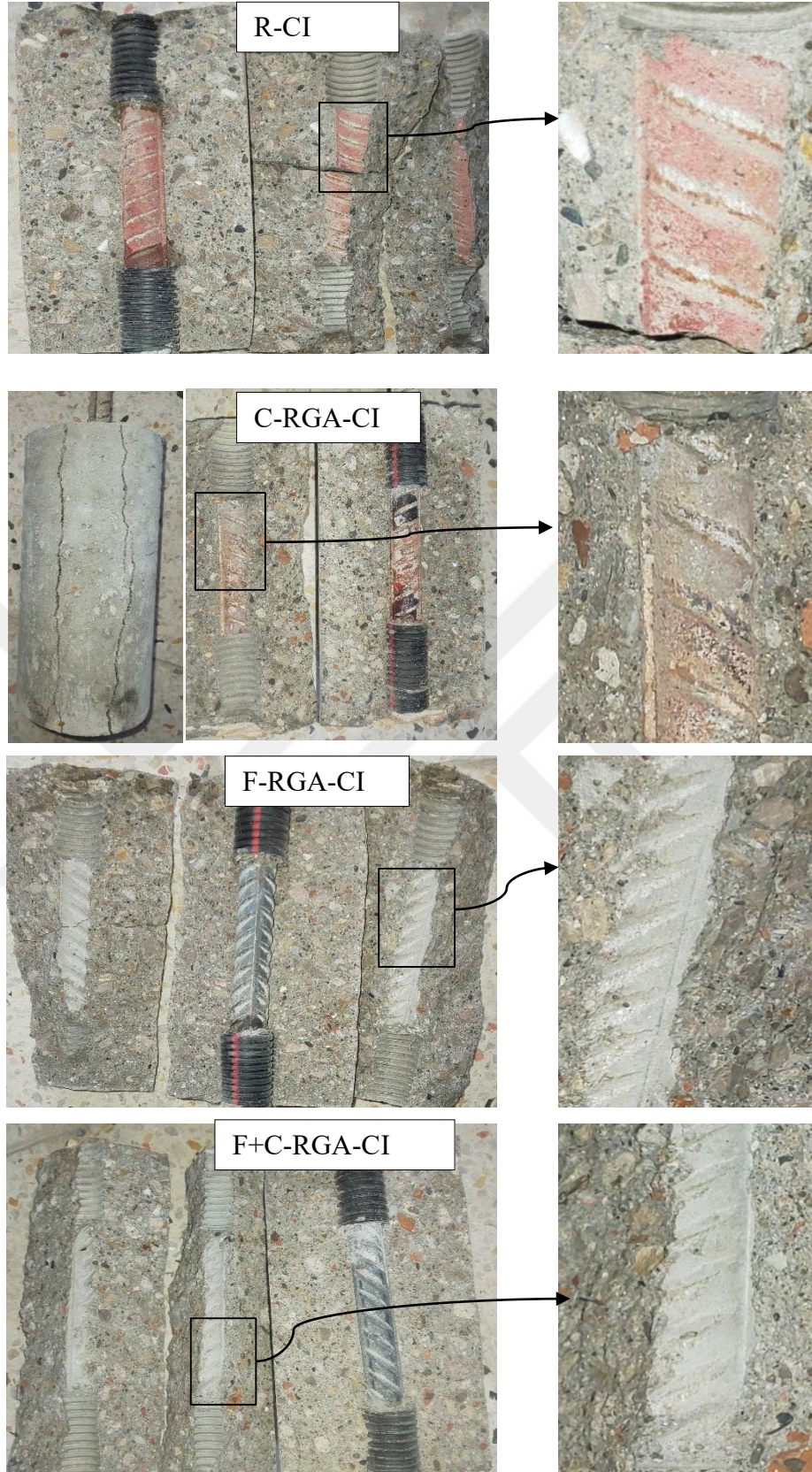
Şekil 46. Karışımların aderans dayanımları

Önceki çalışmalar (Orangun et al., 1977; Wardeh et al., 2017), çelik takviyeli betonun aderans dayanımının, beton basınç dayanımının karekökü dikkate alınarak beton basınç dayanımının bir fonksiyonu olduğunu bildirmiştir CEB-FIB standardında beton numunenin kırılma şekli yarmada ise aderans dayanımı aşağıdaki denklemden hesaplanmıştır.

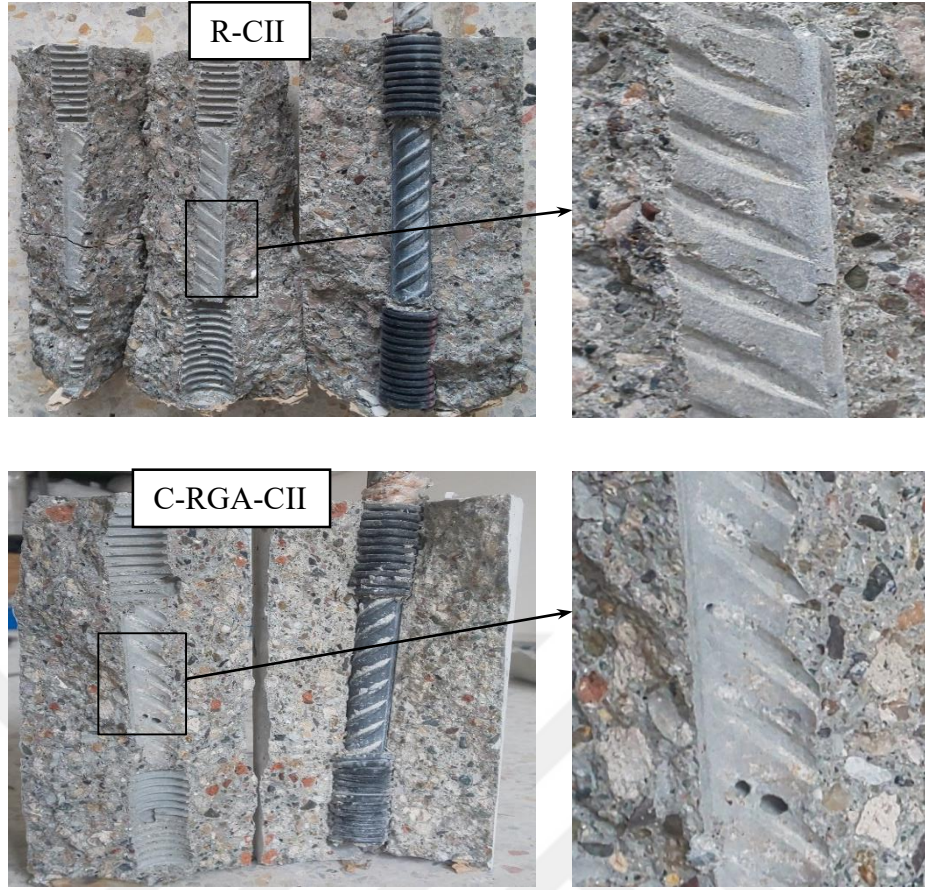
$$\tau_{max} = 2.5\sqrt{f'_c}$$

Bu çalışmada numunelerin kırılma şekli patlama şeklinde gerçekleşmiştir ve Tablo 14'de göre aderans dayanımı, betonun basınç dayanımının karekökünün (f'_c) 2,12 ile 2,47 katı arasında bulunmuştur.

Numunelerin kırılma şekli Şekil 47 ve Şekil 48'de gösterilmiştir. Kırılma deseni açısından tüm numuneler boyuna yönde patlama şeklinde kırılmıştır. R-CI ve F-RGA-CI numunelerde, beton kırılmadan önce çelik donatı akma noktasına ulaşmıştır. Numunelerin geri kalanı, donatı akma noktasına ulaşmadan kırılmıştır. Deney sonrasında numunelerin kırılmış parçaların fotoğrafları çekilerek incelenmiştir. Şekil 45'te ilk olarak donatı ile beton arasında kaymanın meydana geldiği ve donatı üzerindeki nervürler ile kaymalar önlendikten sonra numunenin kırıldığı görülmektedir.



Şekil 47. Pull out test numunelerinin kırılma şekilleri



Şekil 48. Pull out test numuneler kırılma şekilleri

Portland çimentolu betondan geri kazanılan agregalarla yapılan beton alanında yapılan deneysel çalışmalar, GDA'nın ve miktarının aderans dayanımı üzerindeki etkisinin diğer mekanik özelliklerden çok daha düşük olduğunu ortaya koymuştur. GDA içeriğinin beton ve donatı arasındaki aderans üzerinde fazla bir etkisi yoktur. Bununla birlikte, aderans dayanımına katkıda bulunan faktörler, GDA durumunda donatı tipi ve donatı yüzey profilidir (Rao et al., 2007). Xiao et al. GDA içeren betonun farklı tipte donatı ile çekme testi ile aderans davranışını incelemişler ve doğal agregalı betona göre GDA'nın %50 ve %100 ikame seviyesinde düz donatı için sırasıyla %12 ve %6 oranında aderans dayanımının azaldığını ve deforme olmuş donatı için, farklı değiştirme seviyelerinden bağımsız olarak birbirine oldukça benzer olduğunu bildirmişler (Xiao & Falkner, 2007). Muhtemel sebep, nervürlü donatıda aderansın, mekanik ankraj ve sürtünmeden, düz donatıda ise donatı ile beton arasındaki aderanstaki kaynaklanıyor olmasıdır (Beher et al., 2016; Xiao & Falkner, 2007).

Alhawat et al., %100 GDA içeren beton ile 20 mm nervürlü çelik arasındaki aderans dayanımının normal betona göre yaklaşık %11 azaldığını, 12 mm çelik çubuk ve 60 mm aderans uzunluğu ile 167 mm olanların ise %6 ve %9 daha az etkilendiğini belirtmiştir (Alhawat & Ashour, 2019). Bu düşüşün olası sebebini, GDA yüzeyindeki mikro çatlakların varlığından

dolayı artan GDA oranı ile mekanik kilitleme kuvveti ve adezyonun azalmasına bağlamışlardır. Ayrıca bu azalmanın bir başka olası nedeninin de basınç dayanımının karekökünün gösterdiği aderans dayanımı üzerindeki basınç dayanımı etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Aynı görüşün GDGA'lı beton için de geçerli olması muhtemeldir. GDGA ve GDA kimyasal olarak birbirinden farklı olmakla birlikte, GDGA içerisinde kalan sodyum hidroksit ve sodyum silikatın reaksiyona girmemiş partikülleri ile çimento matrisi arasında reaksiyonlar olabilmekte ancak betonun aderans dayanımına etkisi, GDGA'nın fiziksel özellikleri ve yukarıda belirtilenlerin etkisine göre çok daha az olacağını söylenebilir.

Chaliasou et al.'ün (2018) belirttiği gibi, çimento matrisi ile GDGA arasında iyon değişimi vardır, ancak bu fenomenin betonun dayanımı üzerinde çok az etkisi vardır.

GDGA'lar bir alkalın içeriğine sahiptir ki, betonda kullanılması, betonun pH'ını yükseltecek ve inşaat demirini korozyon riskinden koruyacaktır. Bu araştırmadan elde edilen sonuçlar ve literatürdeki sonuçlarla karşılaştırıldığında, çimento betonunda GDGA kullanımının betonun aderans dayanımına etkisinin betonun basınç dayanımına etkisinden çok daha az olduğu sonucuna varılmıştır. Yani betonda GDGA kullanımı basınç dayanımında sorun yaratmıyorsa beton adezyonunda sorun yaratmayacaktır.

Kısıtlanmış rötre

Gerinim eğrileri

Kısıtlanmış halka testleri, geçmişten beri bir karışımdaki çatlama potansiyelini değerlendirmek için basit ve ekonomik bir yöntem olarak kullanılmıştır. Çimentolu bir karışım kısıtlanmamışsa (yani çelik halka yoksa), beton serbestçe büzülür; ancak çelik halka bu hareketi engeller (kısıtlar), bu da betonda çekme gerilmelerinin oluşmasına neden olur. Gerilmeler çekme dayanımını aşınca, malzeme çatlar.

Bu tez çalışmasında ASTM C1581 standardına göre ring testi yapılmıştır. Gerinim ölçerler tarafından kayıt edilen çelik halkanın gerinimi, her karışım numunesi için numune yaşına göre Şekil 49, Şekil 50, Şekil 51 ve Şekil 52'de çizilmiştir. Her eğri, termal etkilerden kaynaklanan gerinimleri düzelttikten sonra iki gerinim ölçer tarafından kaydedilen ortalama gerinimi temsil etmektedir. Genel olarak, şekillerdeki sonuçlar, numunelerin ıslak kür işlemini tabi tutulduğu ilk 7 günde strain gaugelerin çelik halkanın geriniminde önemli değişiklikler olmadığını göstermektedir. Islak bez kaldırıldıktan sonra numune kurumaya maruz kalır ve beton hızla büzülmeye başlar, bu da çelik halkada, beton ring çatlayana kadar azalan bir oranla artan bir basınç gerilimi oluşturmaktadır. Kısıtlanmış halka numunesindeki çatlama sonrası

gerinim ölçerler, çelik halkanın gerinimin de ani bir değişiklik göstermektedir. Çelik halkanın gerinimindeki ani değişim, betonun büzülmesinden ve bu büzülmeyi çelik halka tarafından kısıtlanmasından kaynaklanan gerilmelerin betonun çekme dayanımını aştığını ve sonunda kısıtlanan ring numunenin çatlamasına yol açtığını göstermektedir.

Gerinimdeki ani düşüşün meydana geldiği zaman "çatlama yaşı" olarak tanımlanır. Karışımlara ait çatlama yaşı, çatlama anındaki maksimum gerinim ve beton halkada oluşan ortalama maksimum çekme gerilmesi değerleri Tablo 14'te verilmiştir. Bu çalışmada, kısıtlanmış beton halkada oluşan çekme gerilmesi (σ_c), Hossein et al. tarafından sunulan aşağıdaki denklemden (1) hesaplanmıştır (Hossain & Weiss, 2004).

$$\rho_{c_{ort}} = \varepsilon_s \cdot E_s \cdot \frac{R_{OS}^2 - R_{IS}^2}{2R_{OS}^2} \cdot \frac{R_{OC}^2 + R_{OS}^2}{R_{OC}^2 - R_{OS}^2} \quad (1)$$

Bu denklemde;

ε_s = çelik halkanın iç yüzeyindeki gerinimi, E_s = çeliğin elastik modülü, R_{OS} = çelik halkanın dış yarıçapı, R_{IS} = çelik halkanın iç yarıçapı ve R_{OC} = beton halkanın dış yarıçapını göstermektedir.

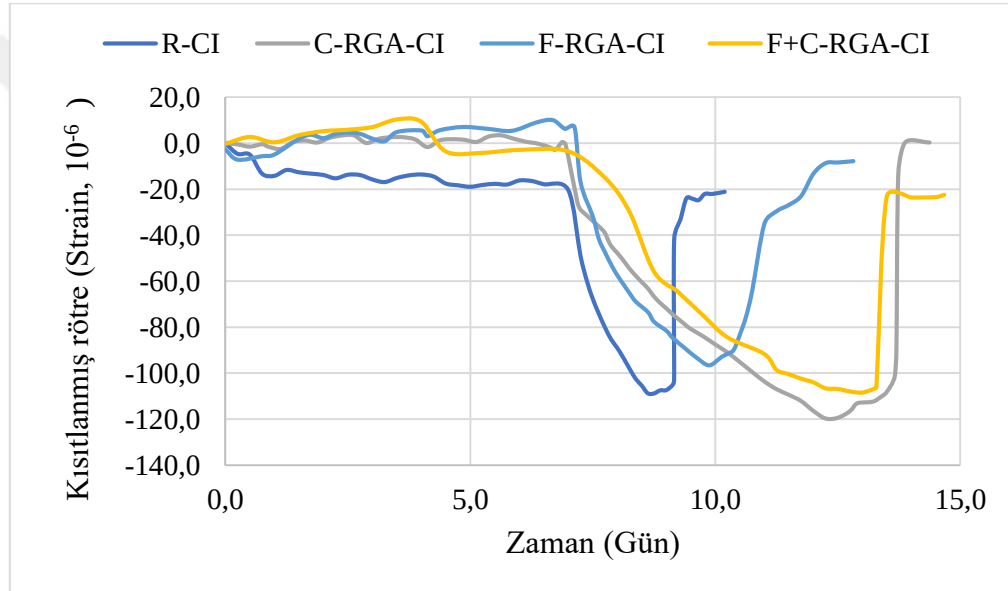
Tablo 14. Karışımların çatlama yaşı, çatlama anındaki gerinim ve beton ringteki ortalama maksimum gerilmeleri

Karışım tipi	Çatlama yaşı (Gün)	Çatlama anındaki gerinim	Beton ringteki ortalama maksimum gerilme (MPa)
R-CI	9,16	105	7,50
C-RGA-CI	13,75	113	8,06
F-RGA-CI	10,00	97	6,92
F+C-RGA-CI	13,30	108	7,70
R-CII	9,13	101	7,21
C-RGA-CII	13,10	86	6,14

Gerinim eğrilerine göre numuneler nemli küre tabi tutulduğu ilk 7 gün kısıtlanmış rötrede önemli bir değişiklik olmadığı için ıslak kürlemenin betonun kısıtlanmış rötresi üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, karışımın çatlama yaşı 7 günden sonra, yani numunenin açık havaya maruz bırakıldığı andan itibaren hesaplanmıştır. Şekil 45'e bakacak olursak, kontrol karışımının çatlama yaşı 2,16 gün (9,16 gün yapıldıktan sonra), çatlama anındaki gerinim değeri 105 $\mu\text{m/m}$, maksimum oluşan çekme gerilmesi 7,50 MPa iken sırasıyla C-RGA-CI, F-RGA-CI ve C+F-RGA-CI karışımlarının çatlama yaşı 6,74, 3

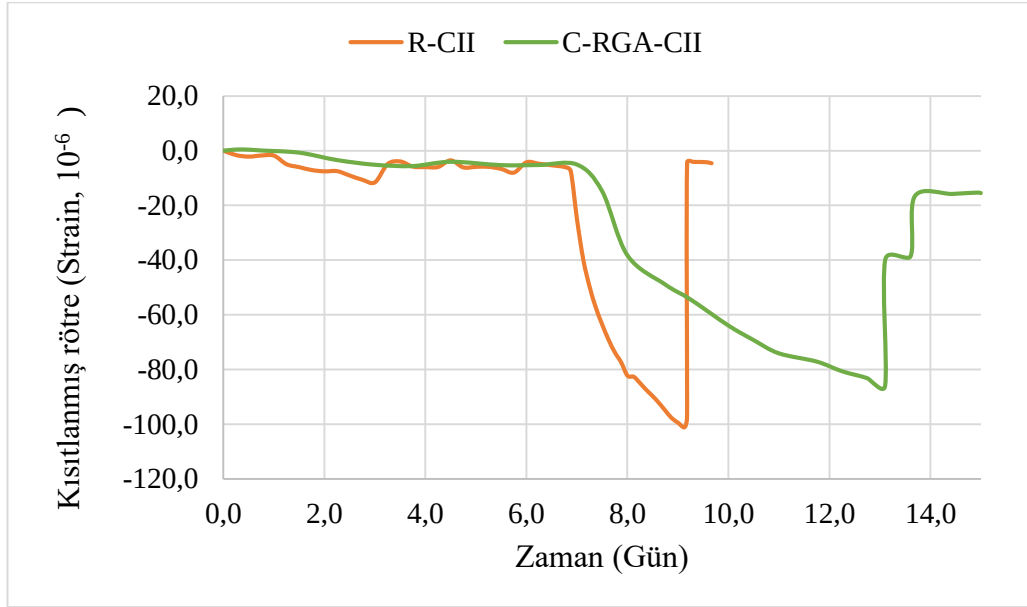
ve 6,3 gün (13,74, 9,88 ve 13,30 gün numune yapıldıktan sonra), çatlama anındaki gerinim değerleri 113 $\mu\text{m/m}$, 96 $\mu\text{m/m}$ ve 108 $\mu\text{m/m}$, maksimum oluşan çekme gerilmesi değerleri 8,06 MPa, 6,92MPa ve 7,7 MPa'dır. Görüldüğü gibi GDGA kullanımı durumunda çatlama yaşı artmıştır.

Karışım C-RGA-CI, F-RGA-CI ve C+F-RGA-CI, kontrol numunesine kıyasla çatlama yaşlarında (7 günden sonrası esas alınmıştır) sırasıyla %212, %39 ve %182 artış göstermiştir. Çatlama anındaki gerinim, kontrol karışımına göre C-RGA-CI karışımında %7,6 artış, F-RGA-CI karışımında %7,6 düşüş ve C+F-RGA-CI karışımında %3 artış göstermiştir. GDGA içeren karışımların çatlama yaşının kontrol karışıma göre önemli ölçüde arttığı ve çatlama anındaki gerinim değerlerinde de artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 49. R-CI, C-RGA-CI, F-RGA-CI ve F+C-RGA-CI karışımlarının kısıtlanmış rötre değerleri ve çatlama zamanları

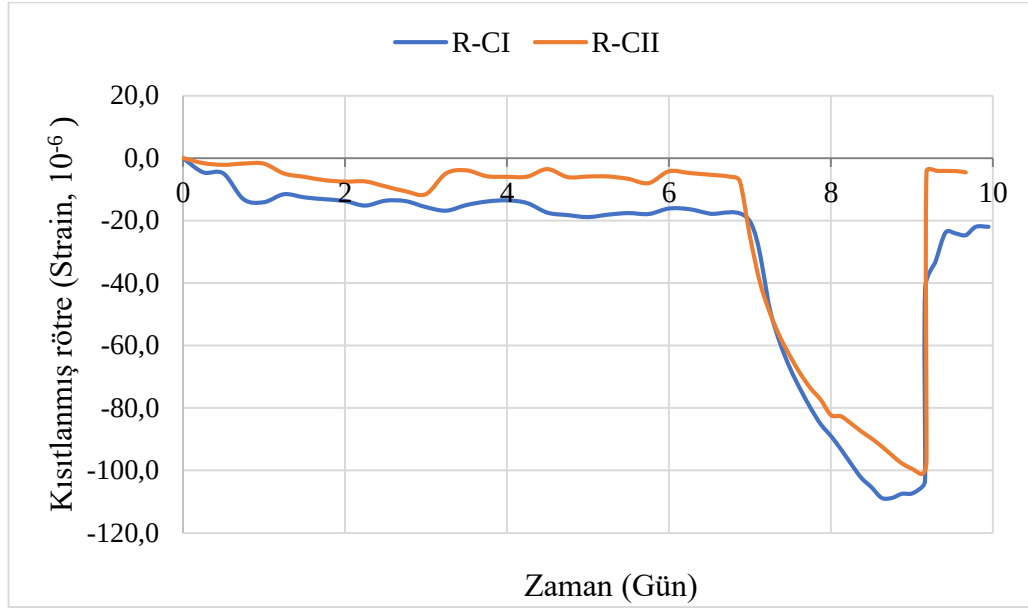
Şekil 48'de CEM II çimento ile yapılan karışımların gerinim eğrileri göstermektedir. Kontrol karışımının çatlama yaşı 2,13 gün (9,13 gün yapıldıktan sonra), çatlama anındaki gerinim değeri 101 $\mu\text{m/m}$, maksimum oluşan çekme gerilme 7,21 MPa iken, C-RGA-CII karışımın çatlama yaşı ve 6,1 gün (13,1 gün numune yapıldıktan sonra), çatlama anındaki gerinim değerleri 86 $\mu\text{m/m}$ maksimum oluşan çekme gerilme değeri 6,22 MPa'dır. Kontrol karışımına kıyasla çatlama yaşı %192 artış ve çatlama anındaki gerinim %15 düşüş göstermektedir. CEM I çimento ile üretilen betonlarda olduğu gibi CEM II çimento ile üretilen betonlarda da GDGA kullanımı, çatlama yaşını arttırmaktadır.



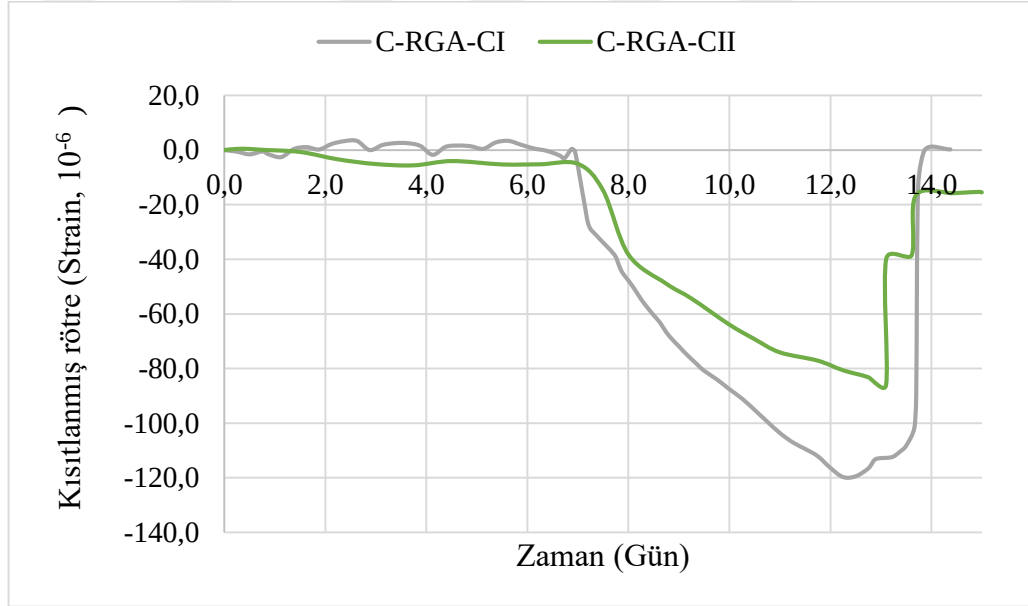
Şekil 50. R-CII ve C-RGA-CII karışımlarının kısıtlanmış rötre değerleri ve çatlama zamanları

Bu da GDGA agregalarının yüksek su emmesi nedeniyle betonun içinde daha uzun süre su kalmasına neden olduğunu, bunun da betonun iç kurlmesini sağlayarak, dolayısıyla betondaki rötre hızını azalttığını göstermektedir. Öte yandan, betondaki içsel kür dayanımı artırır, bu da betonu rötrede kaynaklanan çekme gerilmelerine karşı daha dirençli hale getirir, bu da hem çatlama anındaki gerinimi hem de çatlama yaşını artırır. GDGA içeren betonların çatlama anındaki gerinim değerlerinin yüksek olmasının bir başka nedeni ise geri dönüştürülmüş agregaların pürüzlü bir yüzeye ve köşeli bir şekle sahip olan yüzey özelliği olabilir. GDGA'ların pürüzlü yüzeyi, hamur ve agregası arasında daha iyi kenetlenmeyi sağlamaktadır (Adams et al., 2016).

Şekil 51 ve 52'de farklı çimentolarla yapılan karışımlar karşılaştırılmıştır. Şekil 51'de, karışım R-CI ve R-CII'in gerinim diyagramının benzer olduğu ve aynı çatlama yaşına sahip olduğu görülmektedir. Şekil 52'de, karışım C-RGA-CII'nin CEM I muadilinden daha düşük bir çatlama yaşı ve çatlama anındaki gerinime sahip olduğu görülebilir. Bunun nedeni CEM II çimentosu ile yapılan karışımların erken yaş dayanımı düşük olmasıdır.



Şekil 51. R-CI ve R-CII karışımlarının kısıtlanmış rötre değerleri ve çatlama zamanları



Şekil 52. C-RGA-CI ve C-RGA-CII karışımlarının kısıtlanmış rötre değerleri ve çatlama zamanları

Çatlak karakteristik özellikleri

Şekil 53- Şekil 58, çatladıktan sonra numunelerin durumunu göstermektedir. Çatlakların genişliği dijital cetvel ile ölçülmüştür. Şekil 53’de CEM I kontrol karışımı numunesinde 2,16 gün sonra (9,16 gün yapıldıktan sonra), yukarıdan aşağıya dikey olarak uzanan beton halkanın çevresi boyunca yaklaşık 1,3 mm genişliğinde sadece bir çatlak gözlemlenmiştir. Şekil 54 ve 55’te karışım C-RGA-CI ve F-RGA-CI, sırasıyla 6,74, ve 3 gün sonra (13,74 ve 10 gün numune yapıldıktan sonra), beton halkanın çevresinde, yukarıdan aşağıya doğru (bazıları aşağıdan

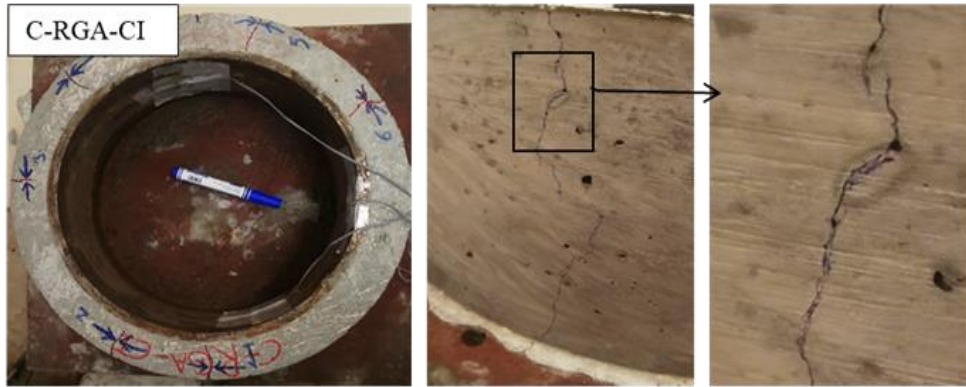
yukarıya doğru numune yüksekliğinin yarısı kadar) numunenin yüksekliği boyunca düzensiz olarak uzanan, genellikle 0,5 mm'den az genişliğe sahip birkaç küçük çatlak gözlemlenmiştir.

Şekil 55'te F+C-RGA-CI karışım çatlak şekli açısından, karışım C-RGA-CI ve F-RGA-CI'e benzer olup, yalnızca yaklaşık 1,4 mm'lik bir büyük çatlak ve numunenin çevresi boyunca birkaç küçük çatlak gözlemlenmiştir.

Şekil 57 ve 58'de, çatlak oluşuktan sonrası için karışım R-CII ve C-RGA-CII'nın durumunu göstermektedir. Karışım R-CII'de, numunedeki çatlak şekli ve çatlak genişliği, karışım R-CI'ye benzer olduğu gözlemlenmiştir. 9,13 günde, dikey olarak uzanan halkanın yüksekliği boyunca yaklaşık 1,1 mm genişliğinde bir çatlak gözlemlenmiştir. C-RGA-CII karışım ise 13,1 günde 1,2 mm genişliğinde bir çatlak ve 0,5 mm'den küçük genişliği olan üçten fazla küçük çatlaklar gözlemlenmiştir.



Şekil 53. R-CI karışımının çatlak şekilleri



Şekil 54. C-RGA-CI karışımının çatlak şekilleri



Şekil 55. F-RGA-CI karışımın çatlak şekilleri



Şekil 56. F+C-RGA-CI karışımın çatlak şekilleri



Şekil 57. R-CII karışımları çatlak şekli



Şekil 58. C-RGA-CII karışımları çatlak şekli

Boy değişimi

CEM I ve CEM II imento ile yapılan betonlarda GDGA kullanımının beton boy değişimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak özel test odasına alındıktan ve gerinim ölçerler takıldıktan sonra ölçümlere başlanmıştır. Tüm lmler $23\pm2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ve $\%50\pm4$ bağıl nemde laboratuvar koşullarında yapılmıştır. Beton numunelerin nem içeriğinin değişmemesi için numuneler 72 gün boyunca ince bir alüminyum levha ile sarılmıştır. Boy değişim ölçümleri 72 gün boyunca her 5 dakikada bir veri bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Elde edilen 72 günlük verileri excel programında bir günlük veri ortalaması alınarak şekil 59'te çizilmiş ve bu şekilde karışımların 3, 7, 28 ve 72 günlük gerinim değerleri Tablo 12'de verilmiştir.

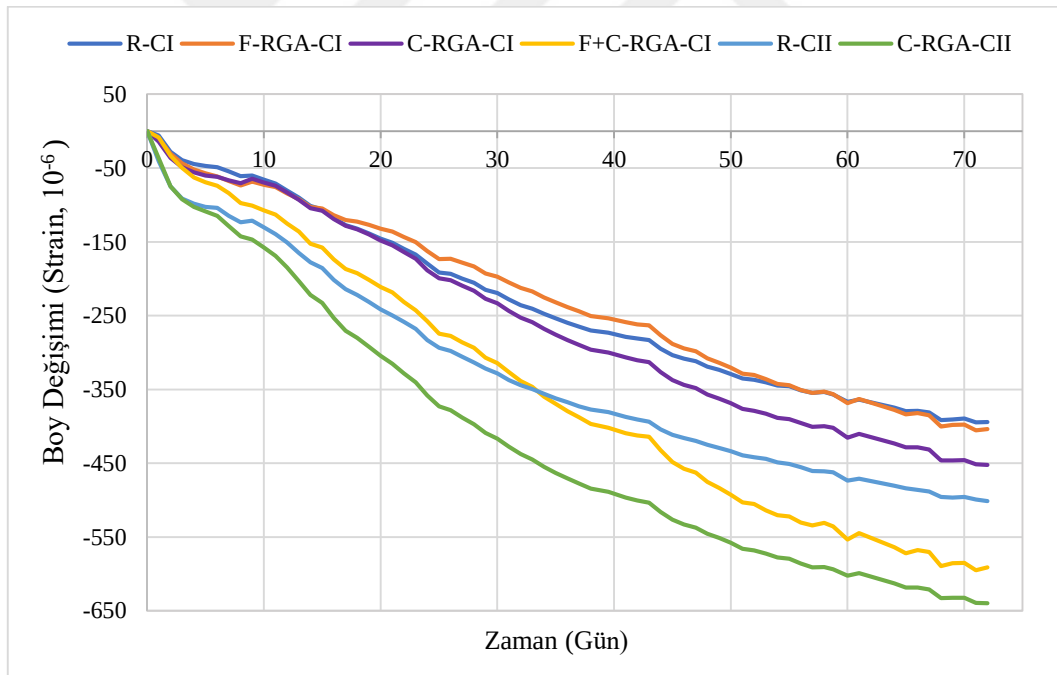
şekil 59'de görüldüğü gibi 72 gün boyunca CEM I imento ile yapılan karışımlarının gerinim değerlerine bakıldığında en fazla bzlme yapan numune F+C-RGA-CI olmuştur. C-RGA-CI ve F-RGA-CI karışımlarının 3 ve 7 günlük gerinim değerlerinde birbirine yakın bzlme gösterirken, bütün ölçümler sresinde (72 gün) F-RGA-CI karışımı C-RGA-CI karışımına göre daha az bzlme göstermiştir. şekil 58'e bakıldığında 14 ve 60 gün arasında F-RGA-CI kontrol karışımdan bile daha az bzlme gösterdiği görülmektedir. Büyük su emmesine rağmen bzlmesindeki iyileşmenin nedeni, geopolimer betonda olduğu gibi, Davidotis tarafından açıklanan 'blok polimerizasyon' kavramından kaynaklanıyor olabilir (Agrawal et al., 2019). Ona göre alüminosilikat kaynaklardaki Si ve Al, sıvı çözelti ile polimerleşerek betonun agrega içeriğinde artışa neden olan geopolimer bağlayıcılar içeren "bloklar" oluştururlar. Bu, GDGA betonu için de geçerli olabilir. GDGA zerine kalan geopolimerizasyon reaksiyona girmeyen alüminosilikat ve alkali partikülleri ortamda su bulunduğu zaman reaksiyona girerek ve betonun gözenekliliğini doldurmaya yardımcı olan ve böylece betonun dayanıklılık özelliklerini iyileştiren bloklar oluşturmuş olabilir (Agrawal et al., 2019). İnce GDGA F-RGA-CI karışımda kullanıldığından ve ince GDGA daha fazla yüzey alanına sahip olduğundan, yukarıdaki işlem karışım F-RGA-CI'ta daha iyi gerçekleşecektir.

CEM II imento ile yapılan karışımlarının gerinim değerlerine bakıldığında ise CEM I muadillerine göre daha fazla bzlme göstermiştir. Öyle ki bütün numuneler arasında 72 gün boyunca en fazla bzlme yapan numune C-RGA-CII olmuştur. C-RGA-CII'nın gerinim değerleri kontrol numunesine (R-CII) göre ise, 3 gün sonu birbirine yakinken 28 gün ve sonrası deney sonuna kadar $\%28$ oranında artış göstermiştir. Bu arada karışım C-RGA-CI, kontrol numuneye göre 28 günde $\%5$, 72 günde ise $\%15$ gerinim değerlerinde artış göstermektedir.

Buradan da anlaşılmaktadır ki GDGA'nin betonda kullanılması CEM II tip çimento ile yapılan betonda, CEM I tip çimento yapılanlara göre daha fazla büzölmeye neden olmaktadır. Bunun nedeni puzolanik içerikli CEM II çimentonun kimyasal bileşenleri olabilir. GDGA'da bulunan aktif alkaliler ile reaksiyona girerek daha fazla büzölmeye neden olabilmektedir. Genel olarak, geri kazanılmış agregalı betonların büzölme miktarındaki artış; yüksek su emme, boşluklar ve düşük elastisite modölüne bağlanır.

Tablo 15. 3, 7 ve 28 günlük gerinim değeri

	R-CI	C-RGA-CI	F-RGA-CI	F+C-RGA-CI	R-CII	C-RGA-CI
3 Gün	-39,37	-48,73	-43,58	-49,76	-91,22	-92,15
7 Gün	-54,35	-66,50	-67,36	-84,00	-114,90	-128,70
28 Gün	-205,72	-216,55	-183,26	-293,37	-313,37	-397,23
72 Gün	-394,04	-452,27	-403,75	-591,34	-501,46	-639,57



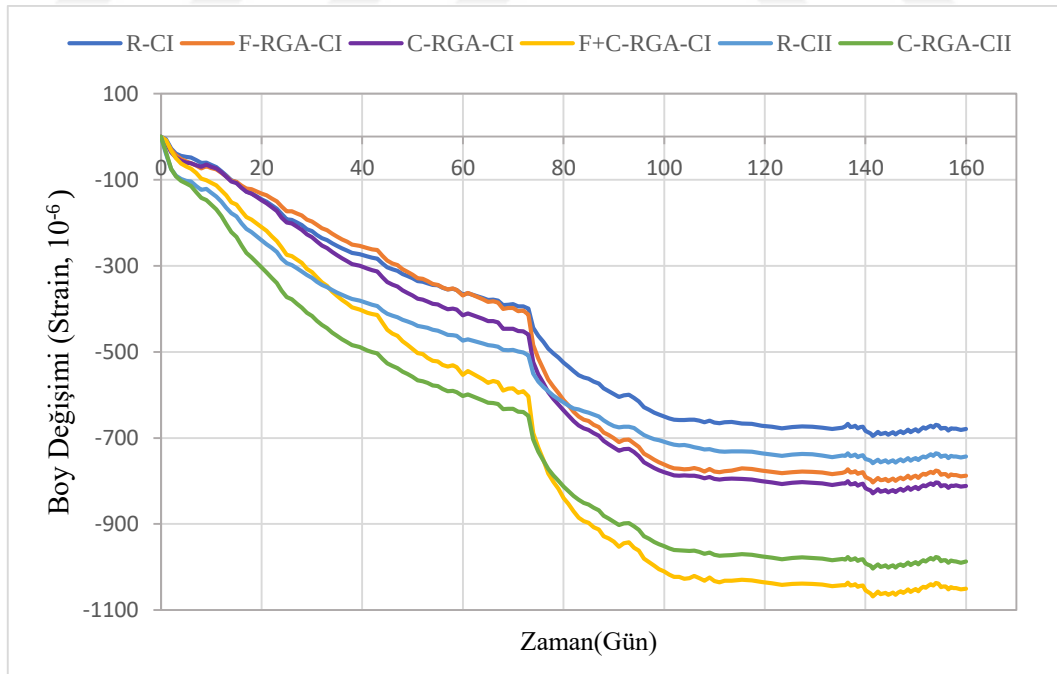
Şekil 59. Karışımların 72 günlük boy değışimleri

72 saat sonra beton neminin buharlaşmasını önlemek için numunelerin etrafına sarılan alüminyum levha açılarak numuneler laboratuvar sıcaklığındaki açık havaya bırakılmış, 160 gün boyunca ölçümlere devam edilmiştir. Elde edilen ölçüm değeriğlerinin ortalaması günlük

olarak alınarak değerlendirilmiştir. Elde edilen verilerden oluşturulan 160 günlük boy değişim grafikleri Şekil 60'ta sunulmuştur.

Şekilde görüldüğü gibi alüminyum levhanın açılmasından hemen sonra beton numunelerinin suyu hızlı olarak buharlaşmasından dolayı tüm numunelerde özellikle GDGA'lı numunelerde gerinim değerlerinin önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Eğriler 100 güne kadar hızlıca artmış ve 100 günden sonuna düşük bir oranla artmaktadır. Bu, buharlaşabilen suyun yeterince azaldığı anlamına gelmektedir. 72 günlük yaşa kadar C-RGA-CII'den daha düşük gerinim değerlerine sahip olan karışım F+C-RGA-CI, alüminyum levha açıldıktan sonra gerinim değerleri hızlıca artmış ve numune C-RGA-CII'ye göre daha yüksek gerinim değerlerine ulaşmıştır. Bunun sebebi F+C-RGA-CI'nın GDGA içeriği daha fazla olmasıdır. Ayrıca R- CI ve R-CII, C-RGA-CI ve F-RGA-CI eğrileri birbirlerine yaklaşılmaktadır. Bu durum söz konusu karışımların uzun dönemli boy değişim miktarlarının birbirine yakın olduğunu göstermektedir.

Chamila et al, geopolimer hamurundan elde edilen agrega betonunun kuruma rötresini 91 günde 420 microstrain olarak elde etmişlerdir; Avustralya'da beton kullanımı için AS3600 standardı (AS 2009) tarafından izin verilen maksimum değerden (800 μ s gerinim) önemli ölçüde düşük olmuştur (Chamila et al., 2018).



Şekil 60. Karışımların 160 günlük boy değişimleri

Su emme, yoğunluk ve geçirimli boşluk hacmi

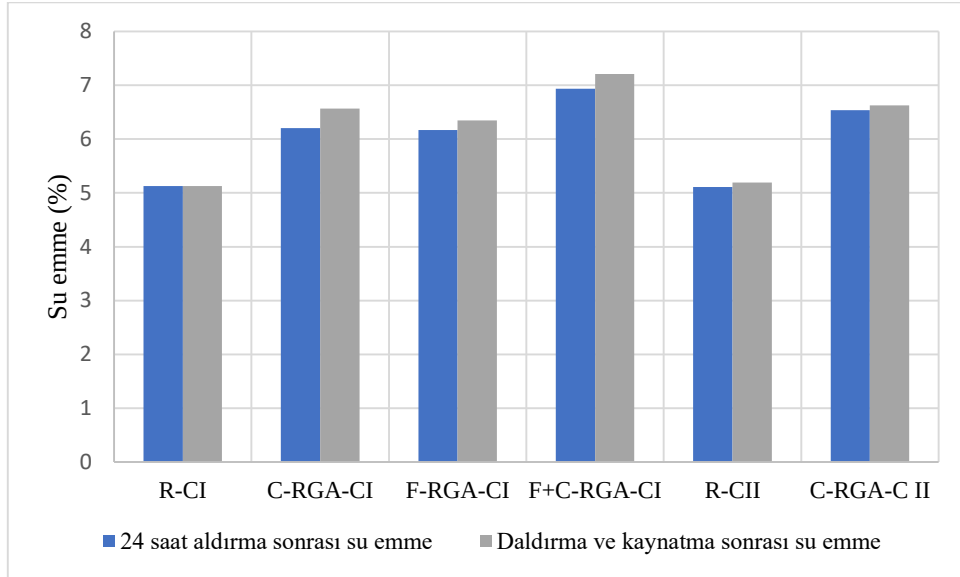
Su emme, yoğunluk ve geçirimli boşlukların hacmi için yapılan deney sonuçları sırasıyla Şekil 61, Şekil 62 ve Şekil 63'de verilmiştir.

Kontrol karışımın 24 saat su daldırma sonrası su emme oranı ve 24 saat daldırma ve kaynatma sonrasındaki su emme oranı sırasıyla %5,13 ve %5,13 iken C-RGA-CI, F-RGA-CI ve F+C-RGA-CI karışımlarının 24 saat suda daldırma sonrası su emme oranları %6,2, %6,17 ve %6,93, 24 saatlik daldırma ve kaynatma sonrasındaki su emme oranları ise %6,57, %6,35 ve %7,21 olarak tespit edilmiştir.

CEM II karışımları ise, R-CII karışımın 24 saat su daldırma sonra su emme oranı %5,11, 24 saat daldırma ve kaynatma sonrasındaki su emme oranı %5,2 iken C-RGA-CII karışımın 24 saat su daldırma sonrası su emme oranı %6,54, 24 saat daldırma ve kaynatma sonrasındaki su emme oranı %6,63 olarak belirlenmiştir.

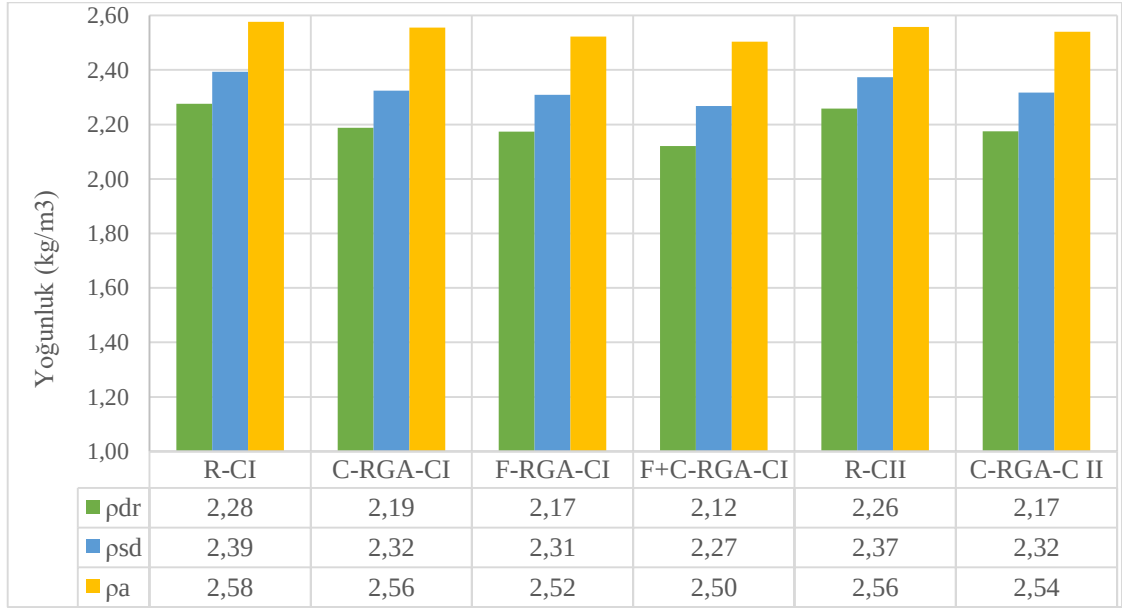
Görüldüğü gibi GDGA içeren karışımlarda su emme oranları artmıştır. C-RGA-CI, F-RGA-CI ve F+C-RGA karışımları kontrol numunelerine göre sırasıyla %21, %20 ve %35 (kaynatma sonrası su emmede %28, %24 ve %40) oranlarında artış göstermiştir. C-RGA-CII karışımı, kontrol numunesine kıyasla su emmesinde ise %28 (kaynatma sonrası su emmede %29) artış göstermiştir.

C-RGA-CI'nin F-RGA-CI'ye göre daha yüksek basınç dayanımına sahip olmasına rağmen daha yüksek su emme özelliği gösterdiği görülmektedir. C-RGA-CI'nin yüksek su emmesi, ince taneli GDGA'dan daha yüksek bir su emme oranına sahip olan betonda kullanılan iri taneli GDGA'nın yüksek su emmesine atfedilebilir. Başka bir nedeni GDGA üzerine kalan geopolimerizasyon reaksiyona girmeyen alüminosilikat ve alkali partikülleri reaksiyona girerek ve betonun gözenekliliğini doldurmaya yardımcı olabilmektedir (Agrawal et al., 2019).



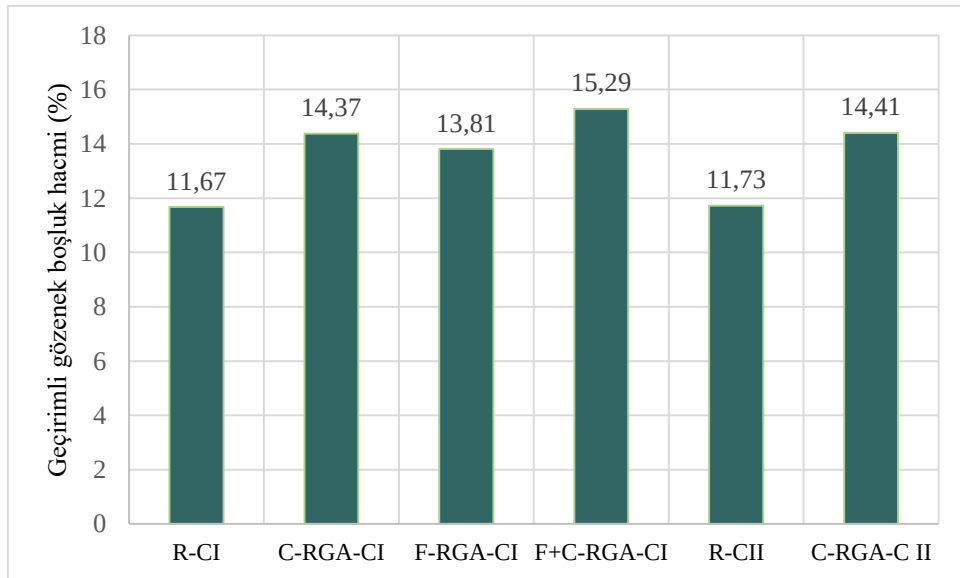
Şekil 61. Karışımların 24 saat suda bekletme sonrası ve kaynatıldıktan sonrası için su emme oranları

Karışımların kuru yığın yoğunluğu, kuru yüzey daldırma sonrası yığın yoğunluğu ve görünür yoğunluğunun sonuçları Şekil 62'de gösterilmektedir. GDGA'lı betonların yoğunluğunun kontrol betonu ile çok fazla farklılık göstermediği görülmektedir. En yüksek GDGA içeriğine sahip karışım F+C-RGA-CI, kuru yığın yoğunluğunda, kuru yüzey daldırma sonrası yığın yoğunluğunda ve görünür yoğunlukta sırasıyla %7, %5 ve %3'lük bir azalma göstermiştir. Karışım C-RGA-CI, karışım F-RGA-CI'ten daha fazla yoğunluk göstermektedir. Bunun nedeni iri taneli GDGA'nın ince GDGA'dan daha yüksek özgül ağırlığıdır. CEM II çimento karışımları, CEM I muadillerine göre biraz daha düşük yoğunluk değerleri göstermektedir. Bunun nedeni, genç yaşta CEM II çimento betonunun daha fazla gözenekli olmasıdır.



Şekil 62. Karışımların kuru yığın (ρ_{dr}) doymun kuru yüzey (ρ_{sd}) ve görünür yoğunlukları (ρ_a)

Geçirimli boşluk hacmi yüzdesi Şekil 63'te gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, GDGA'lı beton, kontrol karışımından daha büyük bir boşluk hacmi göstermektedir. Karışım F+C-RGA-CI, en yüksek GDGA içeriğine sahip olduğu için en büyük geçirgen boşluk hacmini göstermektedir. Karışım C-RGA-CI, karışım F-RGA-CI'den daha yüksek bir özgül ağırlık göstermesine rağmen, karışım F-RGA-CI'ten daha fazla boşluk hacmi göstermiştir. Bu, F-RGA-CI karışımındaki gözeneklerin, C-RGA-CI karışımındakinden daha az birbirine bağlı (geçirgen) olduğu anlamına gelmektedir. Bu performans artışı, boy değişim testinde de gözlemlendi. Daha önce de belirtildiği gibi, bunun nedeni iri agreganın ince agregaya göre daha yüksek su emmesidir.

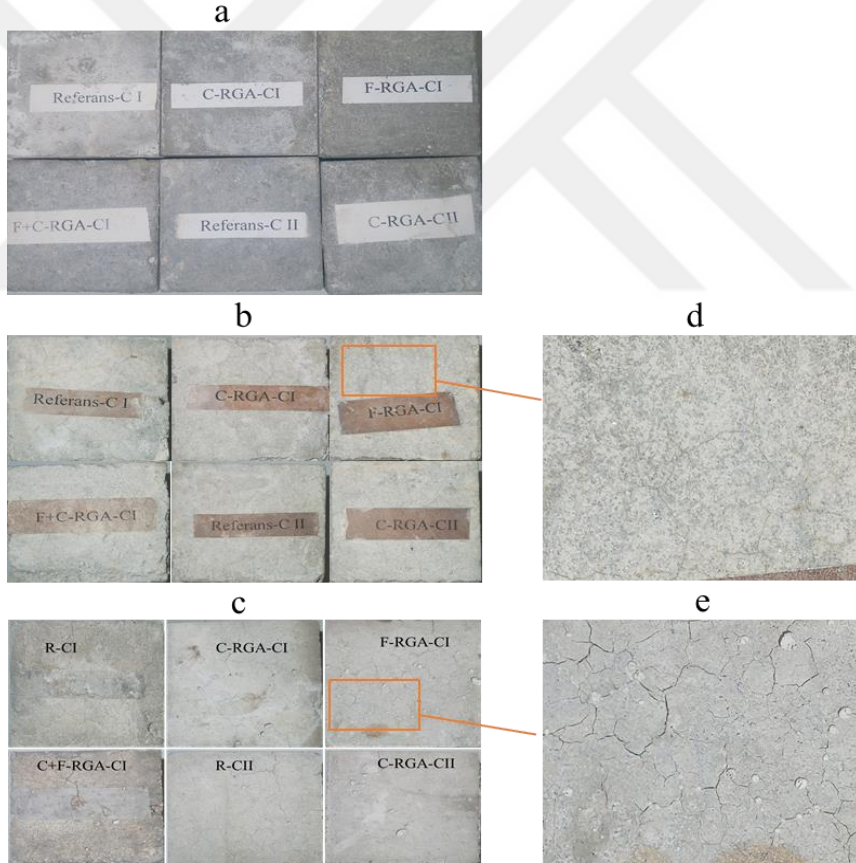


Şekil 63. Beton karışımlarının geçirimli boşluk hacmi

Yüksek sıcaklık etkisi

Fiziksel değişim

Yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra numunelerin renk ve görünümünde değişiklikler gözlenmiştir (Şekil 64). 300°C sıcaklığa maruz bırakıldığında, tüm karışım gruplarına ait numunelerin tamamında yüzey çatlaklarının renk ve desen bakımından benzer değişimler gösterdiği görülmüştür. Numunelerin rengi koyu griden açık griye dönmüş ve numuneleri adlandırmak için kullanılan etiketler şeklini kaybetmemiş ve hala görülebilmektedir. Ayrıca numunelerin yüzeyinde küçük çatlaklar gözlenmiş ve bu çatlaklar CEM I tipi çimento ile yapılan kontrol numunelerinde diğer karışımlara göre daha büyük görülmektedir. Sıcaklığın 600°C'ye çıkarılmasıyla, numunelerin renginde 300°C'ye göre önemli bir değişiklik olmamıştır, ancak yüzey çatlaklarının genişliği biraz daha büyük ve daha belirgin hale gelmiştir.



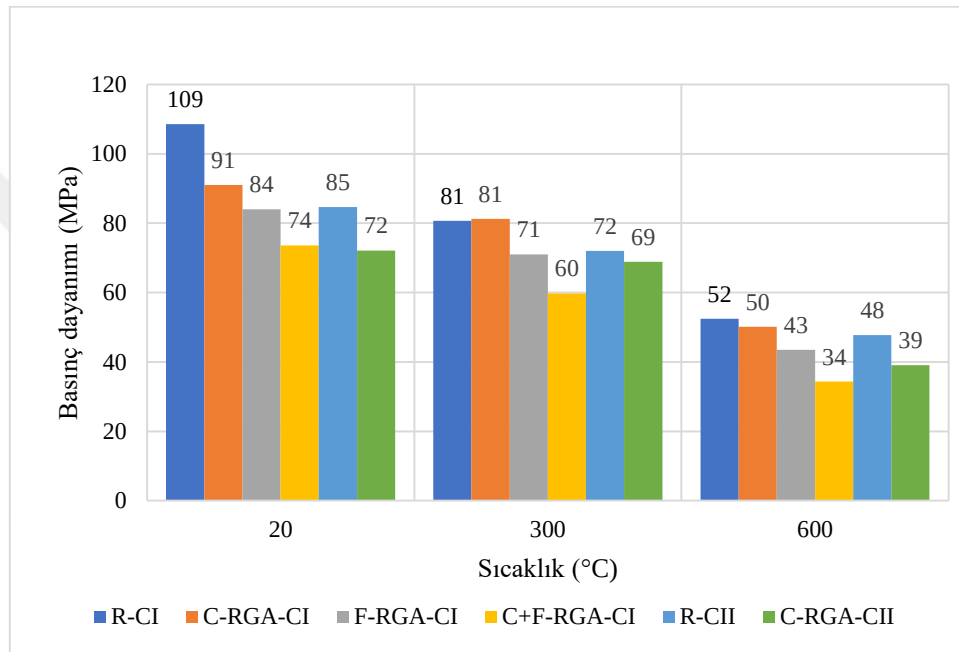
Şekil 64. Numuneler yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan önce ve sonra görüntüleri; a) Normal sıcaklık durumu b) 300°C'den sonra c) 600°C'den sonra d) 300°C'den sonra çatlak deseni e) 600°C'den sonra çatlak deseni.

Basınç dayanımı

Şekil 65'te yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası basınç dayanımları verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, sıcaklık arttıkça tüm karışımlarda dayanım düşüşü oluşmuştur. 300°C

sıcaklığa maruz kaldıktan sonra kontrol karışım %26 dayanım düşüşü gösterirken, C-RGA-CI, F-RGA-CI ve F+C-RGA-CI karışımları sırasıyla %12,53, %15,48 ve %18,8 dayanım düşüşü göstermiştir. CEM II serisinde ise R-CII ve C-RGA-CII karışımları sırasıyla %14,89 ve %4,52 oranında dayanım düşüşü göstermiştir.

600°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra ise, kontrol karışımı %51,68 dayanım düşüşü gösterirken, C-RGA-CI, F-RGA-CI ve F+C-RGA-CI karışımlar sırasıyla %44,95, %48 ve %53,36 dayanım düşüşü göstermiştir. CEM II karışımlarında ise R-CII ve C-RGA-CII karışımları sırasıyla %43,6 ve %46 oranında dayanım düşüşü göstermiştir.

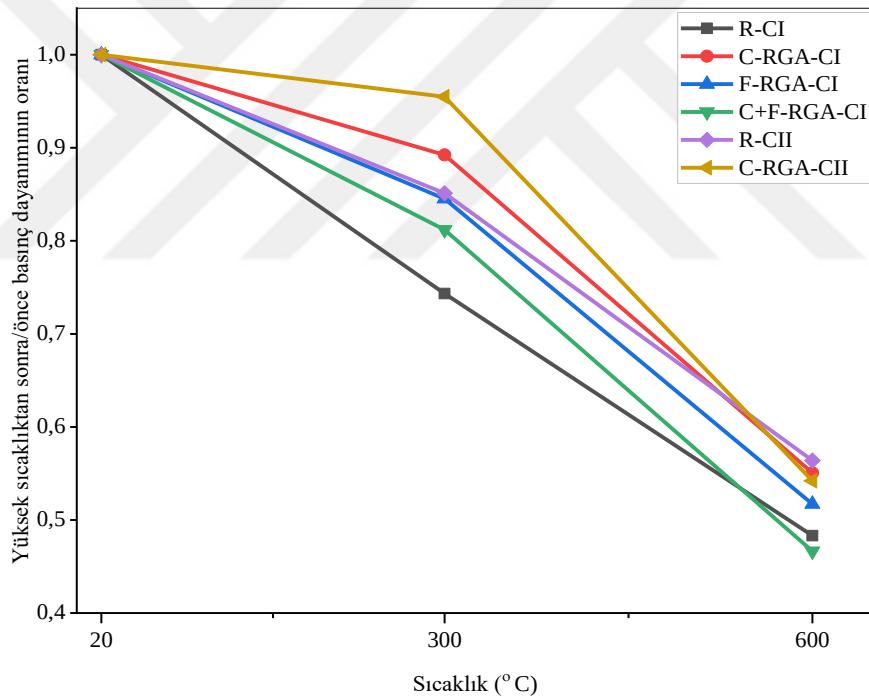


Şekil 65 . Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası basınç dayanımları

Görüldüğü gibi GDGA içerikli tüm karışımlar 300°C ısıya maruz kaldıktan sonra kontrol numunesine göre daha düşük basınç dayanımı düşüşüne sahip olmuş ve daha iyi performans göstermiştir. 600°C'ye maruz bırakıldıktan sonra da, C-RGA-CI ve F-RGA-CI karışımları, kontrol karışımından daha düşük bir basınç dayanımı düşüşü göstermiştir. Ancak, doğal iri ve ince agreganın GDGA ile eş zamanlı olarak yer değiştirmesiyle yapılan karışım F+C-RGA-CI, kontrol karışımından biraz daha yüksek bir dayanım düşüşü göstermiştir. Karışım C-RGA-CI, hem 300°C'de hem de 600°C'de numune F-RGA-CI'ye kıyasla daha düşük bir dayanım düşüşü göstermiş; bu, iri taneli GDGA'nın ince taneli GDGA'ya kıyasla daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir.

300°C sıcaklıkta CEM II çimento ve iri taneli GDGA, CEM I çimento muadili karışımına göre çok daha düşük dayanım düşüşüne sahipken, ancak 600°C ısıya maruz kaldıktan sonra CEM I muadilinden daha fazla basınç dayanımı düşüşü göstermektedir.

Şekil 66'da, sıcaklıkla ilişkili olarak, yüksek sıcaklık sonrası ve öncesi basınç dayanımının oranını eğriler şeklinde göstermektedir. Kontrol R-CI karışımının 20 ile 600°C arasında sabit bir eğimle doğrusal bir dayanım düşüşü gösterdiği görülebilir. Bununla birlikte, R-CI'nin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı / yüksek sıcaklık öncesi basınç dayanımı oranı, GDGA içeren karışımlardan daha düşüktür. Diğer 5 karışımın basınç dayanımındaki değişimleri, 20-300 °C'de dayanımda önemli bir düşüş olmamasına rağmen sıcaklık 600°C'ye çıkarılınca basınç dayanımı hızla düşmektedir. Ayrıca C-RGA-CI'nın yüksek sıcaklık sonrası/öncesi basınç dayanımı oranı hem 300°C'de hem de 600°C'de F-RGA-CI'den daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Dayanımda en büyük düşüş F+C-RGA-CI karışımı 600°C'de göstermiştir. Betonda ince ve iri doğal agreganın GDGA ile ayrı ayrı yer değiştirmesi kontrol karışımına göre daha iyi performans gösterirken, ince ve iri doğal agreganın GDGA ile eş zamanlı yer değiştirmesiyle betondaki toplam GDGA miktarının artırmış ve daha fazla basınç dayanımı kaybına neden olduğunu görülmektedir.



Şekil 66. Normal sıcaklık, 300°C ve 600°C sıcaklıklara maruz kalan beton karışımlarının yüksek sıcaklıktan sonrası/öncesi basınç dayanımının oranları.

Genel olarak, çimento hamuru sıcaklığa maruz kaldığında, hidratlı ürünler (kalsiyum silikat hidrat (CSH), kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) ve kalsiyum-alumino-sülfo-hidratlar daha doğru olabilir) kademeli olarak sularını kaybederler ve su buharı üretilir. Ayrıca betondaki boşluk basıncı artar, bu olay yaklaşık 100°C'de başlar ve 500°C'ye kadar devam etmektedir (Alarcon-Ruiz et al., 2005). Betonun sorumlu olan CSH kristalleri dehidrasyonuyla betonun

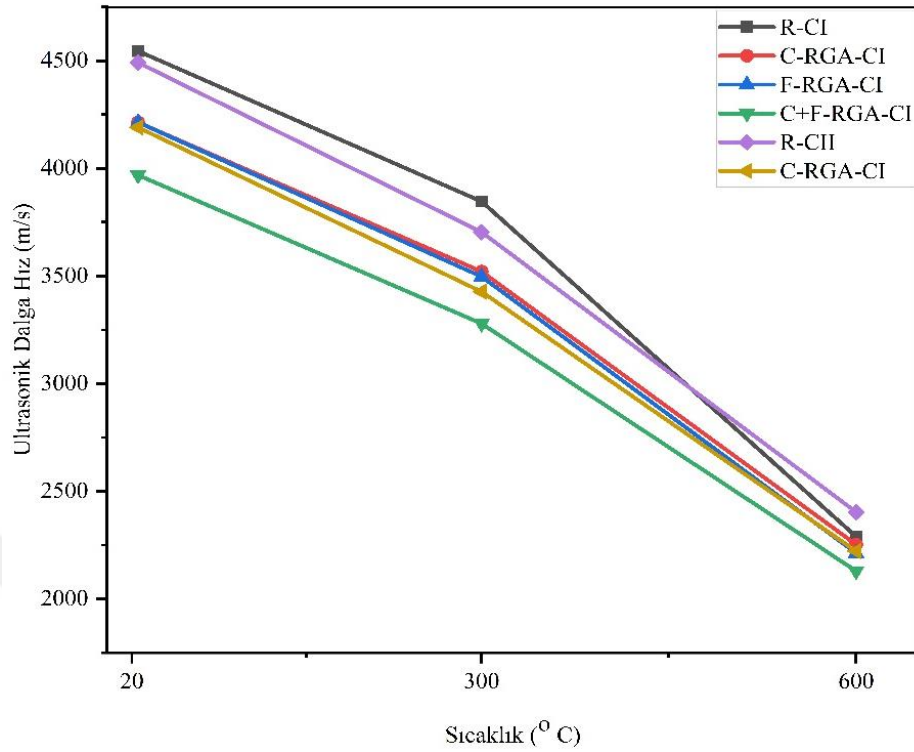
dayanımını azaltılmaktadır. 530°C'de Ca(OH)_2 , CaO 'ya dönüşür ve hacimde %33'lük bir büzülme meydana gelir (Ergün et al., 2013).

Da Silva et al. yaptığı çalışmalarda, yüksek sıcaklığın (650°C'ye kadar) yüksek ve normal dayanıma sahip GDA karışımlarının kalan mekanik ve fiziksel performansı üzerindeki etkisini araştırmıştır. 650°C'ye maruz kaldıktan sonra, %100 geri dönüştürülmüş iri agregalı ve normal dayanımlı (25 MPa) ve yüksek dayanımlı (65 MPa) betonların sırasıyla yaklaşık %51,43 ve %52,67 kalan basınç dayanımlarının olduğu ifade edilmiştir (Da Silva et al., 2020). Salahaddin et al. yaptıkları çalışmada, yüksek sıcaklığın %30, %60 ve %100 geri dönüştürülmüş iri agregalı içeren betonun performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Tüm karışımlar, 600°C maruz bırakıldıktan sonra yaklaşık %57,35'lik bir kalan basınç dayanımına sahip olduğu ifade edilmiştir (Salahuddin et al., 2019). Xuan et al., Zega et al., Xiao et al., Govindagowda et al. ve Ren et al. tarafından yapılan çalışmalarda yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra geri dönüştürülmüş agregalı betonun (GDA) özellikleri üzerinde yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar ifade edilmiştir (Gowda et al., 2017; Ren et al., 2022; Xiao et al., 2013; Xuan et al., 2018; Zega & Di Maio, 2009). Sonuç olarak, yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra geri dönüştürülmüş geopolimer agregalar (GDGA) ile yapılan betonun, geri dönüştürülmüş çimento beton agregaları (GDA) ile yapılan beton benzer özelliklere sahip olduğu söylenebilir.

Ultrasonik darbe hızı (UPV)

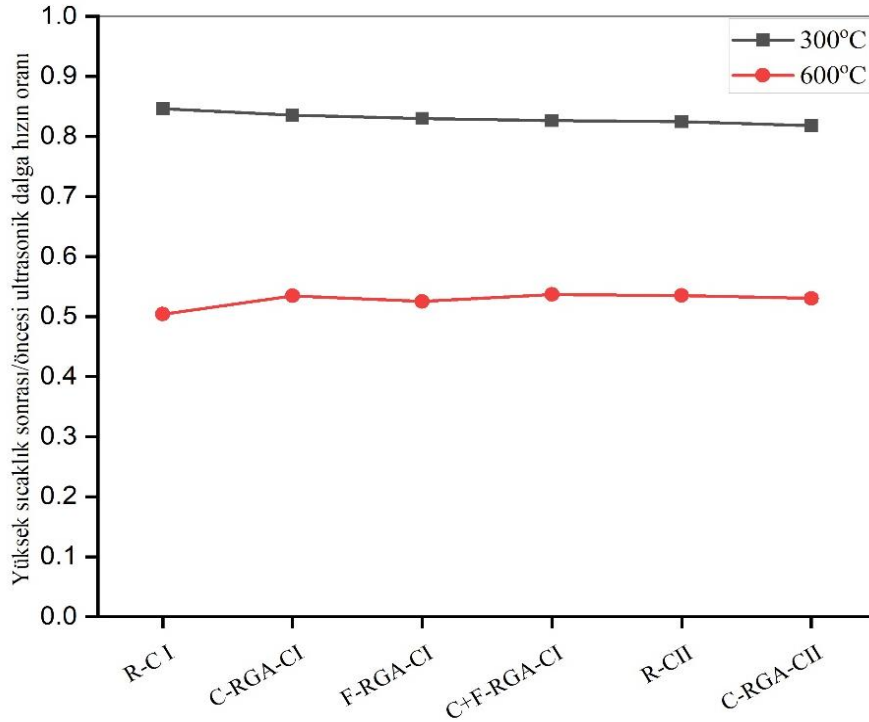
Şekil 67'da farklı yüksek sıcaklıklara maruz kalan beton karışımları için ultrasonik darbe hızları gösterilmiştir. Tüm beton karışımları için, artan maruz kalma sıcaklığı ile ultrasonik darbe hızının düştüğü görülmektedir. 20°C'den 300°C'ye kadar ultrasonik darbe hızının yavaş bir oranda düştüğü ve sıcaklığı 600°C'ye yükseldikçe UPV değerlerinin daha hızlı azaldığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni, sıcaklık 600°C'ye yükseldikçe suyun buharlaşması ve çimento bileşenlerinin ayrışması nedeniyle, çatlakların ve boşlukların artması ve betonun bağlı yoğunluğunun azalması olabilir. Tüm sıcaklıklarda kontrol karışımının UPV değerlerinin geri dönüştürülmüş agregalı beton karışımlarına kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. C-RGA-CI ve F-RGA-CI karışımının 20°C sıcaklıktaki UPV değerleri aynı olmakla birlikte, 300°C ve 600°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra da C-RGA-CI karışımında hafif bir farkla yüksek UPV değeri göstermektedir. F+C-RGA-CI karışımı en düşük UPV değerini göstermiştir. UPV değerlerindeki düşüş, geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların bağlı yoğunluğunun daha düşük olmasından kaynaklanabilir. CEM II ile yapılan karışımlar, CEM I

ile üretilen karışımlara göre daha düşük UPV sonuçlarına sahiptir. CEM II çimentosunda hidratasyon hızı yavaş olduğu için erken yaşlarda CEM I'e göre daha fazla poroziteye sahiptir.



Şekil 67. Karışımların normal sıcaklıkta ve yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra ultrasonik darbe hızı değerleri.

Şekil 68’de yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra/önce UPV değerleri göstermektedir. Bütün karışımlar 300°C’ye maruz kaldıktan sonra yaklaşık %18-%15 ve 600°C maruz kaldıktan sonra yaklaşık %50-%47 UPV değerlerinde düşüş göstermiştir. Salahuddin et al., 600°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra %30, %60 ve %100 geri dönüştürülmüş iri agrega içeren betonun UPV değerlerini tespit etmiş ve yüksek sıcaklık öncesi UPV değerlerine kıyasla %67’lik bir azalma meydana geldiği tespit edilmiştir (Salahuddin et al., 2019).



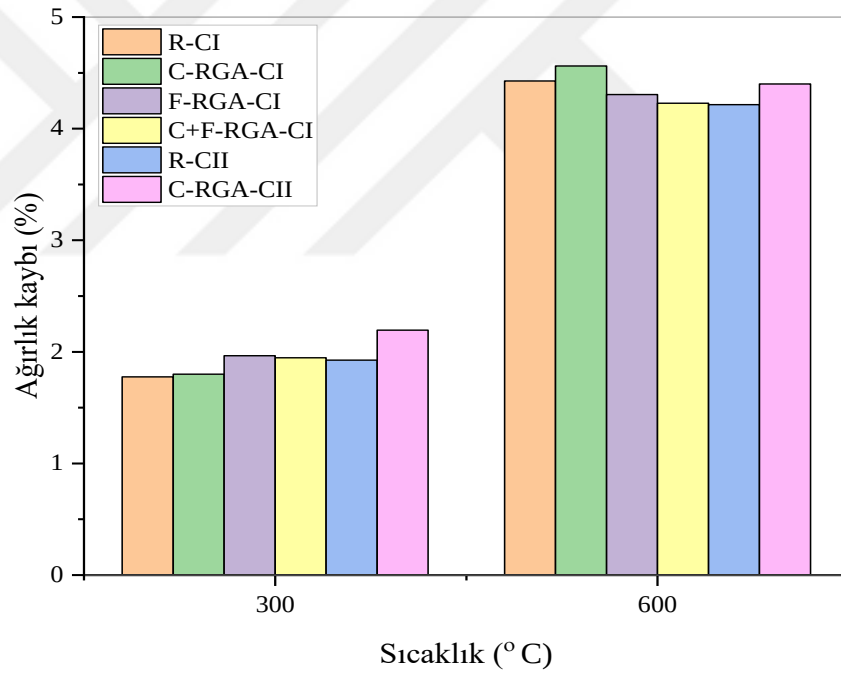
Şekil 68. Karışımların yüksek sıcaklık sonrası/öncesi ultrasonik darbe hızının oranları.

Ağırlık kaybı

Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin ağırlık kaybı değerleri Şekil 69'da sunulmuştur. Tüm karışımlar yüksek sıcaklığa maruz kaldıklarında ağırlık kaybetmiştir. 300°C'ye maruz kaldıktan sonra R-CI, C-RGA-CI, F-RGA-CI ve C+F-RGA-CI karışımları sırasıyla %1,78, %1,8, %1,95 ve %1,93 ağırlık kaybı göstermiştir. R-CII ve C-RGA-CII karışımları ise sırasıyla %1,93 ve %2,19 ağırlık kaybı göstermiştir. Ayrıca 600 °C maruz kaldıktan sonra R-CI, C-RGA-CI, F-RGA-CI ve C+F-RGA-CI karışımları sırasıyla %4,43, %4,56, %4,43 ve %4,23 ağırlık kaybı göstermiştir. Ayrıca R-CII ve C-RGA-CII karışımları ise sırasıyla %4,21 ve %4,4 ağırlık kaybı göstermektedir.

300°C'ye maruz kaldıktan sonra GDGA içeren karışımlar kontrol numunelerine göre daha fazla ağırlık kaybetmiştir. Bunun nedeni GDGA'nın doğal agregalara göre daha yüksek su emme özelliği olabilir. C-RGA-CI ve F-RGA-CI karışımları ağırlık kaybında önemli bir fark göstermemiştir. Aynı şekilde CEM I ve CEM II çimentosu ile yapılan karışımlar arasında da önemli bir fark gözlemlenmemiştir. 300°C kıyasla 600°C maruz kaldıktan sonra ağırlık kaybı neredeyse iki kat artmıştır. Aynı sıcaklık için karışımların ağırlık kaybında yorumlanabilir bir farklılık göstermemektedir. Karışımlarda, karışımların ağırlık kaybı rakamlarında ufak tefek farklılıklar görülebilir ancak bu değişiklikler kesin olarak belirli bir nedene bağlanamaz.

Sonuç olarak, GDGA içeren numunelerin ağırlık kaybı kontrol numunelerinden önemli ölçüde farklı değildir ve bu da GDGA'nın betonun ağırlık kaybını önemli ölçüde etkilemediğini göstermektedir. Aynı şekilde, geopolimer agregalı betonda yüksek sıcaklıklara maruz kalma nedeniyle geleneksel betonun ağırlık kaybı için de geçerlidir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin yapısındaki serbest su, hidrat ve kılcılığın buharlaşması numunelerin birim ağırlığını azaltır (Topçu & Demir, 2007). Kılcal gözeneklerdeki su, yaklaşık 100°C'de buharlaşmaya başlarken, jel tarafından emilen su ve hidratlardaki kimyasal olarak bağlı su, 300°C'de buharlaşmaya başlar. Buharlaşan su çimento hamurunun büzülmesine neden olur. Geri çekilme ve betonda buhar basıncı oluşturma, betonun çatlamasına ve tahrip olmasına yol açar. 300°C'ye maruz bırakıldıktan sonra numunelerin yüzeyinde oluşan çatlaklar bu sebeptendir. Çimento hamurunun bir diğer önemli bileşeni kalsiyum hidroksittir. Ca(OH)_2 , yaklaşık 530°C sıcaklıkta dehidroksile edilerek sönmemiş kirecine dönüşür ve bunun sonucunda OH'nin Ca(OH)_2 'den ayrılması ağırlık kaybına neden olur (Yazıcıoğlu et al., 2018).



Şekil 69. 300 ve 600 °C sonrası tüm numunelerin ağırlık kayıpları

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, farklı alüminosilikat esaslı geopolimer betonlardan geri kazanılan iri ve ince agregaların özelliklerinin tespiti ve bu agregalarla üretilen betonların fiziksel, mekanik vb. özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Geopolimer betonlardan geri dönüştürülen agregalar, çimento betonlarından geri dönüştürülen agregalar gibi doğal agregalardan daha yüksek su emme ve daha düşük özgül ağırlığa sahiptir. GDGA'nın 2-4 mm ve 4-8 mm boyut fraksiyonlarının kuru yüzey doygun özgül ağırlığı (SSD) sırasıyla 2,41 ve 2,43 ve su emme oranları sırasıyla %6,23 ve %6,06 olarak tespit edilmiştir.
- Geri dönüştürülmüş geopolimer agregalar, hızlandırılmış harç çubuğu testi sonuçlarına göre alkali-silika reaksiyon potansiyeli açısından zararlı olarak değerlendirilmiştir. Fakat, bu hususta daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.
- GDGA agregalarının betonda kullanılması betonun basınç dayanımını azaltmıştır. Kontrol numunesine göre en yüksek GDGA içeriğine sahip F+C-RGA-CI karışımı, 28 günlük basınç dayanımında %32,2'lik bir düşüşe sebep olmuştur. F-RGA karışımı, C-RGA'dan daha düşük basınç dayanımı göstermiştir. CEM II çimento ile yapılan C-RGA-CII betonu, erken yaşta dayanım daha düşük olmasına rağmen, kontrol numuneye göre daha düşük dayanım azalması göstermektedir. Bunu neden CEM II puzolan içerikli olduğudur.
- GDGA kullanımının sebep olduğu basınç dayanımı kaybı erken yaşlarda daha fazladır ve numunelerin yaşı ilerledikçe basınç dayanımının düşüş oranı azalmaktadır.
- Eğilme dayanımında C-RGA-CI karışımı, kontrol karışımına kıyasla hafif bir artış (%1) gösterirken F-RGA-CI karışımının eğilme dayanımı kontrol karışımına göre %13,1 oranında düşüş göstermiştir. F+C-RGA-CI karışımı ise, kontrol karışımına kıyasla eğilme dayanımında %18,9'luk bir düşüş göstermiştir. C-RGA-CII betonu ile kontrol betonunun eğilme dayanımı aynı olmuştur. GDGA'nın betonda kullanımı eğilme dayanımından ziyade daha çok basınç dayanımını azaltmıştır.
- Ring testinde betonda GDGA kullanımının betonun kısıtlanmış rötresi üzerinde büyük etkisi olduğu kanıtlanmıştır. GDGA'nın betonda kullanılması genellikle çatlama yaşını artırmıştır. Fakat C-RGA-CI ve C+F-RGA-CI karışımlarında çatlama anındaki gerinim da artmıştır. Ayrıca doğal agrega ile yapılan CEM I ve CEM II karışımlar arasında bir farklılık görülmemiş fakat C-RGA-CII'nin CEM I muadilinden daha düşük çatlama yaşı ve çatlama anındaki gerinim göstermiştir.

- Betonların boy değişimleri incelendiğinde betonda GDGA kullanımının betonun rötresini arttırdığı görülmüştür. Doğal iri ve ince agreganın betonda eş zamanlı olarak GDGA ile yer değiştirmesi ile betonun 72. gününde büzülmesinin %50 oranında arttığı gözlemlenmiştir. İnce GDGA'nın betonda kullanılması, iri taneli GDGA'ya göre daha az büzülme göstermektedir. Genelde CEM II çimento ile yapılan karışımlar daha fazla büzülmeye neden olmuştur. Öyle ki, C-RGA-CI karışımı 72 günlük gerinimde kontrol numunesine göre %14,8'lik bir artış gösterirken, C-RGA-CII karışımı kontrol numunesine (R-CII) göre %27,5'lik bir artış göstermiştir.
- Su emme testinin sonuçları, betonda GDGA kullanımının su emmesi ve geçirgen boşlukların hacmini arttırdığını ve betonun yoğunluğunu azalttığını göstermiştir. Doğal iri ve ince agreganın betonda GDGA ile eş zamanlı olarak değiştirilmesiyle, betonun su emmesi %35 ve geçirgen boşlukların hacmi %31 artmıştır.
- İnce GDGA ile yapılan karışımın iri taneli GDGA ile yapılan karışıma göre daha düşük basınç ve eğilme dayanımına neden olmasına rağmen daha az boy değişimi gösterdiği, daha az su emme, daha yoğun ve daha az boşluklu olduğu görülmüştür. Bu parametreler dayanıklılık açısından çok önemlidir.
- Yüksek sıcaklık etkisinde, iri ve ince taneli GDGA ile ayrı ayrı yapılan karışımlarda kontrol karışımına göre daha az basınç dayanımı düşüşü olurken, ince ve iri doğal agrega ile eş zamanlı olarak GDGA ile yer değiştirilerek yapılan karışımda ise 600°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra kontrol karışıma göre daha fazla dayanım düşüşü göstermiştir.
- Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra tüm karışımların UPV değerlerinde düşüş ve ağırlığında kayıp oluşmuştur ve düşüş miktarında GDGA içeren karışımlar ile normal beton arasında anlamlı bir fark gözlenmemiştir. Geri dönüştürülmüş geopolimer agregalar (GDGA) ile yapılan betonunun yüksek sıcaklığa karşı, çimento beton geri dönüştürülmüş agregaları (GDA) ile yapılan betonun yüksek sıcaklığa karşı davranışlarına benzer bir davranış göstermiştir.

KAYNAKLAR

- Abdulkareem, O. A., Al Bakri, A. M., Kamarudin, H., Nizar, I. K., & Ala'eddin, A. S. (2014). Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 50, 377-387.
- Adams, M. P., Fu, T., Cabrera, A. G., Morales, M., Ideker, J. H., & Isgor, O. B. (2016). Cracking susceptibility of concrete made with coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 102, 802-810.
- Aghili Lotf, M., Ramezani pour, A. M., & Palasi, M. (2020). Investigation the effect of Different Types of Recycled Concrete Aggregates on the Engineering Properties of Concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(3), 179-192.
- Agrawal, U., Wanjari, S., & Naresh, D. (2017). Characteristic study of geopolymer fly ash sand as a replacement to natural river sand. *Construction and Building Materials*, 150, 681-688.
- Agrawal, U., Wanjari, S., & Naresh, D. (2019). Impact of replacement of natural river sand with geopolymer fly ash sand on hardened properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 209, 499-507.
- Ajdukiewicz, A., & Kliszczewicz, A. (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*, 24(2), 269-279.
- Akbarnezhad, A., Huan, M., Mesgari, S., & Castel, A. (2015). Recycling of geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 101, 152-158.
- Akbarnezhad, A., Ong, K., Zhang, M., Tam, C., & Foo, T. (2011). Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3469-3479.
- Alarcon-Ruiz, L., Platret, G., Massieu, E., & Ehrlicher, A. (2005). The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. *Cement and Concrete Research*, 35(3), 609-613.
- Aldred, J., & Day, J. (2012). Is geopolymer concrete a suitable alternative to traditional concrete. Proceedings of the 37th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore,
- Alengaram, U. J., Salam, A., Jumaat, M. Z., Jaafar, F. F., & Saad, H. B. (2011). Properties of high-workability concrete with recycled concrete aggregate. *Materials Research*, 14, 248-255.
- Alhawati, M., & Ashour, A. (2019). Bond strength between corroded steel reinforcement and recycled aggregate concrete. Structures,
- Allahverdi, A., Kani, E. N., & Yazdanipour, M. (2011). Effects of blast-furnace slag on natural pozzolan-based geopolymer cement. *Ceramics-Silikaty*, 55(1), 68-78.
- Almutairi, A. L., Tayeh, B. A., Adesina, A., Isleem, H. F., & Zeyad, A. M. (2021). Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00733.
- American Concrete Institute (ACI). (2001). Removal and reuse of hardened concrete, ACI 555R-01. In.

- Ammenbergh, J., Feiz, R., Helgstrand, A., Eklund, M., & Baas, L. (2011). Industrial symbiosis for improving the CO₂-performance of cement production. *Final report of the CEMEX-Linköping University industrial ecology project*.
- Amorim, P., De Brito, J., & Evangelista, L. (2012). Concrete made with coarse concrete aggregate: influence of curing on durability. *ACI Materials Journal*, 109(2), 195-204.
- ASTM C642, A. S. f. T. M. (2001). ASTM C642: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. In.
- ASTM C1260. (1994). Standard Test Method for Potential Alkali-Reactivity of Aggregates (Mortar Bar Method). American Society for Testing and Materials. In.
- ASTM C1581, A. S. f. T. a. M. (2016). Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage. In.
- Bairagi, N., Ravande, K., & Pareek, V. (1993). Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates. *Resources, Conservation and Recycling*, 9(1-2), 109-126.
- Beher, M., Bhattacharyya, S., Minocha, A., Deoliya, R., & Maiti, S. (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete—a breakthrough towards sustainability in construction sector. In: Elsevier article CSIR-Central Building Research Institute, Roorkee.
- Behera, M., Bhattacharyya, S., Minocha, A., Deoliya, R., & Maiti, S. (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete—A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, 68, 501-516.
- Björnström, J., & Chandra, S. (2003). Effect of superplasticizers on the rheological properties of cements. *Materials and structures*, 36, 685-692.
- BS EN 206, B. E. (2020). *Concrete. Complementary British Standard to BS EN 206: Method of Specifying and Guidance for the Specifier*. British Standards Institution.
- Castel, A., Foster, S., Ng, T., Sanjayan, J., & Gilbert, R. (2016). Creep and drying shrinkage of a blended slag and low calcium fly ash geopolymer Concrete. *Materials and structures*, 49, 1619-1628.
- Castillo, H., Collado, H., Droguett, T., Sánchez, S., Vesely, M., Garrido, P., & Palma, S. (2021). Factors affecting the compressive strength of geopolymers: A review. *Minerals*, 11(12), 1317.
- Chakradhara Rao, M., Bhattacharyya, S., & Barai, S. (2011). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and structures*, 44, 205-220.
- Chaliasou, N. A. (2020). *Recycling of fly ash-slag geopolymer concrete as aggregate in Portland cement mixes* University of Bath].
- Chamila, G., Sujeeva, S., & Nick, W. (2018). Engineering properties of geopolymer aggregate concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(11).
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., & Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 29(3), 224-229.
- Chithambaram, S. J., Kumar, S., & Prasad, M. (2019). Thermo-mechanical characteristics of geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 213, 100-108.

- Corinaldesi, V. (2010). Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1616-1620.
- Corinaldesi, V., & Moriconi, G. (2009). Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2869-2876.
- Da Silva, J. B., Pepe, M., & Toledo Filho, R. D. (2020). High temperatures effect on mechanical and physical performance of normal and high strength recycled aggregate concrete. *Fire Safety Journal*, 117, 103222.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633-1656.
- Davidovits, J. (2011). *Geopolymer Chemistry and Applications*. Geopolymer Institute. <https://books.google.com.tr/books?id=mJBotwAACAAJ>
- Diamond, S., & Huang, J. (2001). The ITZ in concrete—a different view based on image analysis and SEM observations. *Cement and Concrete Composites*, 23(2-3), 179-188.
- Domingo, N., & Luo, H. (2017). Canterbury earthquake construction and demolition waste management: issues and improvement suggestions. *International journal of disaster risk reduction*, 22, 130-138.
- EN, T. (2013). 1097-6.(2013). *Tests for mechanical and physical properties of aggregates-Part, 6*, 1-12.
- Environment, U., Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2-26.
- Ergün, A., Kürklü, G., Serhat, B. M., & Mansour, M. Y. (2013). The effect of cement dosage on mechanical properties of concrete exposed to high temperatures. *Fire Safety Journal*, 55, 160-167.
- Eryılmaz, K., POLAT, R., TURHAN, D., & KARAGÖL, F. (2023). Geopolimer Beton Atıklarından Elde Edilen Agregaların Geopolimer Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(1), 419-431.
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 735-742.
- Eurostat. (2020). *Generation of waste by waste category, hazardousness and NACE Rev.2 activity* [16.Dec]Available from. 2020. <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/>
- Ferreira, L., De Brito, J., & Barra, M. (2011). Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*, 63(8), 617-627.
- George, G., & Asha, K. (2022). Study on characteristic strength of Geopolymer Aggregate Concrete. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,
- Global Cement and Concrete Association, G. (2020). *Cement and concrete around the world*, <https://gccassociation.org/concretefuture/cement-concrete-around-the-world/>.
- Gowda, G., Rao, B., & Naik, S. (2017). Behavior of recycled aggregate concrete on exposed to elevated temperature. *International Journal of Civil Engineering*, 4(6), 5-13.

- Gupta, N., Siddique, R., & Belarbi, R. (2021). Sustainable and greener self-compacting concrete incorporating industrial by-products: A review. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124803.
- Han, Y., Cui, X., Lv, X., & Wang, K. (2018). Preparation and characterization of geopolymers based on a phosphoric-acid-activated electrolytic manganese dioxide residue. *Journal of Cleaner Production*, 205, 488-498.
- Hansen, T. C. (1986). Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. *Materials and structures*, 19, 201-246.
- Hansen, T. C., & Narud, H. (1983). Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete international*, 5(1), 79-83.
- Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2019). Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment—A review of mechanical properties and microstructure. *Journal of Cleaner Production*, 223, 704-728.
- Hossain, A. B., & Weiss, J. (2004). Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens. *Cement and Concrete Composites*, 26(5), 531-540.
- Huseien, G. F., Sam, A. R. M., & Tahir, M. M. (2022). *Geopolymers as Sustainable Surface Concrete Repair Materials*. CRC Press.
- Hwang, C. L., Vo, D. H., & Huynh, T. P. (2020). Physical–microstructural evaluation and sulfate resistance of no-cement mortar developed from a ternary binder of industrial by-products. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 39(5), e13421.
- Imtiaz, L., Rehman, S. K. U., Ali Memon, S., Khizar Khan, M., & Faisal Javed, M. (2020). A review of recent developments and advances in eco-friendly geopolymer concrete. *Applied sciences*, 10(21), 7838.
- Jia, D., He, P., Wang, M., & Yan, S. (2020). *Geopolymer and Geopolymer Matrix Composites*. Springer Singapore. <https://books.google.com.tr/books?id=VITazQEACAAJ>
- Jindal, B. B. (2019). Investigations on the properties of geopolymer mortar and concrete with mineral admixtures: A review. *Construction and Building Materials*, 227, 116644.
- Kanema, J. M., Eid, J., & Taibi, S. (2016). Shrinkage of earth concrete amended with recycled aggregates and superplasticizer: Impact on mechanical properties and cracks. *Materials & Design*, 109, 378-389.
- Katz, A. (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(5), 703-711.
- Kenai, S. (2018). Recycled aggregates. In *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete* (pp. 79-120). Elsevier.
- Konin, A., & Kouadio, D. M. (2011). Influence of cement content on Recycled aggregates concrete properties. *Modern Applied Science*, 5(1), 23.
- Kou, S.-C., & Poon, C.-S. (2013). Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 37, 12-19.
- Lahoti, M., Tan, K. H., & Yang, E.-H. (2019). A critical review of geopolymer properties for structural fire-resistance applications. *Construction and Building Materials*, 221, 514-526.

- Li, J. (2004). Study on mechanical behavior of recycled aggregate concrete. *Shanghai, Tongji University. Thesis, Master of Engineering.*
- Ling, Y., Wang, K., & Fu, C. (2019). Shrinkage behavior of fly ash based geopolymer pastes with and without shrinkage reducing admixture. *Cement and Concrete Composites*, 98, 74-82.
- Manzi, S., Mazzotti, C., & Bignozzi, M. C. (2013). Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 37, 312-318.
- Maranan, G., Manalo, A., Benmokrane, B., Karunasena, W., & Mendis, P. (2016). Behavior of concentrically loaded geopolymer-concrete circular columns reinforced longitudinally and transversely with GFRP bars. *Engineering Structures*, 117, 422-436.
- Mesgari, S., Akbarnezhad, A., & Xiao, J. (2020). Recycled geopolymer aggregates as coarse aggregates for Portland cement concrete and geopolymer concrete: Effects on mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 236, 117571.
- Mo, K. H., Alengaram, U. J., & Jumaat, M. Z. (2016). Structural performance of reinforced geopolymer concrete members: A review. *Construction and Building Materials*, 120, 251-264.
- Momeni, K. (2021). An overview of the properties and characteristics of geopolymer concrete with different base materials. *Modares Civil Engineering journal*, 21(6), 169-179.
- Noushini, A., & Castel, A. (2016). The effect of heat-curing on transport properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 112, 464-477.
- Oikonomou, N. D. (2005). Recycled aggregate concretes. *Cem. Concr. Compos*, 27(2), 315-318.
- Orangun, C., Jirsa, J., & Breen, J. (1977). A reevaluation of test data on development length and splices. *Journal Proceedings*,
- Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2014). Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive. *Materials & Design*, 53, 269-274.
- Parathi, S., Nagarajan, P., & Pallikkara, S. A. (2021). Ecofriendly geopolymer concrete: A comprehensive review. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23, 1701-1713.
- Pedro, D., De Brito, J., & Evangelista, L. (2017). 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.
- Polat, R. (2013). Genleştirilmiş perlit agregası, nano ve mikro boyutta CaO ve MgO ve kil'in yüksek mukavemetli betonların otojen rötreleri üzerindeki etkisi. *Fen bilimleri enstitüsü.*
- Poon, C. S., Shui, Z., & Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 18(6), 461-468.
- Prakash, K., & Krishnaswamy, K. (1998). Suitability of superplasticized recycled aggregate concrete in road construction. 8th International Symposium on Concrete Roads. Lisbon,
- Ramos, F. J. H. T. V., da Silva, M. H. P., Monteiro, S. N., Grafov, A., & Grafova, I. (2020). Recycled polypropylene matrix nanocomposites reinforced with silane functionalized

- geopolymer concrete waste. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 7540-7550.
- Rangan, B. (2009). Engineering properties of geopolymer concrete. In *Geopolymers* (pp. 211-226). Elsevier.
- Rao, A., Jha, K. N., & Misra, S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 71-81.
- Rashidian-Dezfouli, H., & Rangaraju, P. R. (2021). Study on the effect of selected parameters on the alkali-silica reaction of aggregate in ground glass fiber and fly ash-based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 271, 121549.
- Rehan, R., & Nehdi, M. (2005). Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry. *Environmental Science & Policy*, 8(2), 105-114.
- Ren, Q., Wu, Y., Zhang, X., & Wang, Y. (2022). Effects of fly ash on the mechanical and impact properties of recycled aggregate concrete after exposure to high temperature. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(2), 683-699.
- Sajan, K., Adhikari, R., Mandal, B., & Gautam, D. (2022). Mechanical characterization of recycled concrete under various aggregate replacement scenarios. *Cleaner Engineering and Technology*, 7, 100428.
- Sajedi, S. F., & Jalilifar, H. (2019). Evaluating and comparing the effect of zeolite, micro-silica, and fly ash on the mechanical properties of recycled concrete made of 100% recycled aggregates. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 6(Special Issue 4), 165-180.
- Salahuddin, H., Nawaz, A., Maqsoom, A., & Mehmood, T. (2019). Effects of elevated temperature on performance of recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 202, 415-425.
- Salau, M., Oseafiana, O., & Oyegoke, T. (2015). Effects of elevated temperature on concrete with Recycled Coarse Aggregates. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,
- Sarhat, S. R., & Sherwood, E. G. (2013). Residual mechanical response of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(11), 1721-1730.
- Shumuye, E. D., & Jun, Z. (2018). A review on ground granulated blast slag (GGBS) in concrete. Proceedings of the Eighth International Conference on Advances in Civil and Structural Engineering, CSE,
- Silva, R., De Brito, J., & Dhir, R. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201-217.
- Silva, R., de Brito, J., & Dhir, R. (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.
- Sofi, M., Van Deventer, J., Mendis, P., & Lukey, G. (2007). Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs). *Cement and Concrete Research*, 37(2), 251-257.
- Song, X., Wu, Y., Gu, X., & Chen, C. (2015). Bond behaviour of reinforcing steel bars in early age concrete. *Construction and Building Materials*, 94, 209-217.

- Spaeth, V., & Tegguer, A. D. (2013). Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2(2), 143-152.
- Sri Ravindrarajah, R., & Tam, C. (1985). Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Magazine of Concrete Research*, 37(130), 29-38.
- Sumajouw, D., Hardjito, D., Wallah, S., & Rangan, B. (2005). Behaviour and strength of reinforced fly ash-based geopolymer concrete beams. Australian structural engineering conference,
- Tabsh, S. W., & Abdelfatah, A. S. (2009). Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2), 1163-1167.
- Tam, V. W., & Tam, C. M. (2008). Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA_s and TSMA_{sc}. *Construction and Building Materials*, 22(10), 2068-2077.
- Tayeh, B. A., Zeyad, A. M., Agwa, I. S., & Amin, M. (2021). Effect of elevated temperatures on mechanical properties of lightweight geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00673.
- Topçu, İ. B., & Demir, A. (2007). Yüksek sıcaklık uygulama süresinin harç özelliklerine etkisi, 7. *Ulusal Beton Kongresi*, 455-463.
- TS13516. (2017). Determination of potential alkali reactivity of aggregates (mortar bar test method). Türk Standardları Enstitüsü. Ankara. In.
- TS 706 EN 12620+A1, T. S. E. (2009). Beton Agregaları ve Deneyleri. In Ankara.
- TS 802, T. S. E. (2016). Beton karışım tasarımı hesap esasları. *Ankara: Türk Standardları Enstitüsü*.
- TS EN 933-10, E. 2010. *Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm, 10*.
- TS EN 1097-6, T. E.-. (2013). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 6: Tane yoğunluğuve su emme oranının tayini. *Türk Standardları Enstitüsü. Ankara*.
- TS EN 12390-3. (2019). Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. Türk Standardları Enstitüsü. Ankara. In.
- TS EN 12390-5. (2019). Beton- Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini. Türk Standardları Enstitüsü. Ankara.
- Ulucan, M., & Alyamac, K. E. (2022). A holistic assessment of the use of emerging recycled concrete aggregates after a destructive earthquake: Mechanical, economic and environmental. *Waste Management*, 146, 53-65.
- Vieira, J., Correia, J., & De Brito, J. (2011). Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. *Cement and Concrete Research*, 41(5), 533-541.
- Wang, B., Yan, L., Fu, Q., & Kasal, B. (2021). A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 171, 105565.
- Wardeh, G., Ghorbel, E., Gomart, H., & Fiorio, B. (2017). Experimental and analytical study of bond behavior between recycled aggregate concrete and steel bars using a pullout test. *Structural Concrete*, 18(5), 811-825.
- Wong, H., Zobel, M., Buenfeld, N., & Zimmerman, R. (2009). Influence of the interfacial transition zone and microcracking on the diffusivity, permeability and sorptivity of cement-based materials after drying. *Magazine of Concrete Research*, 61(8), 571-589.

- World Health Organization, W. (2023). *Türkiye earthquake: external situation report no. 5: 13–19 March 2023*.
- Xiao, J., & Falkner, H. (2007). Bond behaviour between recycled aggregate concrete and steel rebars. *Construction and Building Materials*, 21(2), 395-401.
- Xiao, J., Fan, Y., & Tawana, M. (2013). Residual compressive and flexural strength of a recycled aggregate concrete following elevated temperatures. *Structural Concrete*, 14(2), 168-175.
- Xu, H., Provis, J. L., van Deventer, J. S., & Krivenko, P. V. (2008). Characterization of aged slag concretes. *ACI Materials Journal*, 105(2), 131.
- Xu, Z., Huang, Z., Liu, C., Deng, X., Hui, D., & Deng, S. (2021). Research progress on mechanical properties of geopolymer recycled aggregate concrete. *Reviews on Advanced Materials Science*, 60(1), 158-172.
- Xuan, D., Zhan, B., & Poon, C. S. (2018). Thermal and residual mechanical profile of recycled aggregate concrete prepared with carbonated concrete aggregates after exposure to elevated temperatures. *Fire and Materials*, 42(1), 134-142.
- Yang, C.-P. (2009). Composition of demolition wastes from Chi-Chi earthquake-damaged structures and the properties of their inert materials. *Canadian geotechnical journal*, 46(4), 470-481.
- Yang, K.-H., Chung, H.-S., & Ashour, A. F. (2008). Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties.
- Yazıcıoğlu, S., Tuğla, R., Ay, S., & Demirel, B. (2018). Effect of high temperature on compressive strength of concrete prepared using different types of aggregates. *Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017) Volume 1* 3,
- Youn, M. H., Park, K. T., Lee, Y. H., Kang, S.-P., Lee, S. M., Kim, S. S., Kim, Y. E., Ko, Y. N., Jeong, S. K., & Lee, W. (2019). Carbon dioxide sequestration process for the cement industry. *Journal of CO2 Utilization*, 34, 325-334.
- Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., & Wirquin, E. (2004). Frost resistance of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(10), 1927-1932.
- Zega, C. J., & Di Maio, A. A. (2009). Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 23(5), 2047-2052.
- Zhu, P., Hua, M., Liu, H., Wang, X., & Chen, C. (2020). Interfacial evaluation of geopolymer mortar prepared with recycled geopolymer fine aggregates. *Construction and Building Materials*, 259, 119849.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Sayed Ahmad Anis
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Saray Kerman Lisesi/ Ghor, Afganistan
Lisans:	Herat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü (2016) / Herat, Afganistan
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü (2023) / Erzurum, Türkiye
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Farsça:	İyi