

**T.C.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU BAĞLAYICILI GEOPOLİMER BETONUN  
YÜKSEK SICAKLIK DAYANIMINA İRİ LASTİK ATIĞININ VE NANO  
SİLİSİN ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Abdurrahman YOLCU**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ**

**OCAK 2023**

**T.C**  
**İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU BAĞLAYICILI GEOPOLİMER BETONUN**  
**YÜKSEK SICAKLIK DAYANIMINA İRİ LASTİK ATIĞININ VE NANO**  
**SİLİSİN ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Abdurrahman YOLCU**  
**36193621040**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ**

**OCAK 2023**

**İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ**

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU BAĞLAYICILI GEOPOLİMER BETONUN  
YÜKSEK SICAKLIK DAYANIMINA İRİ LASTİK ATIĞI VE NANO  
SİLİSİN ETKİSİ**

**Tezi Hazırlayan: Abdurrahman YOLCU  
Yüksek Lisans Tezi**



## TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ'a ;

Çalışmamın her aşamasında yardımlarını eksik etmeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Enes EKİNCİ, Sayın Arş. Gör. Ahmet ÖZCAN, Sayın İnş. Yüksek Müh. Mehmet Akif SAĞIR, Sayın İnş. Yüksek Müh. Aslıhan Nida DERİNPINAR ve laboratuvar sorumlusu Sayın İlhami BAYSAL'a ,

Çalışmalarımda ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmalarım süresince benden her türlü desteklerini esirgemeyen aileme,

Çalışmama FYL-2020-2371 ve FBA-2018-1282 numaralı proje ile maddi destek sağlayan İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimine

teşekkür ederim.

Bu çalışmanın literatüre katkıda bulunmasını dilerim.

Abdurrahman YOLCU  
İnşaat Mühendisi

## ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcı Geopolimer Betonun Yüksek Sıcaklık Dayanımına İri Lastik Atığının ve Nano Silisin Etkisi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Abdurrahman YOLCU



## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ .....	ii
ONUR SÖZÜ.....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT .....	xi
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ .....</b>	<b>3</b>
2.1. Geopolimer .....	3
2.1.1. Geopolimer beton .....	4
2.2. Yüksek Fırın Cürufu .....	6
2.3. Nano Silis .....	9
2.4. Lastik Atık.....	11
2.5. Yüksek Sıcaklık Etkisi .....	21
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>27</b>
3.1. Materyal .....	27
3.1.1. Yüksek fırın cürufu .....	27
3.1.2. Nano silis.....	27
3.1.3. Agregası.....	28
3.1.4. İri lastik atık.....	29
3.1.5. Alkali aktivatör .....	30
3.1.6. Aletler .....	31
3.2. Yöntem.....	34
3.2.1. Agregalara uygulanan deneyler .....	35
3.2.2. Geopolimer beton karışım oranlarının belirlenmesi .....	35
3.2.3. Geopolimer beton üretilmesi ve yerleştirilmesi .....	37
3.2.4. Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler .....	38
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>46</b>
4.1. Agregası Deneyleri İle İlgili Bulgular ve Tartışma.....	46

4.2.	Geopolimer Beton Kontrol Numunelerin Basınç Dayanımı .....	46
4.2.1.	Bağlayıcı dozajının GB kontrol numunelerinin basınç dayanımına etkisi ....	47
4.2.2.	İLA oranının GB kontrol numunelerin basınç dayanımına etkisi .....	48
4.3.	Geopolimer Beton Kontrol Numunelerin Eğilme Dayanımı .....	50
4.3.1.	Bağlayıcı dozajının GB numunelerin eğilme dayanımına etkisi .....	51
4.3.2.	İLA oranının GB numunelerin eğilme dayanımına etkisi .....	52
4.4.	Geopolimer Beton Kontrol Numunelerin Yarmada Çekme Dayanımı .....	53
4.4.1.	Bağlayıcı dozajının GB numunelerin yarmada çekme dayanımına etkisi ....	54
4.4.2.	İLA oranının GB numunelerin yarmada çekme dayanımına etkisi .....	55
4.5.	Geopolimer Beton Kontrol Numunelerin Darbe Dayanımı .....	57
4.5.1.	Bağlayıcı dozajının GB numunelerin darbe dayanımı üzerindeki etkisi .....	58
4.5.2.	İLA oranının GB numunelerin darbe dayanımına etkisi .....	59
4.6.	Geopolimer Beton Kontrol Numunelerin Kılcal Geçirimsizlik Katsayısı .....	60
4.7.	Yüksek sıcaklık Sonrası GB Numunelerinin Özellikleri .....	62
4.7.1.	Basınç dayanımı .....	62
4.7.2.	Ağırlık kaybı .....	65
4.7.3.	Kılcal geçirgenlik .....	67
4.7.4.	Darbe dayanımı .....	71
4.7.5.	Görsel inceleme .....	72
4.7.6.	Mikro yapı .....	77
<b>5.</b>	<b>SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>91</b>
	<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>93</b>
	<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>98</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 2.1:</b> Betonda lastik kullanımının avantaj ve dezavantajları (McMahon, 1999).....	13
<b>Çizelge 3.1:</b> Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi. ....	27
<b>Çizelge 3.2:</b> Nano silisin kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	28
<b>Çizelge 3.3:</b> İri lastik atık bileşimi. ....	30
<b>Çizelge 3.4:</b> Sodyum hidroksitin özellikleri. ....	30
<b>Çizelge 3.5:</b> Üretilen geopolimer beton numune kodları.....	36
<b>Çizelge 3.6:</b> Geopolimer beton karışımlarında kullanılan malzeme miktarları. ....	37
<b>Çizelge 4.1:</b> Dere agregalarının özgül ağırlıkları ve su emme oranı. ....	46
<b>Çizelge 4.2:</b> Kontrol numuneleri basınç dayanımı. ....	46
<b>Çizelge 4.3:</b> GB numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değerleri. ....	51
<b>Çizelge 4.4:</b> GB numunelerin yarmada çekme dayanımı değerleri. ....	54
<b>Çizelge 4.5:</b> GB numunelerin kırılgenlik indeks değerleri. ....	57
<b>Çizelge 4.6:</b> GB numunelerin darbe dayanımı testi değerleri, (J).....	58
<b>Çizelge 4.7:</b> GB numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısı değerleri. ....	61
<b>Çizelge 4.8:</b> GB numunelerin yüksek sıcaklık etkisi sonrasında basınç dayanım değerleri. ....	64
<b>Çizelge 4.9:</b> GB numunelerin ağırlık kaybı değerleri, (%). ....	66
<b>Çizelge 4.10:</b> GB numunelerin 250°C sonrası kılcal geçirimlilik katsayı değerleri. ....	68
<b>Çizelge 4.11:</b> GB numunelerin 500°C sonrası kılcal geçirimlilik katsayı değerleri. ....	68
<b>Çizelge 4.12:</b> GB numunelerin 750°C sonrası kılcal geçirimlilik katsayı değerleri. ....	69
<b>Çizelge 4.13:</b> GB numunelerin yüksek sıcaklıklar sonrası darbe dayanımı testi yapılarak elden edilen enerji değerleri, (J) ....	71



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Geopolimerizasyon süreci (Shi vd., 2011).....	4
Şekil 2.2: Geopolimer beton üretimi şematik gösterimi (Kantarcı, 2018). ....	6
Şekil 2.3: YFC'nin üretim şeması (Engin, 2015) .....	7
Şekil 2.4: Doğada biriktirilen atık lastikler.....	12
Şekil 2.5: Yüksek sıcaklık maruziyeti ile basınç dayanımı değişimi. ( Baradan vd., 2002)21	
Şekil 3.1: Yüksek fırın cürufu.....	27
Şekil 3.2: Nano silis.....	28
Şekil 3.3: İnce ve iri agrega. ....	29
Şekil 3.4: İri lastik atık.....	29
Şekil 3.5: Sodyum hidroksit.....	30
Şekil 3.6: Sarsma tablası ve elekler. ....	31
Şekil 3.7: Kalıplar.....	31
Şekil 3.8: Beton karışım mikseri. ....	32
Şekil 3.9: Etüv cihazı.....	32
Şekil 3.10: Basınç dayanım cihazı. ....	33
Şekil 3.11: Hassas terazi. ....	33
Şekil 3.12: Yüksek sıcaklık fırını. ....	34
Şekil 3.13: SEM-EDX cihazı. ....	34
Şekil 3.14: Basınç dayanımı deney düzeneği.....	39
Şekil 3.15: Eğilme dayanımı deney düzeneği.....	40
Şekil 3.16: Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği. ....	41
Şekil 3.17: Kılcal geçirimsizlik deney düzeneği. ....	42
Şekil 3.18: Geri tepme dayanımı deney düzeneği. ....	44
Şekil 3.19: Yüksek sıcaklık dayanımı deney düzeneği. ....	45
Şekil 4.1: Bağlayıcı dozajının GB numunelerin 28 günlük basınç dayanımı üzerine etkisi. ....	48
Şekil 4.2: GB numunelerin 28 günlük basınç dayanımına İLA oranının etkisi. ....	50
Şekil 4.3: Bağlayıcı dozajının GB numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı üzerine etkisi. ....	52
Şekil 4.4: İLA oranının GB numunelerin 28 günlük eğilme dayanımına etkisi. ....	53
Şekil 4.5: Bağlayıcı dozajının GB numunelerin yarmada çekme dayanımı üzerine etkisi. ....	55
Şekil 4.6: İLA oranının GB numunelerin 28 günlük yarmada çekme dayanımına etkisi. ....	56
Şekil 4.7: Köprülleme etkisi.....	57
Şekil 4.8: Bağlayıcı dozajının GB numunelerin darbe dayanımı üzerindeki etkisi. ....	59

<b>Şekil 4.9:</b> GB numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısı değerleri. ....	62
<b>Şekil 4.10:</b> GB numunelerin yüksek sıcaklık etkisi sonrasında basınç dayanım değerleri. 64	
<b>Şekil 4.11:</b> Yüksek sıcaklıkların etkisiyle basınç dayanımındaki oransal değişiklikler.....	65
<b>Şekil 4.12:</b> Yüksek sıcaklıkların etkisiyle ağırlıktaki değişim. ....	67
<b>Şekil 4.13:</b> GB numunelerin 250°C sonrası kılcal geçirimlilik katsayısı değerleri. ....	69
<b>Şekil 4.14:</b> GB numunelerin 500°C sonrası kılcal geçirimlilik katsayısı değerleri. ....	70
<b>Şekil 4.15:</b> GB numunelerin 750°C sonrası kılcal geçirimlilik katsayısı değerleri. ....	70
<b>Şekil 4.16:</b> Yüksek sıcaklıklar sonrası darbe dayanımı testi yapılarak elde edilen enerji değerleri.....	72
<b>Şekil 4.17:</b> 300 kg/m <sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin renk değişimi. ....	74
<b>Şekil 4.18:</b> 400 kg/m <sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin renk değişimi. ....	75
<b>Şekil 4.19:</b> 500 kg/m <sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin renk değişimi. ....	76
<b>Şekil 4.20:</b> 300 kg/m <sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları. ..	78
<b>Şekil 4.21 (devam) :</b> 300 kg/m <sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları. ....	79
<b>Şekil 4.22 (devam) :</b> 300 kg/m <sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları. ....	80
<b>Şekil 4.23 (devam) :</b> 300 kg/m <sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları. ....	81
<b>Şekil 4.24:</b> 400 kg/m <sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları...	82
<b>Şekil 4.25 (devam) :</b> 400 kg/m <sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları.....	83
<b>Şekil 4.26 (devam) :</b> 400 kg/m <sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları.....	84
<b>Şekil 4.27 (devam) :</b> 400 kg/m <sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları.....	85
<b>Şekil 4.28:</b> 500 kg/m <sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları ..	86
<b>Şekil 4.29 (devam) :</b> 500 kg/m <sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları.....	87
<b>Şekil 4.30 (devam) :</b> 500 kg/m <sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları.....	88
<b>Şekil 4.31 (devam) :</b> 500 kg/m <sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları. ....	89
<b>Şekil 4.32:</b> 500 kg/m <sup>3</sup> dozajlı bir GB numunenin EDX analizi. ....	90

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

<b>Al</b>	: Alüminyum
<b>CO<sub>2</sub></b>	: Karbondioksit
<b>CSH</b>	: Kalsiyum-Silikat-Hidrat
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Demir Oksit
<b>İLA</b>	: İri Lastik Atık
<b>K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></b>	: Potasyum Silikat
<b>KOH</b>	: Potasyum Hidroksit
<b>MgO</b>	: Magnezyum Oksit
<b>MgSO<sub>4</sub></b>	: Magnezyum Sülfat
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	: Sodyum Oksit
<b>Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></b>	: Sodyum Silikat
<b>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	: Sodyum Sülfat
<b>NaOH</b>	: Sodyum Hidroksit
<b>NS</b>	: Nano Silis
<b>PÇ</b>	: Portland Çimentosu
<b>SD</b>	: Silis Dumanı
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>Si</b>	: Silisyum
<b>SiO<sub>2</sub></b>	: Silisyum Dioksit
<b>TS</b>	: Türk Standartları
<b>UK</b>	: Uçucu Kül
<b>YFC</b>	: Yüksek Fırın Cürufu

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### YÜKSEK FIRIN CÜRUFU BAĞLAYICILI GEOPOLİMER BETONUN YÜKSEK SICAKLIK DAYANIMINA İRİ LASTİK ATIĞININ VE NANO SİLİSİN ETKİSİ

Abdurrahman YOLCU

İnönü Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

98+xi sayfa

2023

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

Bu çalışmada üç farklı bağlayıcı dozajının; (300 kg/m<sup>3</sup>, 400 kg/m<sup>3</sup> ve 500 kg/m<sup>3</sup>) geopolimer beton (GB) numunelerin, mekanik ve dayanıklılık özelliklerine etkileri %98 yüksek fırın cürufu (YFC) ve %2 nano silisten (NS) oluşan bağlayıcı içerisinde araştırılmıştır. Agregada bileşiminde ise ince agregada olarak doğal kum kullanılırken iri lastik atıklar (İLA) ise iri agreganın (4-8 mm) hacimce farklı oranlarında (%0, %5, %10 ve %15) ikame edilmiştir. Katı kısım tarif edildiği gibi elde edildikten sonra 12 mol sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi kullanılarak GB numunelerinin aktivasyonu sağlanmıştır. Çözelti/bağlayıcı (Ç/B) oranı 0,45'te sabit tutulmuştur. Üretilen GB numuneler, 28 gün boyunca oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılmıştır. Kürlenme süresini tamamlayan numuneler 1 saat süresince 250°C, 500°C ve 750°C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra mekanik (basınç, eğilme, yarmada çekme dayanımları ve darbe dayanımı), fiziksel (ağırlık değişimi ve kılcal geçirgenlik) ve mikro yapı özellikleri incelenmiştir. Deneysel bulgular, bağlayıcı dozajındaki artışın tüm mekanik özelliklerde önemli artışlara neden olduğunu ortaya koymuş ve bunun daha düşük bağlayıcı dozajı kullanılarak üretilen muadillerine göre daha yoğun ve daha kompakt bir mikroyapı oluşmasından kaynaklandığı tahmin edilmiştir. İLA kullanımının basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık dayanımı üzerindeki olumsuz etkilerinin yanı sıra, GB numunelerinin eğilme dayanımı, darbe dayanımı ve yarmada çekme dayanımı değerleri gibi diğer performans kriterleri İLA kullanımı ile önemli ölçüde iyileşmiştir. Sonuç olarak, deneysel bulgular iri lastik atıkların GB üretiminde kullanılmasının bazı mekanik ve dayanıklılık özellikleri açısından avantajlı olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Geopolimer, iri lastik atığı, yüksek sıcaklık, yüksek fırın cürufu, nano silis, kılcal geçirgenlik, darbe dayanımı.

## ABSTRACT

Master Thesis

### THE EFFECT OF COARSE TIRE WASTE AND NANO SILICA ON HIGH TEMPERATURE RESISTANCE OF GEOPOLYMER CONCRETE WITH BLAST FURNACE SLAG BINDER

Abdurrahman YOLCU

Inonu University  
Graduate School of Nature and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

98+xi paper

2023

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

In this study, geopolymer concrete (GB) samples of three different binder dosages (300 kg/m<sup>3</sup>, 400 kg/m<sup>3</sup> and 500 kg/m<sup>3</sup>); the effects on mechanical and durability properties were investigated in binder contents consisting of 98% blast furnace slag (YFC) and 2% nano silica (NS). In the aggregate composition; while natural sand was used as fine aggregate, coarse rubber waste (ILA) was substituted in different proportions (0%, 5%, 10% and 15%) of coarse aggregate (4-8 mm). After the solid was obtained as described, activation of the GB samples was achieved using 12 M sodium hydroxide (NaOH) solution. The Solution/binder (Ç/B) ratio was kept constant at 0.45. The produced GB samples were left to cure at room temperature for 28 days. After the samples, which completed the curing period, were exposed to temperatures of 250°C, 500°C and 750°C for 1 hour, their mechanical (compressive, bending, splitting tensile strength and impact strength), physical (weight change and capillary permeability) and microstructure properties were investigated. Experimental findings revealed that the increase in binder dosage resulted in significant increases in all mechanical properties and it was estimated that this was due to the formation of a denser and more compact microstructure than their counterparts produced using lower binder dosage. In addition to the negative effects of using ILA on compressive strength and high temperature resistance, other performance criteria such as flexural strength, impact strength and splitting tensile strength values of GB samples were significantly improved with the use of ILA. As a result, experimental findings showed that the use of coarse waste tire in GB production is advantageous in terms of some mechanical and durability properties.

**Keywords:** Geopolymer, coarse waste tire, high temperature, blast furnace slag, nano silica, capillary permeability, impact resistance.

## 1. GİRİŞ

Dünya çapında Portland çimentosu (PÇ) ile üretilen geleneksel beton, geride bıraktığımız son yüzyılda en fazla üretilen ürün olmakla beraber en fazla kullanılan yapı malzemesi olmuştur. Bu denli yüksek ürün talebini karşılamak amacıyla üretilen beton yüksek miktarlarda ham madde ve enerji tüketimine yol açarken geleneksel beton üretiminde kullanılan PÇ üretimi esnasında karbondioksit (CO<sub>2</sub>) gazı salınmaktadır (Zhang vd., 2014).

Küresel ısınmanın yol açtığı çevre sorunlarının artık toplumun tüm kesimlerini ilgilendiren bir sorun haline gelmesi, çimento üretiminden kaynaklanan CO<sub>2</sub> gazı salınımının en aza indirilmesine yönelik bazı girişimleri zorunlu kılmakta olup 1 kg çimento üretimi başına 0,81 kg CO<sub>2</sub> gazı salındığı bilinmektedir. Bu endişe verici miktar, çimentonun beton üretiminde artık vazgeçilmez bir bileşen olarak görülmemesi ve alternatif bağlayıcı malzemelerin geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Çimento üretiminden kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonlarının, yaklaşık yarısı kalsiyum karbonat (CaCO<sub>3</sub>) bileşeninin kalsinasyon işleminden kaynaklanırken geri kalanı kullanılan yakıtlardan kaynaklanır. Bu durum, enerji için kullanılan yakıtların daha çevre dostu hale getirilerek sorunların önüne geçilemeyeceğini ve çimentonun ana bileşeni olan CaCO<sub>3</sub>'ün varlığından kaynaklanan çevre kirliliğinin devam edeceğini ortaya koymaktadır. Kısaca çevre sorunlarının önüne geçebilmek için çimentoya göre daha çevreci üretim prosedürüne sahip bir yapı malzemesine ihtiyaç olduğu belirtilmektedir (Hendriks vd. 1998; Huntzinger ve Eatmon, 2014).

Öte yandan çevre için büyük tehlike oluşturan bir diğer konu da atık lastik kauçuğunun bertaraf edilmesidir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde nüfusa paralel olarak araç sayısının artmasıyla birlikte her yıl milyonlarca lastik üretilmektedir. Ülke ekonomisi üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olan otomotiv sektörünün yan sanayisi olan lastik sektöründe her yıl dünya çapında 1 milyarın üzerinde lastik satıldığı ve bu lastiklerin kullanım ömrünü tamamladıktan sonra atık lastik sınıfına girdiği bilinmektedir (Presti, 2013). Bu miktarlar göz önüne alındığında biyolojik olarak parçalanamayan atık lastiklerin depolanması için ne kadar büyük miktarda araziye ihtiyaç olduğu daha iyi anlaşılmaktadır. Petrol ürünleri içeren bu lastik atıklarının yeniden kullanımı sürdürülebilir bir ekonomi ve çevre için çok önemli bir konu olup, vulkanizasyon işlemi ile üretilen araç lastiklerinin elastomer zincirleri arasındaki çapraz bağlar nedeniyle yeniden kullanıma uygun olmadığı bilinmektedir (Zhang, 2009; Sadaka, 2012).

Bu noktada sürdürülebilir bir çevre ve verimli bir ekonomik döngü için çimento kullanılmayan ve agregaya yerine atık lastik partiküllerini tercih eden yenilikçi bir yapı malzemesinin varlığından bahsetmek gerekir. Atık lastiklerin depolanmasında çevreye verilen zararı en aza indirmesi, doğal kaynakların kullanımını azaltması yanı sıra çimento yerine atık puzolanik malzemelerin tercih edilmesiyle üretilen geri dönüştürülmüş geopolimer beton (GB) numunelerin performansının araştırılması ilgi çekici bir araştırma konusu haline gelmiştir (Singh, 2015).

Bu çalışmanın amacı çevre dostu, geri dönüşüm katkılı, ekonomik ve sürdürülebilir bir beton üretmektir. Bu çalışmada üç farklı bağlayıcı dozajının ( $300 \text{ kg/m}^3$ ,  $400 \text{ kg/m}^3$  ve  $500 \text{ kg/m}^3$ ) GB numunelerin mekanik ve dayanıklılık özelliklerine etkileri, %98 yüksek fırın cürufu (YFC) ve %2 nano silisten (NS) oluşan bağlayıcı içeriklerinde araştırılmıştır. Agregada bileşiminde ise ince agregaya olarak doğal kum kullanılırken, iri lastik atıklar (İLA) ise iri agreganın (4-8 mm) hacimce farklı oranlarında (%0, %5, %10 ve %15) ikame edilmiştir. Katı kısım tarif edildiği gibi elde edildikten sonra, 12 mol sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi kullanılarak GB numunelerinin aktivasyonu sağlanmıştır. Çözelti/bağlayıcı (Ç/B) oranı 0,45'te sabit tutulmuştur. Üretilen GB numuneler üretim sonrası kalıplara yerleştirilerek sertleşmeleri beklenmiştir. Sertleşme sonrası beton numuneler, 28 gün boyunca oda sıcaklığında küremeye bırakılmıştır. 28 günlük küreme işleminden sonra numuneler oda koşullarında ve yüksek sıcaklık fırınında  $250^\circ\text{C}$ ,  $500^\circ\text{C}$  ve  $750^\circ\text{C}$  olmak üzere üç farklı sıcaklığa bir saat boyunca maruz bırakılmıştır. GB numunelerine, yüksek sıcaklık öncesi; basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, darbe dayanımı (ribaunt testi), kılcal geçirgenlik deneyleri yüksek sıcaklık sonrası ise basınç dayanımı, darbe dayanımı, kılcal geçirgenlik ve ağırlık kaybı deneyleri yapılmıştır. Bahsi geçen deneylerden elde edilen sonuçlar, mikroyapısal analizlerle de doğrulanmak amacıyla GB numunelerden parçalar alınıp Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüsü elde edilmiştir.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

### 2.1. Geopolimer

Son kırk yılda geopolimer hakkında birçok araştırma yapılmıştır. Geokimyadan kaynaklanan mineral polimerleri ifade eden geopolimer terimini ilk kez 1978 yılında Davidovits kullanmıştır. O dönemde Avrupa'da çok sayıda yangın çıkması nedeniyle geopolimerlerin ilk amacı yangına karşı yüksek direnç gösteren bir bağlayıcı malzeme elde etmektir. Geopolimerler, alüminosilikat malzemelerin alkali silikat veya hidroksit aktivasyonu ile oluşturulan alkali alüminosilikat bağlayıcılarıdır (Duxon vd., 2005; Provis ve Van, 2009).

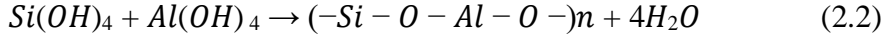
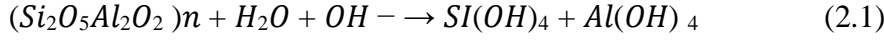
Katı bir alüminosilikatın yüksek konsantrasyonlu bir alkali hidroksit veya silikat çözeltisi ile reaksiyonu sonucunda, geopolimer olarak adlandırılan sentetik bir alkali alüminosilikat malzeme üretilir. Ancak daha geniş anlamda inorganik polimer olarak adlandırılan malzemenin bir örneği olarak daha uygun bir şekilde anılmaktadır. Bu alüminosilikat malzemeler, alkali aktivatörler [NaOH, sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), potasyum hidroksit (KOH) ve potasyum silikat ( $\text{K}_2\text{SiO}_3$ )] ile aktive edilir. Hammadde seçimine ve işleme koşullarına bağlı olarak, geopolimerler; yüksek basınç dayanımı, düşük büzülme, hızlı veya yavaş sertleşme, asit direnci, yangın direnci ve düşük termal iletkenlik dahil olmak üzere çok çeşitli özellikler sergileyebilir. Yaygın olarak övülen bu çok çeşitli özelliklere rağmen bu özellikler mutlaka tüm geopolimer formülasyonlara özgü değildir (Duxson vd., 2007).

Geopolimerizasyon, polisilikatlara reaksiyon vermek için silikat ( $\text{Si}_2\text{O}_5$ ) ve alüminat ( $\text{Al}_2\text{O}_2$ ) içerir, ortam içeren yüksek alkalın içinde üç boyutlu (Si-O-Al-O) polimerik bağlar üretir. Ayrıca, reaksiyon, sonunda sürdürülebilir geopolimer malzemenin temel yapısını oluşturan mineralleri (polimerik bağlar) içeren bir reaksiyon olarak tanımlanabilen bir geosentez (mineralleri kimyasal olarak entegre eden reaksiyon) olarak kabul edilir. Alkali çözeltide kolayca çözünen herhangi bir puzolanik bileşik veya silika ve alümina kaynağı, geopolimer öncü türlerinin bir kaynağı olarak işlev görür ve böylece geopolimerizasyona katkıda bulunur. Aktivatör olarak alkali bileşen, periyodik tablodaki birinci grup elementten bir bileşiktir bu nedenle bu tür malzemelere alkali ile aktifleştirilmiş alüminosilikat bağlayıcılar veya alkali ile aktifleştirilmiş çimentolu malzemeler de denir (Xu, 2000; Khale ve Chaudhary, 2007).

Tipik bir geopolimerin sentez süreci, katı alüminosilikat tozunun alkali hidroksit/alkali silikat reaksiyonuyla gerçekleşir. Polimerizasyon, reaktif alüminosilikatlar yüksek alkalın

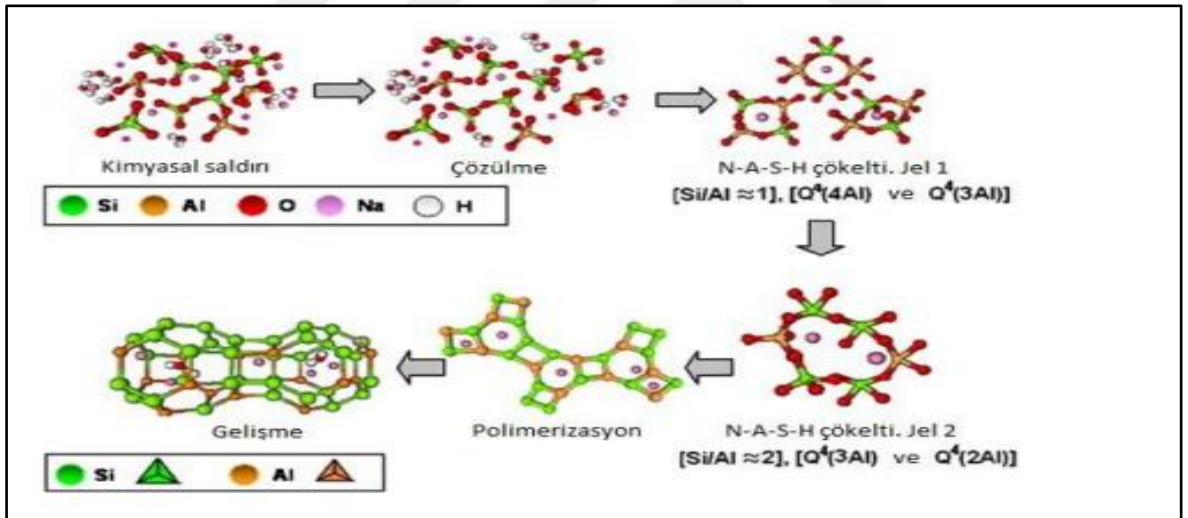


koşullar altında,  $\text{SiO}_4$  ve  $\text{AlO}_4$  tetrahedral birimlerini serbest bırakmak için çözelti içinde çözüldüğünde meydana gelir. Bu tetrahedral birimler, oksijen atomunu paylaşarak polimerik öncüye bağlanıp polimerik Si-O-Al-O bağları oluşturur. Geopolimer malzemenin şematik oluşumu Denklem 2.1 ve 2.2’de verilmiştir (Komnitsas, 2011; Singh vd., 2015).



Denklem 2.2, kimyasal reaksiyon sırasında suyun salındığını ortaya koymaktadır. Salınan bu su, karışımın işlenebilirliğini kolaylaştırırken ana kimyasal reaksiyonda rol oynamamaktadır (Komnitsas, 2011).

Şekil 2.1’de görülebileceği gibi, geopolimerizasyon işlemi, denge oluşana kadar alkali çözeltinin eklenmesinden sonra öncüldeki silika ve alüminanın çözünmesi ile başlar. Bundan sonra, jelleşme aşaması yeniden organize olur ve bağlanmaya devam eden basit bir yapısal form oluşturur. İşlem devam ettikçe, bir 3D alüminosilikat ağı oluşur ve daha sonra yapı yoğunlaşmaya başlar ve sonunda polimerleşme meydana gelir.



Şekil 2.1: Geopolimerizasyon süreci (Shi vd., 2011).

### 2.1.1. Geopolimer beton

İnşaat sektörünün en çok kullanılan malzemesi PÇ bağlayıcılı betondur. PÇ üretimi esnasında fosil yakıtların kullanımından ve kireç taşının kalsinasyonundan dolayı  $\text{CO}_2$ , azot dioksit, kükürt dioksit gibi çevreye zararlı ve zehirli gazların yanı sıra çeşitli tozlarda atmosfere salınmaktadır. PÇ üretimi, çevresel etkilerinin yanında yüksek miktarda enerjide gerektiren aşamalar içerir (Antoni ve Hardjito, 2015). Bu nedenlerden ötürü, PÇ’ye alternatif olarak; atık ürünlerinin geri dönüşümünü sağlayabilen, daha az doğal kaynak ve enerji

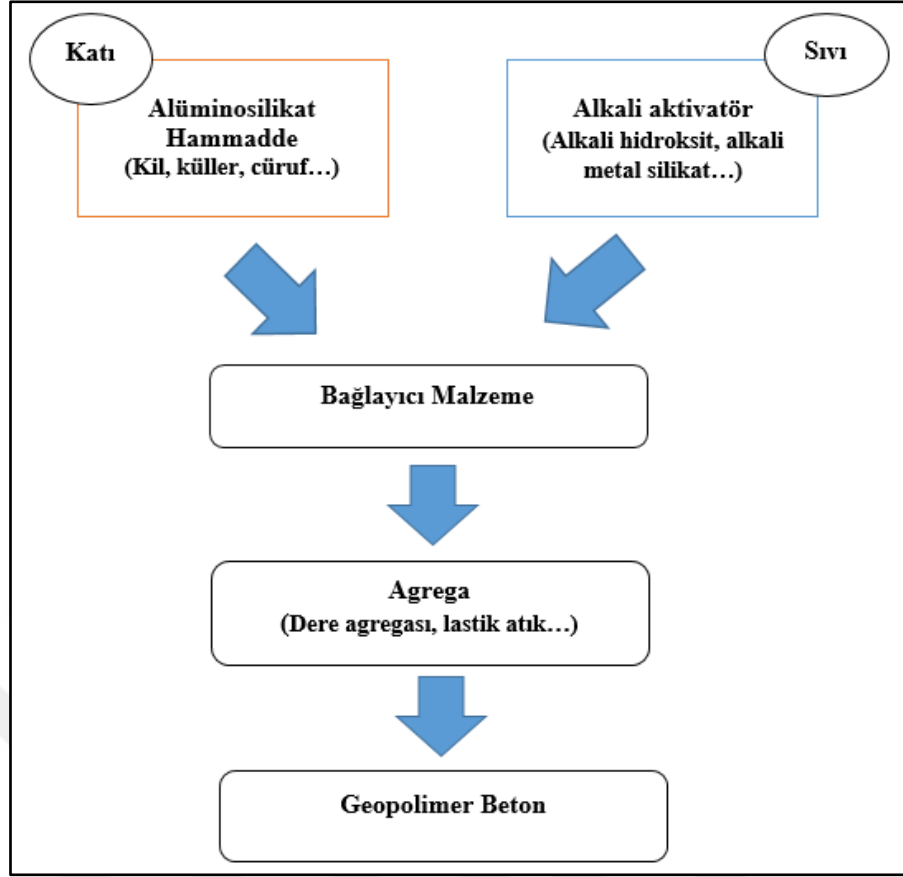
tüketen geopolimerler gibi yenilikçi ve sürdürülebilir yapı malzemelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

GB, uçucu kül, taban külü, YFC, pirinç kabuğu külü, silis dumanı (SD), metakaolin, volkanik tüfler, maden atıkları gibi farklı malzeme kombinasyonlarından oluşan geleneksel çimento betonuna alternatif bir malzemedir. Geopolimer terimi, zeolitlere benzer ancak amorf bir mikro yapıya sahip olan bir mineral bağlayıcı ve kimyasal bileşim ailesidir. Polimerlerde bulunan silika/alümina öncüllerinin polikondenzasyonu, polimerin yapısal mukavemetini kazanmasına yardımcı olan önemli bir mekanizmadır. GB alüminosilikat jeller, camlar ve zeolitler gibi alüminosilikat malzemelerden oluşan benzersiz bir malzemedir.

GB, basınç dayanımı, agresif ortama maruz kalma, işlenebilirlik ve yüksek sıcaklığa maruz kalma gibi birçok açıdan PÇ'li betondan daha iyidir. Aynı zamanda GB'nin geleneksel PÇ'li betona göre çeşitli ekonomik faydaları vardır. GB, benzer performansa sahip olan geleneksel PÇ'li betona göre uygun maliyetli, düşük karbonlu ve daha az enerji tüketen bir malzeme olarak işlev görerek geleneksel çimentolu betona göre daha iyi bir alternatiftir. Ayrıca CO<sub>2</sub> emisyonunu ve diğer çevre kirliliklerini azaltır. Son araştırmalar, altyapı uygulamalarında GB kullanımının ek ekonomik faydalar sağlayabilecek; düşük kuruma büzülmesi, düşük sünme, sülfat direnci, asit direnci ve yangın direncine odaklanmaktadır (Thamilselvi vd., 2017). GB üretimi şematik olarak Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

GB'nin geleneksel betona göre başlıca faydaları şunlardır (Li vd., 2004; Thamilselvi vd., 2017);

- Yüksek basınç dayanımı
- Yüksek aşınma direnci
- Hızlı ayar ve hızlı sertleşme
- Yangına dayanıklılık (1000-1200°C'ye kadar)
- Isıtma altında daha az zehirli duman emisyonu
- Farklı asitlere ve tuz çözeltileri saldırılarına karşı yüksek direnç
- Daha az zararlı alkali-agrega reaksiyonları
- Düşük büzülme ve termal iletkenlik
- Yüksek yüzey direnci
- Hammade kaynaklarının bol olması
- Enerji tasarrufu ve çevre korunumu.



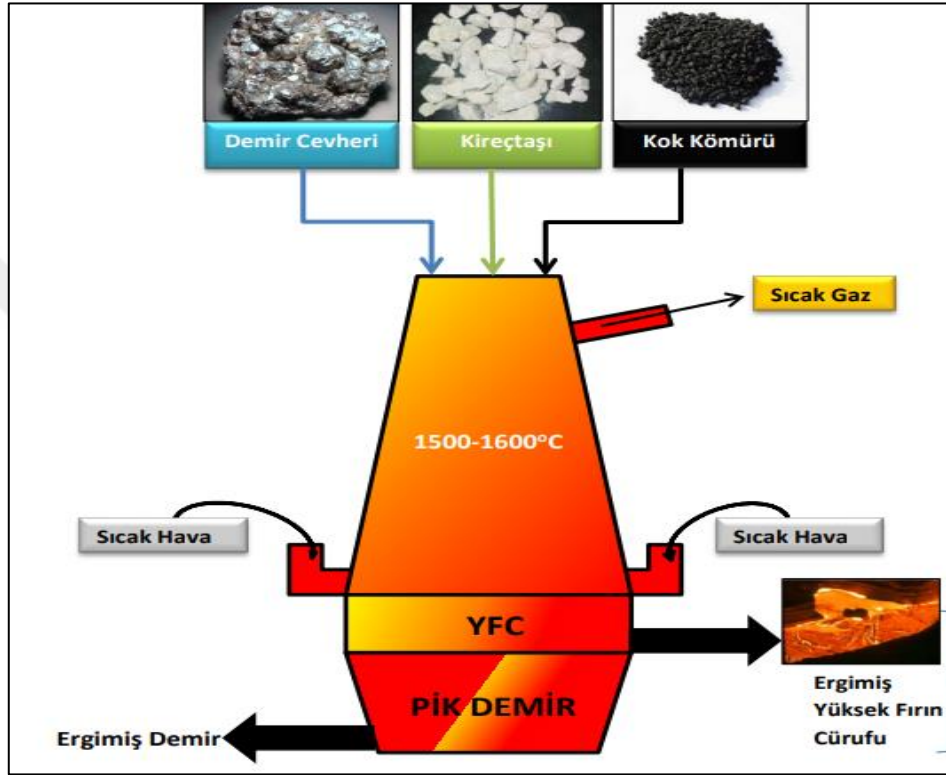
**Şekil 2.2:** Geopolimer beton üretimi şematik gösterimi (Kantarıcı, 2018).

## 2.2. Yüksek Fırın Cürufu

Demir cevheri doğada demir oksit olarak içerisinde bir miktar silika, alümina, kükürt gibi yabancı maddeler ile birlikte bulunmaktadır. Kullanıma uygun demir elde etmek için demir oksitteki oksijenin ayrılması ve yabancı maddelerin uzaklaştırılması gerekir. Bu işlemi yapabilmek için yüksek fırın diye adlandırılan bir fırın içerisine demir cevheri, kireç taşı ve cevher kademeleri oluşturularak kok kömürü yakılır, böylece yaklaşık 1600°C sıcaklığa ulaşılır. Demir oksitteki oksit ve yabancı maddeler bu sıcaklıkla birlikte ayrışır. Kok kömüründeki karbon ile demir oksitten çıkan oksijen birleşerek karbon monoksit veya CO<sub>2</sub> gazı olarak açığa çıkar. Geride eriyik durumda demir ve eriyik olarak yabancı maddeler (cüruf) kalır. Çıkan cüruf yavaş bir şekilde soğutulursa kristal bir yapıya sahip olur ve bazaltla benzer mekanik özellikler gösterir. Cürufun bu hali beton agregası olarak kullanılmaya uygundur. Eriyik halde CaO, silisyum oksit ve alimünyim oksit gibi oksitleri içeren cüruf suda aniden hızlı bir şekilde soğutulunca elde edilen cüruf; iri kum taneleri boyutunda amorf yapıya sahip granüle bir yapı ortaya çıkar. Bu şekildeki cürufa YFC denir. Granüle yapıdaki bu parçacıklar öğütülerek ince taneli bir hale getirilir. Öğütülmüş YFC

puzolanik özellik göstermektedir (Erdoğan, 2003; Erdoğan, 2007; Tokyay ve Erdoğan 2009).

YFC, çimento ve beton endüstrisinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. YFC puzolanik malzeme olarak kullanıldığında betonun işlenebilirliğini artırır, priz süresini uzatır, terlemeyi, hidrasyon ısını ve su geçirgenliğini azaltır. Ayrıca mekanik özellikleri iyileştirir, asidik ortamlarda dayanım sağlar ve sülfat direncini artırır (Dorum, 2018).



Şekil 2.3: YFC'nin üretim şeması (Engin, 2015)

Rajini vd., (2021) daha iyi bir geopolimerizasyon oluşumu için katkıda bulunan malzemeleri iyi tanımak adına numunelerin karakterizasyonu gereklidir anlayışıyla yaptıkları çalışmada UK ve öğütülmüş granüle YFC bazlı GB'nin, 28 günlük basınç dayanımını test etmişlerdir. Ayrıca karışımlar, X-Işını Kırınım analizi (XRD), SEM gibi çeşitli fiziksel-kimyasal yöntemlerin benimsenmesiyle karakterize edilmiştir. (Normal beton), ( UK: YFC-0: 100), (UK: YFC-25: 75 ), (UK: YFC-50: 50) oranlarında 4 grup numune üretilip aktivatör olarak NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılırken agrega olarak ise doğal nehir kumu ve kırma granit taşlar kullanılmıştır. En yüksek basınç dayanımı bağlayıcı olarak sadece YFC'nin kullanıldığı numunelerde 60 MPa olarak tespit edilmiştir. UK ilavesinin sistematik olarak basınç dayanımını azalttığı saptanmıştır. YFC'de kalsiyum varlığı, EDX analizi (ağırlıkça yaklaşık %18) ile doğrulanmış olup bu da YFC miktarındaki artışın

karışımdaki kalsiyum içeriğini önemli ölçüde artırdığını ve bunun bir kalsiyum silika hidrat (CSH) oluşumuyla sonuçlandığını göstermiştir. Bu nedenle, YFC'nin dahil edilmesi, bileşikler taşıyan ve ek bağlanma ürünlerine katkıda bulunan ek kalsiyum sağlamıştır. Bu aynı zamanda basınç dayanımını arttırmış, gözenekliliği azaltmış, daha kompakt bir jel yapısının oluşmasını sağlamış ve mekanik özellikleri iyileştirmiştir.

Mallikarjuna ve Gunneswara, (2018) yaptıkları çalışmada, UK ve YFC bazlı GB için karışım oranlarının seçilmesine yönelik sistematik bir yaklaşım sunmaktadırlar. UK ve YFC tabanlı geopolimer karışımının tasarlanmasındaki eksiksiz metodoloji hakkında çok az bilgi mevcuttur. UK ve YFC, alkali aktivatör solüsyonu olarak  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ve NaOH kullanılarak aktive edilmiştir.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  /NaOH aktivatör oranı 2,5 olarak alınmış ve NaOH çözeltisinin konsantrasyonu 8 M'de tutulmuştur. Bu çalışmada ele alınan ana parametreler, çeşitli UK ve YFC kombinasyonları için bağlayıcı dozajı ve Ç/B oranı olmuştur. Bu deneyde dikkate alınan değişkenler şunları içerir; bağlayıcı dozajı ( $360 \text{ kg/m}^3$ ,  $420 \text{ kg/m}^3$  ve  $450 \text{ kg/m}^3$ ), UK ve YFC oranları (70–30, 60–40 ve 50–50), alkali Ç/B oranları (0,45, 0,50, 0,55 ve 0,60) ve kürlenme koşulu (açık havada kürlenme ve fırında kürlenme). Sonuçlar, YFC içeriği ve alkali Ç/B oranının GB'nin basınç dayanımı ve işlenebilirliği üzerinde en etkili parametreler olduğunu ortaya koymuştur. Ç/B oranı 0,45 ve 0,50 olan karışımların tamamında bağlayıcı dozajı arttıkça basınç dayanımı artmıştır. Tüm bağlayıcı içeriklerinde YFC içeriğinin artmasıyla basınç dayanımının arttığı görülmektedir. UK'nin YFC ile değiştirilmesi basınç dayanımını artırmıştır. Bunun nedeni, zengin CSH jelinin oluşumudur. Ayrıca Ç/B oranı 0,45 ve 0,50 olan karışımların tamamında bağlayıcı dozajı arttıkça basınç dayanımı artmıştır.

Mermerdaş vd., (2017) yaptıkları çalışmanın ilk aşamasında, bağlayıcı içeriğinin, kürlenme sıcaklığının ve kürlenme süresinin hafif geopolimer harcının basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Geopolimer harç için kullanılan temel malzemeler öğütülmüş granül YFC ve UK'dir. Geopolimer harcın ana bileşenleri hafif pomza agregası ve alkali aktif UK veya öğütülmüş granüle YFC bağlayıcıdır. Yukarıda belirtilen parametrelerin etkinliği, geopolimer harçların basınç dayanımlarının varyasyonu açısından incelenmiştir. Deneyler  $60^\circ\text{C}$ ,  $80^\circ\text{C}$ ,  $100^\circ\text{C}$  ve  $120^\circ\text{C}$  kürlenme sıcaklıkları altında 2, 6, 8, 24, 48 ve 72 saatlik kürlenme süresi ile gerçekleştirilmiştir. Alkali aktivatör, 1:2.5 oranında  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ile 12 M NaOH çözeltisinin bir karışımıdır. Alkali çözeltinin bağlayıcıya oranı 0.50 olarak alınmıştır. Bağlayıcı içeriği  $650 \text{ kg/m}^3$  ile  $1250 \text{ kg/m}^3$  arasında  $100 \text{ kg/m}^3$ 'lük artışla alınmıştır. Geopolimer harçların basınç dayanımı gelişimini gözlemlemek için tam faktöriyel deneysel program benimsenmiştir. Bu nedenle 336 veri örneği elde edilmiştir.

Makalenin ikinci aşaması, bu deneysel parametreleri yanıt yüzeyi yöntemiyle optimize etmektir. Test sonuçları, bağlayıcı içeriğindeki artışın geopolimer harcın basınç dayanımını arttırdığını göstermektedir. YFC içeriğinde bağlayıcı dozunun artmasıyla basınç dayanımı 27.7 MPa'dan 33.3 MPa'ya yaklaşık %20 artış göstermiştir. Ayrıca basınç dayanımı harcın kürlenme sıcaklığının ve kürlenme süresinin artmasıyla da artış göstermiştir.

### 2.3. Nano Silis

Nano teknoloji, metrenin milyarda birine eşit olan nanometre (nm) boyutunu ifade eder. Nano teknolojik malzemeler birçok alanda kullanılmaktadır. Bu nedenle beton endüstrisinde nanometrik malzemelerin kullanımı beton teknolojisinin gelişimi için büyük bir potansiyele sahiptir.

Son zamanlarda, nano-teknolojik malzemelerin betonun özelliklerini önemli ölçüde artırması inşaat endüstrisini geliştirmiştir. Nano parçacıkların eklenmesiyle agrega ve çimento hamuru arasındaki bağ ve ara yüzey geçiş bölgesi güçlenir bunun sonucunda bağlanma daha kuvvetli olur. Çimento esaslı malzemelerin sertlik, kesme, çekme ve eğilme mukavemeti nano parçacıklar ile iyileştirilebilir. Ayrıca kayma düzlemleri arasında çatlak durdurma ve kenetlenme etkileri de sağlar (Nazari ve Riahi, 2011).

NS, betonun mekanik performansını, geçirimsizliğini ve dayanıklılığını arttırdığı için en çok tercih edilen nano malzemelerden biridir. NS'nin bu özellikleri artırma yeteneği, yüksek puzolanik yapısından kaynaklanmaktadır. Bu puzolanik yapı, hidrasyon sırasında serbest kireç ile reaksiyona girerek CSH jelinin oluşumuna neden olur (İbrahim, 2019).

NS yüksek yüzey alanı nedeniyle erken yaştan itibaren reaksiyon sürecine dahil olur. Alüminosilikat hammaddenin daha fazla reaksiyon yapması sonucu daha yüksek mukavemet kazandırması beklenir (Fernandez vd., 2008).

NS'nin yüzey alanı SD'den çok daha büyük olduğundan, NS'nin puzolanik aktivitesi SD'den daha fazladır. NS çok ince bir parçacık yapısına sahip olduğundan, çimento macunu karışımındaki büyük miktarda su, NS'nin yüksek puzolanik aktivitesi nedeniyle erken tükenir, bu da çimento macununun çok hızlı bir şekilde sertleşmesine ve jelin çok hızlı bir şekilde oluşması nedeniyle gözenekli bir yapı oluşturmasına neden olur. Bu, karışımın yüksek erken mukavemetine ve nihai mukavemete neden olur. Bütün bu olaylara NS'nin aşırı puzolanik aktivitesi neden olur. Ek olarak, nano malzeme betonların geçirgenliği düşüktür ve düşük geçirgenliğe sahip beton yüksek sülfat direncine sahiptir (Arslan, 2014).

Bu sayede betonun dayanıklılığı, mukavemeti ve sızdırmazlığı arttırılır. NS'nin geniş yüzey alanı nedeniyle, NS betonlarının yüzey alanı NS olmayan betonlarınkinden daha büyüktür. NS'li betonlar daha iyi geçirgenlik direncine sahiptir (Tao, 2005).

Yapı malzemelerinin durabilite özelliklerinin nano teknoloji ile iyileştirilebileceği, betona katılan mikro ve nano boyutlu malzemeler ile görülmüştür. Geopolimer bağlayıcı malzemelere de nano boyutlu maddeler katılarak durabilite özellikleri iyileştirilebilir (Kantarcı, 2018).

Kantarcı vd., (2021) tarafından yapılan çalışmada, NS, mikro-silika (MS) ve stiren-butadien lateksi (SBL) kullanarak volkanik tüf (VT) bazlı GB'nin yüksek sıcaklık performanslarını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla NS, MS ve SBL katkı maddeleri GB numunelerine bağlayıcı ağırlığına göre sırasıyla %2, %2 ve %5 oranlarında eklenmiştir. GB, öğütülmüş VT'nin 12 M NaOH çözeltisi ile aktive edilmesiyle elde edilmiştir. Üretilen GB numuneleri, hedef sıcaklığa ulaştıktan sonra 1 saat süreyle yüksek sıcaklıklara (100°C, 300°C, 500°C ve 700°C) maruz bırakılmıştır. Deneysel bulgular, GB'lerin basınç dayanımının, kullanılan katkı maddesinin türünden bağımsız olarak 300°C'ye kadar yükseldiğini, ancak 300°C'den yüksek sıcaklıkların, basınç dayanımı değerlerinde düşüşe neden olduğunu göstermiştir. Mekanik testler ve mikroyapı incelemeleri sonucunda MS ve NS katkısının GB'lerin yüksek sıcaklık performansını önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir. NS ve MS katkı maddeleri, kayan yüzeyler arasında çatlak durdurma ve kenetleme etkisi sağladıkları için GB'lerin basınç dayanımını ve yüksek sıcaklık dayanımını arttırmıştır. Yüksek sıcaklıklardan sonra GB örneklerinde parçalanma ve görünür boyutsal değişiklik yokken katkı maddelerinin eklenmesi çatlak oluşumunu azaltmıştır.

Mustakim vd., (2020) tarafından yapılan çalışmada, UK-öğütülmüş granüle YFC bazlı GB'de NS ve SD'nin etkisini araştırmışlardır. Bu araştırma için her biri %0.5, %1.0, %1.5, %2.0 ve %2.5 NS ve SD içeren beşer karışım hazırlanmıştır. Alkali aktivatör olarak 1:2 ağırlık oranında NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> karışımı kullanılmıştır. NaOH çözeltisinin konsantrasyonu 12 M'de tutulmuştur. NS ve SD karışıma eklendiğinde işlenebilirlik biraz artmıştır. Bu malzemelerin küresel parçacık şekli nedeniyle bilyeli yatak etkisinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, çökme değerlerinin, kontrol GB karışımına kıyasla daha iyi olduğu bulunmuştur. Hem SD hem de NS, hem taze hem de sertleştirilmiş GB örneklerinde önemli değişiklikler yapmıştır. Hem taze hem de sertleştirilmiş GB özellikleri göz önüne alındığında, optimum yüzdenin öğütülmüş granüle YFC içeriğinin %1.5'i olduğu bulunmuştur. Optimum NS içeren GB karışımından, 63 MPa'lık basınç mukavemeti elde

edilmiştir. SD ve NS ile modifiye edilmiş GB'nin taze ve sertleştirilmiş özellikleri incelendiğinde, hem SD hem de NS'nin çok düşük değiştirme seviyesinde GB özelliklerini geliştirdiği sonucuna varılabilir. Bununla birlikte, nano boyutlu parçacıklar ve yüksek reaktivite nedeniyle, NS içeren GB, silis dumanlı modifiye GB'den daha iyi performans göstermiştir. Sonuçlar, hem NS hem de SD'nin GB'nin özelliklerinin iyileştirilmesine yol açan geopolimer matrisinin yoğunlaşmasına yol açan daha yüksek bir geopolimerizasyonu kolaylaştırdığını göstermektedir.

Dinusha ve Socrates (2020) çalışmalarında F sınıfı UK'nin 10 M NaOH ile aktive edilen GB'ye; %0.5, %1, %1,5, %2, %2,5 düzeyinde NS eklenmesinin çeşitli etkilerini incelemişlerdir. Aynı zamanda ve en uygun NS düzeyini aramışlardır. Test sonuçlarını kullanarak, NS yüzdesindeki artışlarla betonun çeşitli mukavemet özelliklerinin NS düzeyinin %1.5 olduğu duruma kadar arttığı sonucuna varılmıştır. Fakat %1,5, %2 düzeyinde NS kullanılan GB'ler arasında çok fazla fark olmadığı belirlenmiştir. %2 den fazla NS kullanımı durumunda değerler düşüş göstermektedir. NS içeriğinin %2'nin üzerinde artmasıyla betonun dayanım özelliklerindeki azalmanın, yüksek içerikli NS ve UK varlığında oluşan düşük kaliteli bağlayıcıdan kaynaklandığı düşünülmektedir.

#### **2.4. Lastik Atık**

Betonun yaklaşık %70'ini oluşturan agregalar doğadan karşılanmaktadır. Yapılan çalışmalar ile doğal dere agregalarına alternatif malzemeler kullanıp doğal kaynakların tüketimini azaltmak aynı zamanda alternatif malzemenin geri dönüşümünü sağlayıp atık olmaktan çıkarmak hedeflenmektedir. Lastik atıkların imha edilmesi bütün dünyada sorun halindedir. Toprağa gömülmesi toprağın verimliliğini düşürürken yakılması çok ciddi hava kirliliğine neden olmaktadır.

Nüfusun hızla artan ulaşım talebi dikkate alındığında, ulaşım araçları için lastik üretimi katlanarak artmaktadır. Nihai lastiklerden büyük miktarda kauçuk atığı oluşur (Raffoul vd., 2017).

Lastiklerin ana bileşeni kauçuktur. Çapraz bağlı polimer özelliği taşıdıkları için dış etken olmaksızın şekil değiştiremezler (Emiroğlu, 2006).

Biyolojik olarak parçalanamayan bu atık lastikler Şekil 2.4'de görüldüğü üzere doğada geniş bir alan kaplamakta ve çevreye zarar vermektedir. Lastiklerin yakılması veya yakıt olarak



kullanılması çevreye zararlı zehirli gazlar üretir ve yıkıcı doğal hava kirliliğine neden olur (Thomas, 2016).

Beton, dünyada en çok kullanılan inşaat malzemesidir, bu nedenle betona eklenmesi bu atıktan kurtulmak için ekonomik ve uygun bir çözümdür. Betonun mukavemetini ve dayanıklılığını en üst düzeye çıkararak maliyetleri optimize etmek ve beton yapının çevre dostu olma özelliğini geliştirmek küresel bir ihtiyaçtır (Azevedo, 2012). Çizelge 2.1’de betonda lastik kullanımının avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

Kauçuk atık katkılı beton, normal betona göre daha düşük birim ağırlığa, daha yüksek dayanıklılığa ve daha yüksek enerji emme kapasitesine sahiptir. Ancak kauçuklu betonun çekme ve basınç dayanımları geleneksel betona göre daha düşüktür. Kauçuk içeren betonun basınç ve çekme dayanımını arttırmak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. (Emiroğlu, 2006).



**Şekil 2.4:** Doğada biriktirilen atık lastikler.

**Çizelge 2.1:** Betonda lastik kullanımının avantaj ve dezavantajları (McMahon, 1999)

Avantajları	Dezavantajları
<ul style="list-style-type: none"><li>• Düşük birim ağırlık (Hafif beton)</li><li>• Aşınmaya karşı yüksek direnç</li><li>• Yüksek süneklik</li><li>• Gevreklik artışı</li><li>• Yüksek elastikiyet, dayanıklılık ve esneklik</li><li>• Şok ve titreşim emme</li><li>• Çekme ve çatlamayı iyileştirme</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Düşük basınç dayanımı</li><li>• Düşük eğilme dayanımı</li><li>• Düşük çekme dayanımı</li></ul>

Aly vd., (2019) bağlayıcı olarak granüle YFC kullandıkları bu çalışmada aktivatör olarak NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılmışlardır. Agregada olarak ise iri ve ince doğal agregaların toplam hacminin %0, %10, %20 ve %30 oranlarına ikame olarak kırıntı kauçuk lastik (1-4 mm) atık kullanmışlardır. Cüruf bazlı GB'nin basınç, çekme, eğilme dayanımı ve darbe dayanımları 28 ve 60. günlerde test edilmiştir. %10 lastik ilavesinin basınç dayanımını arttırdığı, %20 ve %30 lastik ilavesinin beklendiği gibi basınç dayanımını azalttığı belirtilmiştir. Basınç dayanımının belirli lastik ikamesi ile artması NaOH'm lastik atıklarla reaksiyona girmesi sonucunda lastik yüzeyinde aşınma oluşturmasının olumlu etkilemesi olarak yorumlanmıştır. Lastik atık miktarının artması bu durumu olumsuz etkilemiştir. Çekme ve eğilme dayanımı lastik atık ikamesiyle yaklaşık %35 azalmıştır. Lastik miktarının artmasıyla darbe dayanımı artarak kontrol numunesinin 3 katı dayanımına ulaşmıştır. Bu artış lastik atıkların esnek ve yumuşak olmasına bağlanmış ve sonuç olarak parça kauçuğu değiştirilmemiş GB ile karşılaştırıldığında karışımın enerji emilimini önemli ölçüde artırdığı belirtilmiştir. Son olarak, çalışma yüksek basınç dayanımı, süneklik ve darbe dayanımına sahip karışımla köprü yaklaşma levhaları, demiryolu tamponları ve havalimanı gibi darbeye ve dinamik yüke maruz kalan yapısal elemanlarda kullanılabileceği belirtilmiştir.

Dong vd., (2021) kauçuklaştırılmış GB'nin çeşitli mekanik özelliklerini ölçmek için farklı kauçuk içerikli 10 karışımı, bağlayıcı bileşimleri ve işleme yöntemlerini deneysel olarak araştırmışlardır. Geri dönüştürülmüş parça kauçuk parçacıkları (2-5 mm), esas olarak 4-7 mm boyutlarındaki iri agregaların yerini almak için kullanılmıştır. Karışımlardan birinde daha kalın kauçuk (5-7 mm) kullanılmıştır. Bu kauçuklar NaOH ile ön işlemlere tabi tutulmuştur. Karışımlarda F sınıfı UK ve granüle YFC geopolimer bağlayıcılar olarak

kullanılmış ve bu karışımlardan birinde SD yer almıştır. Ç/B oranı 0,33 olan karışımlarda alkali aktivatör olarak 12 M NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> içeren bir hibrit aktivatör kullanılmıştır. Kauçuk içermeyen kontrol karışımı ile 56 günde 61.4 MPa'lık yüksek bir basınç mukavemeti elde edilirken, kauçuk içeriği arttıkça mukavemet azalmıştır. Kaba kauçuk kullanımı, aktivatör muamelesi kullanımı, SD veya aşırı aktivatör dozu kullanımı gibi diğer faktörlerin tümü, nispeten daha düşük mukavemet kayıplarına sonuçlanmıştır. Elastisite modülü ve çekme gerilme mukavemeti, geleneksel PÇ'li betona benzer şekilde, basınç dayanımının kareköküyle orantılı olmuştur. Tüm karışımlar tatmin edici çökme sonuçlarına sahipken düşük bir kauçuk dozajının işlenebilirliği artırabilirken %30'luk değiştirme oranında yüksek bir dozaj, çökme ve yayılma değerlerinde azalmalara neden olabileceği anlaşılmıştır.

Pham vd., (2020) hem iri hem de ince agregaların hacimce %0, %15 ve %30 yerini alan farklı parça kauçuklarının GB'nun dinamik basınç özellikleri üzerindeki etkisini Split Hopkinson Basınç Çubuğu testleriyle deneysel olarak araştırmışlardır. UK ve granüle YFC bağlayıcı olarak kullanılırken NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> alkali aktivatörler olarak tercih edilmişlerdir. GB'nin yüksek yükleme hızları altında darbe dayanımı, kauçuk içeriğinin artmasıyla iyileştirilmiştir. Benzer gerinim oranı göz önüne alındığında, kauçuk katkılı GB nispeten sağlam kalırken, normal GB küçük parçalara bölünmüştür. Normal GB'nun aksine kauçuk katkılı GB'da çatlak yayılımı büyük ölçüde yavaşlamıştır. Kauçuk katkılı GB basınç dayanımına göre normalize edilen enerji emilimi, yüksek gerinim hızında düz GB'ninkinden daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Luhar vd., (2019) yaptıkları çalışmada, kauçuklaştırılmış GB'yi ve normal PÇ'li betonu; basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü gibi bir takım deneyler üzerinden karşılaştırmışlardır. GB, F sınıfı UK'nin 14 M NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ile aktive edilmesiyle elde edilmiştir. Her iki betonda kullanılan kauçuklar hacimce %10, %20, %30 olarak ince agrega ile ikame edilmiştir. Atık kauçuk yüzdesi arttıkça, basınç dayanımı her yaşta azalmıştır. GB sadece 7 günde %95 basınç dayanımı kazanmıştır. Normal PÇ'li betonun basınç dayanımının GB'ninkinden daha az olduğu belirlenmiştir. Kauçuklaştırılmış GB'nin eğilme ve çekme dayanımı gibi gerilme özellikleri, kauçuk yüzdesi arttıkça artmıştır. GB'nin eğilme dayanımı 6,45 ile 9,97 MPa arasında değişirken, normal PÇ'li beton için bu değerler 5,35 ile 6,86 MPa arasında değişmektedir. Maksimum eğilme mukavemeti, kumun kauçukla %30 değiştirilmesinde gözlenmiştir. Bunun nedeninin, yayılan çatlaklar arasında daha iyi bir köprü sağlayan lif görevi gören kauçuklar olduğu düşünülmektedir. Tüm karışımlarda, kauçuk içeriği arttıkça elastisite modülünün

azaldığı görülmüştür. Kauçuk içeriği %0'dan %30'a çıkarken, GB'nin ve normal PÇ'li betonun elastisite modülü sırasıyla %36 ve %35 azalmıştır. Ayrıca karışıma daha fazla kauçuk eklendikçe aşınma direncinin arttığı belirlenmiştir.

Ali vd., (2020 ) tarafından yapılan çalışmada geopolimer karışımı elde ederken bağlayıcı olarak F sınıfı UK, alkali aktivatör olarak ise 10 M NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılmıştır. Karışımlar, geri dönüştürülmüş parçalanmış lastik kauçuğu içeriğine göre, dört farklı gruba ayrılırken (ince agrega hacminin %0, %10, %20 ve %30) parçalanmış lastik kauçuğu boyutları (0-2 mm ve 0-4 mm) olarak kullanılmıştır. %10'dan fazla olmayan parçalanmış lastik kauçuğu karışımlarında daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Aksine, parçalanmış lastik kauçuğunun daha yüksek fraksiyonlarında (%20 ve %30), daha düşük basınç mukavemeti, yoğunluk ve UPV gözlenmiştir. Lastiğin maksimum boyutunun 4 mm'den 2 mm'ye düşürülmesi, UK bazlı GB'nin mekanik performansında %20 artışa neden olmuştur. Kauçuk ile yapılan GB, normal betona göre %19 oranında daha düşük bir yoğunluğa sahip olmuştur. Kauçuğun hacmine göre kısmi ikame olarak kullanılması, 28 günde 2 ve 4 mm kauçuk için GB'nin ultrasonik darbe hızında sırasıyla %20 ve %30 oranında maksimum bir azalmaya neden olmuştur.

Gupta vd., (2015) yaptıkları çalışmada, ince agregaların atık kauçuklarla değiştirilmesinin betonun darbe dayanımına etkisini değerlendirmişlerdir. SD'de çimentonun ikamesi olarak kabul edilmiştir. Üç farklı sıvı/bağlayıcı (0.35, 0.45, 0.55) oranlı beton için altı kauçuk değiştirme seviyesi (%0, %5, %10, %15, %20 ve %25) ve üç SD değiştirme seviyesi (%0, %5 ve %10) dikkate alınmıştır. Beton üzerindeki etki testleri üç farklı teknikle yapılmıştır; düşme ağırlığı testi, eğilme yükleme testi ve geri tepme testi(ribaund) . Üç S/B oranının tümü için kauçuk liflerin ikame seviyesindeki artışla birlikte basınç dayanımının azaldığı görülürken aynı şekilde S/B oranının artmasıyla basınç dayanımı azalmıştır. Çimentonun SD ile değiştirilmesiyle, kontrol betonu ve kauçuk katkılı beton için basınç dayanımının arttığı belirtilmiştir. İlk çatlağa ve nihai arızaya neden olmak için gereken darbe sayısının, her üç S/B oranı için kauçuk içeriğinin ikame seviyesinin artmasıyla önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Kauçuk liflerin ikame seviyesindeki artışın, üç S/B oranının tümü için emilen darbe enerjisini önemli ölçüde iyileştirdiği görülebilir. İnce agregaların %25 oranında kauçuk liflerle değiştirilmesinde beton tarafından emilen darbe enerjisinin sırasıyla 0,35, 0,45, 0,55 S/B oranları için 1,79 J'den 1,99 J'ye, 1,77 J'den 1,96 J'ye ve 1,74 J'den 1,94 J'ye yükseldiği gözlemlenmiştir. Emilen darbe enerjisi üzerinde çimentonun SD ile değiştirilmesinin küçük bir etkisi olduğu gözlemlenebilir. Sonuç olarak çalışma; atık

kauçuğun, betonun darbe direncini ve sünekliğini iyileştirmek için sürdürülebilir bir malzeme olarak kullanılabilceğini göstermektedir.

Wongsa vd., (2018) geri dönüştürülmüş lastiklerden ince agrega olarak %100 kırıntı kauçuk 0-4 mm içeren hafif geopolimer harcın mekanik ve termal özelliklerini araştırmışlardır. Geopolimer bağlayıcı olarak NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> çözeltileri (10, 15, 20 M) ile aktive edilen yüksek kalsiyumlu UK kullanılmıştır. Geopolimer harcın yoğunluğunu ve termal iletkenliğini azaltmak için nehir kumunun 'tam' yerine kırıntı kauçuğu kullanılmıştır. Alkali çözeltinin UK oranı, NaOH çözeltisinin konsantrasyonu, çözelti oranı ve kürlenme sıcaklığının %100 kırıntı kauçuğu içeren geopolimerin mekanik ve termal özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Karışımların işlenebilirliği, basınç ve eğilme dayanımları, yoğunluk, gözeneklilik, su emme, ultrasonik hızı ve ısı iletkenliği ölçülmüştür. Karşılaştırma amacıyla nehir kumu kullanılan bir kontrol geopolimer harcı da hazırlanmıştır. Sonuçlar, nehir kumunun kırıntı kauçuğu ile değiştirilmesinin geopolimer harcın basınç dayanımını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Kırıntı kauçuk geopolimer harcının 28 günlük basınç ve eğilme dayanımları, nehir kumu içeren kontrol geopolimer harcınıkinden sırasıyla %93 ve %74 daha düşük olmuştur. Kırıntı kauçuklu geopolimer harcın gözenekliliği ve su emilimi, %100 nehir kumu içeren kontrol karışımınıkinden sırasıyla 1.5 ve 5.7 kat daha yüksek çıkmıştır. %100 kırıntı kauçuk içeren geliştirilmiş geopolimer harcın, çevre dostu, daha hafif ve geleneksel tuğla / bloklara göre daha iyi ısı yalıtımı sağlayan tuğla /blok yapımında kullanılabilir olabileceği belirtilmiştir.

Eren vd., (2021) yaptıkları bu çalışmada geri dönüştürülmüş lastik kauçuklarının ve çelik lifin (SF) kendiliğinden yerleşen alkali ile aktifleştirilmiş betonun taze ve sertleşmiş hal özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bağlayıcı olarak 500 kg/m<sup>3</sup> dozajlı öğütülmüş granüle YFC, 12 M NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH oranı 2,5 olan alkali aktivatör kullanılmıştır. %1 çengel uçlu SF ve iki tip astik kauçuk kullanılarak toplamda 6 farklı karışım üretilmiştir. Kırıntı kauçuklar ve lastik kauçuk parçaları, %10 ve %15 oranlarında doğal agregalara ikame olarak kullanılmıştır. Taze hal performansları T50 değeri, çökme akışı, V-huni ve L-Box testleri ile değerlendirilirken, mekanik performanslar basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımı testleri ile değerlendirilmiştir. Ayrıca detaylı çatlak ve mikroyapı analizleri yapılmıştır. Lastik kauçuklar, SF kullanımı ile beraber daha da azalan taze durum özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Lastikler arasında parça kauçuk içeren numuneler, kırıntı kauçuk içeren numunelerden daha düşük taze durum performansı sergilemiştir. Karışımların akışkanlığı ve geçiş yeteneği, kauçuk içeriği ve kauçuk partikül

boyutunun artmasıyla azalmıştır. %1 SF ve %15 parça kauçuğa sahip numuneler en düşük taze durum performansını sergilemiştir. Bununla birlikte, tüm karışımlar, ilgili yönergeler ve standartlara göre yeterli akışkanlığa ve geçiş kabiliyetine sahip olmuştur. Kauçuk kullanımı, basınç dayanımı sonuçlarını azaltmıştır. Basınç dayanımı düşüşü, kauçuk oranlarındaki artışla artmıştır (60 MPa'dan 49.31 MPa'ya yaklaşık %20 oranında). Aynı ikame oranları altında parça ve kırıntı kauçuk numunelerinde benzer basınç dayanımı değerleri elde edildiğinden, basınç dayanımının kauçuk boyutlarından bağımsız olduğu düşünülmüştür. SF'siz numunelerin yarmada çekme dayanımının, kauçuk katkıları ile hafifçe azaldığı, bununla birlikte, SF içermesi, kauçuklaştırılmış numunelerin yarmada çekme dayanımını önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür. Sonuçlar ayrıca parça kauçuk ve kırıntı kauçuklu numunelerde aynı değiştirme oranları altında benzer yarmada çekme dayanımı değerlerinin elde edildiğini göstermiştir. Sonuçlar; lifsiz numunelerin eğilme mukavemetinin, kauçuk oranının artmasıyla hafifçe azaldığını göstermiştir.

Afshinnia ve Poursaee, (2015) yüksek oranda reaktif agrega ile hazırlanan harç numunelerinde alkali-silika reaksiyonunun neden olduğu genleşmeyi azaltmak için kırıntı kauçuğun etkisini incelemiştir. Bu bağlamda, hızlandırılmış harç çubuğu testi için ince agrega ikamesi olarak hacimce %0, %16 ve %24 kırıntı kauçuk içeren harç çubukları hazırlanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, ince agrega ikamesi olarak %16 ve %24 ufalanmış kauçuğun kullanılmasının harç çubuklarındaki ASR genleşmesini sırasıyla %43 ve %39 oranında azalttığını göstermiştir. Ancak %16 ve %24 kırıntı kauçuk içeren harç küplerinin basınç dayanımı 28 günde sırasıyla %20 ve %47 oranında azalmıştır. Kırıntı kauçuk içeren numunelerin basınç dayanımındaki bu azalma, kauçuk parçacıkları ile çimento hamuru arasındaki zayıf bağlanmaya ve kauçuk parçacıklarının düşük elastisite modülüne bağlanmıştır. Termo-Gavimetrik Analiz (TGA), kauçuk parçacıkları ile betonun gözenek çözültisi arasında herhangi bir reaksiyon göstermezken, kırıntı kauçuk içeren harç çubuğu kesitlerinden yapılan SEM analizi, kırıntı kauçuk parçacıklarının fiziksel sönümlemesinin harçtaki alkali-silika reaksiyonunun neden olduğu genleşmeyi azaltma üzerindeki olumlu etkisini doğrulamıştır.

Pham vd., (2021) ince agregaların kırıntı kauçuğu ile değiştirilmesinin GB'nin özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Doğal ince agregalar kısmen hacimce %10, %20 ve %30 oranlarında kırıntı kauçuk ile değiştirilmiştir. Su, NaOH, çimento hamuru ve çok ince cüruf (UFS) gibi farklı yöntemler kullanılarak ön işleme tabi tutulmuş kırıntı kauçuğun GB'nin mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. GB karışımları, UK'nin 8 M NaOH ile aktif

edilmesiyle hazırlanmıştır ve 60°C sıcaklıkta kürlenmiştir. Taze ve sertleştirilmiş GB'nin çökme, yoğunluk, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastik modülü dahil olmak üzere özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca su emme ve asit saldırı direnci gibi dayanıklılık özellikleri de deneysel olarak incelenmiştir. GB üretiminde ön işleme tabi tutulmuş kırıntı kauçuk kullanımına rağmen, kırıntı kauçuk artışı ile tüm karışımlar için çökmede bir azalma gözlenmiştir. NaOH ile muamele edilmiş kauçuklar ile karışımlar maksimum çökme gösterirken, çimento ile muamele edilmiş kırıntı kauçuk karışımlarda minimum çökme elde edilmiştir. Kauçuk içermesi, basınç dayanımını azaltmıştır. UFS ile ön işleme tabi tutulan kauçuklu karışımlarda minimum dayanım azalması (28 günde %10, kauçukta %7) gözlenirken, ön işlem yapılmayan kauçuklu karışımlarda ise 28 günlük basınç dayanımında maksimum azalma (%30 kauçukda %35) elde edilmiştir. Kauçuğun yüksek su emilimi, daha yüksek boşluk hacmine ve düşük basınç dayanımına sahip gözenekli bir matrisin oluşmasına neden olmuştur. UFS nedeniyle hidrasyon ürünlerinin geliştirilmesi, tüm partiler arasında maksimum dayanım ile sonuçlanmıştır. GB numunelerinin geçirgenliği kauçuk içeriği ile artmıştır. Maksimum su emilimi ön işleme tutulmayan kauçuk karışımı (%30 kauçuk ilavesinde %9,3) iken, ön işlemin verimliliği nedeniyle NaOH ile işleme tabi tutulan kauçuk (%10 kauçuk ilavesinde %7,2) için minimum değer gözlenmiştir.

Feng vd., (2018) yaptıkları çalışmada İnce agreganın yerini alan kauçuk parçacıklarının çeşitli hacim fraksiyonlarına sahip kauçuk beton üzerinde statik ve dinamik çekme testleri yapmışlardır. %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında sırasıyla RC10, RC20, RC30, RC40 ve RC50 olarak adlandırılan Düzleştirilmiş Brezilya disk örneklerine, bir SHPB (Split Hopkinson Basınç Çubuğu) ve bir damla çekiç test makinesi ile orta gerinim, yüksek gerinim oranı altında çekme özelliklerini ve enerji emme yeteneklerini belirlemek için uygulanmıştır. Yüksek hızlı bir kamera ile SHPB ve damla çekiç çarpma testlerindeki numunelerin çatlak büyümesi gözlemlenmiştir. Beş kauçuk betonun ve kauçuk parçacıkları olmayan bir normal betonun deneysel sonucu elde edilmiştir. Statik testlerde kauçuk betonun elastik modülü, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı normal betona göre daha düşük olmuş ve ikame oranı arttıkça azalmıştır. Değiştirme oranı %40'ın üzerine çıktığında, basınç dayanımı %55 azalmıştır. Çekme dayanımı da azalmıştır. Nihai yarmada çekme dayanımı, basınç dayanımı eğilimine benzer şekilde, kauçuğun hacmi arttıkça 4,60 MPa'dan 2,21 MPa'ya (RC50) düşmüştür. Basınç dayanımı ile çekme dayanımının oranı olan kırılma indeksi betonun çatlak direncini değerlendirmek için önemli bir parametredir. Betona bir hacimde kauçuk karıştırıldığında, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı oranı normal

betondan daha düşüktür, ancak kum yerine geçen %30'luk bir hacim oranı (RC30) en düşük seviyededir. Kauçuk betonun enerji emme kapasitesi, kauçuk parçacıklarının enerji dağıtma kapasitesi nedeniyle normal betondan daha üstün olduğu ve enerji emme kapasitesinin, kauçuğun değiştirme oranıyla doğrusal bir korelasyona sahip olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, bu çalışmada %30 kauçuğun üzerinde bir değiştirme oranı önerilmemiştir. Yaklaşık % 30'luk oran, dinamik yükler üzerinde en iyi enerji emme ve darbe dayanımı performansını sunmuştur.

Gerges vd. (2018) beton karışımlarında alternatif bir ince agrega olarak geri dönüştürülmüş kauçuk tozu kullanmanın etkisini araştırmışlardır. Beton karışımlarındaki doğal kum kısmen %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kauçuk tozu ile değiştirilmiştir. Yoğunluk, basınç dayanımı, taze beton özellikleri, yarmada çekme dayanımı ve darbe dayanımı gibi fiziksel özellikler incelenmiştir. Beton karışımında toz kauçuk ile kısmi ince agregaların değiştirilmesi, kullanılan kauçuğun özgül ağırlığının ince agregalardan daha az olması nedeniyle nihai ürünün yoğunluğunun azalmasına yol açmıştır. Karışımdaki toz kauçuk içeriğinin artmasıyla kauçuklu betonun basınç dayanımında sürekli bir azalma tespit edilmiştir. Bu azalışın iki sebebi olduğu düşünülmüştür. Birincisi kauçuk parçacıkları çevredeki mineral malzemelerden çok daha yumuşak (elastik olarak deforme olabilir) olduğundan yükleme sırasında, karışımdaki kauçuk parçacıklarının etrafında hızla çatlaklar başlar ve bu da kauçuk-çimento matrisinin bozulmasını hızlandırır. İkincisi ise yumuşak kauçuk parçacıkları, kauçuk parçacıkları ile çimento hamuru arasındaki yapışma eksikliğinden dolayı beton matrisinde boşluk oluşumudur. Toz kauçuğun eklenmesi, tüm kauçuk yüzdelerinde beton çekme mukavemetinde hafif bir iyileşme sağlamış, ancak yine de basınç mukavemeti azalma oranına kıyasla daha az iyileşme sağlamıştır. Kauçuk oranı arttıkça enerji emilimi artmıştır. Kauçuklaştırılmış beton, tipik bir kırılma kırılmaya uğramadığından gelişmiş bir enerji emilimi sergilemiştir. Kauçuk betonun dinamik performansı, yüksek esnekliğe sahip olması nedeniyle, betonun içerdiği kauçuk partiküllerin dinamik performansı olumlu yönde etkilemesi nedeniyle büyük önem taşımaktadır. Kauçuklu beton karışımı, genel olarak, belirli yapısal uygulamalarda kullanımını sınırlayabilen azaltılmış bir basınç dayanımına sahip olsa da, geleneksel betona kıyasla daha düşük yoğunluk, daha yüksek tokluk ve daha yüksek darbe direnci gibi bir takım arzu edilen özelliklere sahiptir.

Liu vd., (2012) 0,178 mm, 1,11 mm ve 2 mm'lik seçilmiş kauçuk parçacıklarının ve 30 mm uzunluğunda %0,5'lik hacim fraksiyonunda çelik lif kullanımını içeren kauçuk takviyeli ve



kauçuk/çelik lif takviyeli betonun darbeye dayanıklılık performansı üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ağırlıkça fraksiyonu %5, %10, %15 ve %20 olan kauçuk partiküllerini içeren betonun dinamik performansı sırasıyla 0,2 MPa, 0,3 MPa, 0,4 MPa ve 0,5 MPa darbe yükleri altında incelenmiştir. Sonuç olarak, farklı darbe yükleri altında kauçuk betonarme ile ilgili gerilme-gerinim eğrileri elde edilmiş ve ilgili gerinim oranı seviyelerini yansıtmak için kullanılmıştır. Araştırma sonuçlarına dayanarak, gerinim oranlarının, kauçuk boyutlarının ve kauçuk içeriğinin kauçuk betonarmelerin darbe direnci üzerindeki etkisi tartışılmıştır. İnce agrega yerine lastik kauçuğu parçacıklarının beton matrisine dahil edilmesi, basınç dayanımında bir azalmaya neden olmuştur. Kauçuk takviyeli betonun (RRC) statik basınç dayanımı, kauçuk içeriğinin artmasıyla azalmıştır. Daha büyük kauçuk ebadına sahip RRC'nin statik basınç dayanımı, daha küçük kauçuk ebadına sahip RRC'ninkinden daha yüksektir. Çelik lif, belirli bir ölçüde, kauçuk betonun statik basınç dayanımını geliştirebilmiştir. RRC'nin enerji emme kapasitesi, kauçuk içeriği %10'un altında olduğunda kauçuk içeriğinin artmasıyla artmıştır. Bununla birlikte, kauçuk içeriği %10'un üzerinde olduğunda RRC'nin enerji emme kapasitesi azalmıştır. Genel olarak, RRC'nin enerji emme kapasitesi normal betonunkinden (NC) daha yüksektir. Deformasyon ve enerji emme kapasitesi, kauçuk içeriği sabit kaldığında kauçuk boyutlarının artmasıyla artmıştır. Çelik elyaf takviyeli kauçuk betonun (SFRC) deformasyon ve enerji emme kapasiteleri RRC'ninkine kıyasla geliştirilmiştir. Bu nedenle, SFRC'nin darbe direnci NC'ninkine kıyasla geliştirilmiştir.

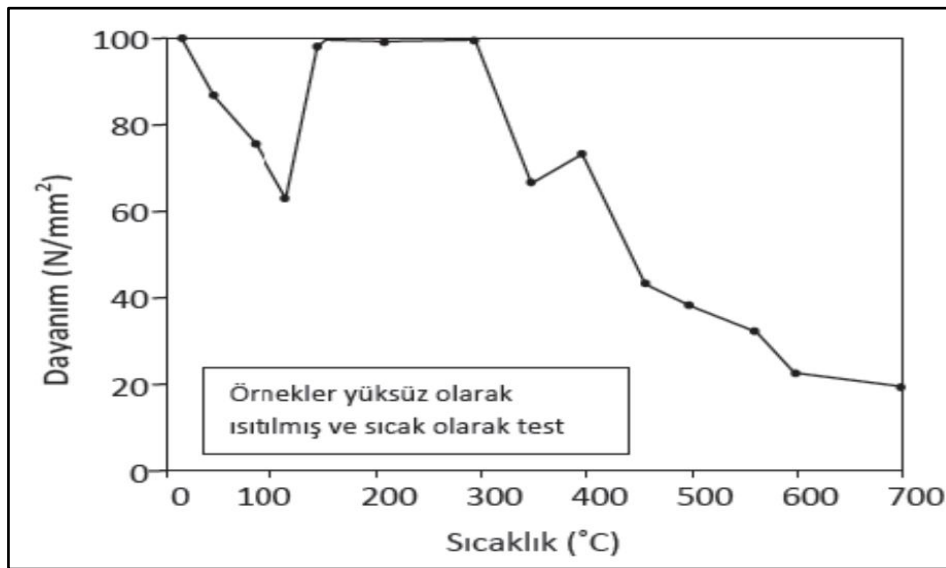
Gupta vd., (2014) tarafından yapılan çalışmada, ince agreganın yerine hacimce %0, %5, %10, %15 ve %20 oranında kauçuk külü ikame edilerek üç farklı S/B ( 0.35, 0.45, 0.55) oranlarında toplam 15 farklı kauçuk külü beton karışımı ve %10 kauçuk külü sabit tutularak ince agreganın yerine hacimce %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranında kauçuk lif ikame edilerek üç farklı S/B oranında toplam 18 farklı modifiye beton karışımı elde edilmiştir. Bu karışımların işlenebilirlik, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yoğunluk, su emme, aşınma direnci, karbonasyon derinliği, statik elastisite modülü, dinamik elastisite modülü ve klorür iyonu penetrasyonu elde edilmiştir. Bu çalışmada ayrıca XRD, EDAX ve SEM kullanılarak mikroyapısal çalışma yapılmıştır. Seçilen her bir S/B oranı için kauçuk külü betonun işlenebilirliği, artan kauçuk külü içeriği ile azalmış, ancak modifiye betonun işlenebilirliği kauçuk lif eklenmesinden etkilenmemiştir. Kauçuk külü betonun eğilme mukavemeti, kauçuk külü yüzdesinin artmasıyla azalırken, modifiye beton durumunda, kauçuk lif içeriğinin yüzdesinin artmasıyla eğilme mukavemeti artmıştır. Kauçuk külü betonun ve

modifiye edilmiş betonun su emilimi, değiştirme seviyesinin artmasıyla artmıştır. Statik ve dinamik elastisite modülündeki azalma, kauçuklaştırılmış beton karışımlarında olumlu bir kazanç olarak görülebilen daha yüksek esnekliği göstermiştir. Mikroyapısal analiz, kauçuk külü/lif ve çimento hamuru arasındaki ara yüzey bağı ve ara yüzde meydana gelen çatlama, atık lastik betonunun mukavemetinde azalmaya yol açan hattı göstermektedir. Yukarıdaki sonuçlar ışığında, lastik kauçuğu parçacıklarının betonda agrega olarak kullanılmasının, çeşitli koşullar altında kabul edilebilir özelliklere sahip yeni bir beton tipinin üretilmesinde umut verici sonuçlar verdiği şeklinde özetlenebilir.

## 2.5. Yüksek Sıcaklık Etkisi

Betonun yangın anında kalacağı yüksek sıcaklıklardaki davranışsal performansı; betonun yapısal bütünlüğünü koruyacak, yangına dayanıklılıktan ödün vermeyecek ve ısı saldırısından kusursuz koruma sağlayacak şekilde olması gerekir. Bu betonu yangına karşı güvenilir bir malzeme yapar.

Yapılarda beton sıklıkla kullanıldığından betonun yangın direncinin araştırılması ihtiyacı doğmuştur. Ancak gerçek bir yangında beton karmaşık, yüksek ve geçici bir sıcaklık etkisine maruz kalmaktadır. Bu nedenle betonda gerçek yangın etkisini araştırmak oldukça zordur. Beton yangın etkisinde ilk etapta önemli bir zarar görmez ve yangın esnasında zehirli gaz ile duman çıkarmaz. Ancak betonun yangına karşı olan bu dayanıklılığı sınırlı bir süre içindir. Şekil 2.5'te de görüldüğü üzere 600°C sıcaklığa maruz kalan normal beton bir eleman basınç dayanımının yaklaşık olarak %70'ini kaybetmektedir (Gülce, 2009; Baradan vd.,2012).



Şekil 2.5: Yüksek sıcaklık maruziyeti ile basınç dayanımı değişimi. ( Baradan vd., 2002)

Topal vd., (2021) yaptıkları çalışmada öğütülmüş YFC esaslı GB üretmişlerdir. Karışımlarda nehir agregası yerine %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında geri dönüştürülmüş beton, agrega olarak kullanılmıştır. Bu numuneler 100°C, 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Aktivatör olarak Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve 10 M NaOH kullanılmıştır. Sıcaklığa maruziyeti sonrası numunelerin soğutma işlemi hava, fırın ve su olmak üzere 3 farklı şekilde gerçekleştirilmiş söz konusu numunelerin basınç dayanımı, ultrason hızı (UPV), ağırlık kaybı, kılcal geçirgenlik ve su emme değerleri belirlenmiştir. Aynı zamanda, yüksek sıcaklık altında numunelerin mikro yapısındaki değişiklikler incelenmiştir. Karışımdaki geri dönüştürülmüş beton oranı arttıkça numunelerin basınç dayanımları azalmıştır. Yüksek sıcaklık nedeniyle numuneler ciddi şekilde etkilenmiş, numunelerin özellikleri azalmıştır. Sıcaklık derecesi arttıkça, numunelerin ağırlık kaybı ve kılcal geçirgenlik değerleri artmıştır. Numunelerin maruz kaldığı sıcaklıklar arttıkça Ca/Si oranında azalma ve Si/Al oranında artış olmuştur. Örneklerin mikro yapısı yüksek sıcaklıklarda bozulmuştur. Kontrol numuneleri arasında, geri dönüştürülmüş beton agrega içermeyen numune en yüksek basınç dayanımına (76,23 MPa) sahip olmuştur. Numunelerin soğutma tiplerine göre mukavemet kayıpları incelendiğinde en az kayıp hava soğutmalı numunelerde, en fazla kayıp ise su soğutmalı numunelerde olmuştur. Yüksek sıcaklık altında numunelerin maksimum basınç dayanımı kayıpları sırasıyla 100°C, 200°C, 400°C 600°C ve 800°C için %8, %40, %47, %64 ve %91'dir. Ayrıca 100°C sıcaklıkta basınç dayanımları 1 grup dışında yükselmiştir. Hem GB karışımlarında azalan nehir agrega oranı hem de numunelerin maruz kaldığı sıcaklıktaki artış numunelerin ağırlık kaybını artırmıştır. 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C'ye maruz bırakılan örneklerin renkleri sırasıyla gri, koyu gri, pembe ve koyu pembedir. Özellikle 400°C ve üzerinde numune yüzeylerindeki çatlak sayısı ve derinliği artmıştır. Sıcaklık arttıkça geopolimer jel yapıları bozulup 800°C de numunelerin mikro yapılarında kireç oluşumları meydana gelmiştir. Artan sıcaklıkla birlikte, geopolimer hamur ve agrega arasındaki ITZ zayıflamıştır.

Türkmen vd., (2016) tarafından çalışmada, yüksek sıcaklıkların iki alkali aktif alüminasilikat kompozitine (bunlardan biri dere kumu agregalı GB; diğeri ise kırma kum agregalı GB'dir.) ve sıradan PÇ'li beton etkileri basınç dayanımı ve su emilimi deneyleriyle incelenmiştir. Bağlayıcı olarak kullanılan Elazığ ferrokrom cürufü NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ile aktive edilmiştir. Tüm numuneler 75°C'de ve %60 bağıl nemde 72 saat bir buhar kürlenme makinesinde kürlenmiştir. Kürlenme işlemi sonunda numuneler deney gününe kadar laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. Üretilen beton numuneler hedef sıcaklığa (100°C,

200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C ve 700°C) ulaştıktan sonra 1 saat süreyle sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Numunelerin laboratuvar şartlarına soğutulmasının ardından, GB ve sıradan PÇ'li beton numunelerinin basınç dayanımları ölçülmüştür. Sertleşmiş beton numunelerde SEM ve X-ışını kırınımı (XRD) incelemeleri yapılmıştır. GB numunelerinin basınç dayanımının, 100°C ve 300°C sıcaklıklarda arttığı belirlenmiştir. GB örneklerinde en yüksek basınç dayanımı 37.06 MPa ile 300°C'de dere agregalarından elde edilmiştir. GB numunelerin su emilimi, diğer numunelere göre 700°C sıcaklıkta büyük ölçüde artmıştır. Bununla birlikte, beton numunelerinin su emiliminde 300°C'ye kadar hafif bir düşüş gözlenmiştir. Sıradan PÇ'li betonda sonuçlar, 700°C' ye maruz kaldıktan sonra %57 mukavemet düşüşü göstermektedir. Dere agregası ve kırma kum agregalı GB'nin sonuçları, 700°C'ye maruz kaldıktan sonra %46 ve %47 mukavemet düşüşü göstermektedir. Bu nedenle, GB numuneleri, basınç dayanımı açısından PÇ bazlı beton numuneleri ile karşılaştırıldığında yüksek sıcaklığa daha dayanıklıdır. 300°C'den yüksek sıcaklıklara maruz kalınca hidratasyon ürünlerinin önemli ölçüde ayrıştığı ve CSH jelinin bozulduğu belirtilmiştir.

Luhar vd., (2018) tarafından yapılan çalışmada, hem UK hem de atık kauçuk lastiğin bertaraf sorunlarına etkin bir çözüm sağlayan; doğal dere kumunun kısmi ikamesi (ince agregaların ağırlıkça % 10'u ) ile atık kauçuk lastik lifleri kullanılarak F sınıfı UK ile GB hazırlanmıştır. Oda sıcaklığında ve 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C'de iki saatlik ısı işleminden sonra kontrol ve kauçuklaştırılmış UK esaslı GB'nin ağırlığı, basınç dayanımı, yoğunluğu ve mikro yapısındaki değişiklikler incelenmiştir. Isıtma işlemi sırasında meydana gelen değişiklikler arasında nem kaybı, buharlaşma ve kimyasal yapının ayrışması yer almıştır. Sonuç olarak, 800°C sıcaklık maruziyetlerinde kauçuklaştırılmış GB'de kılcal çatlakların geliştiği bulunurken kontrol GB'de yüksek sıcaklıkta çatlaklar görülmemiştir. Tüm yüksek sıcaklıklarda, kontrol GB'nin kütle kaybı, kauçuklaştırılmış GB'ninkinden daha az olmuştur. Spesifik olarak, 800°C sıcaklıkta, kontrol ve kauçuklaştırılmış GB için ağırlık kaybının sırasıyla %15 ve %17 olduğunu görülmüştür. Kauçuklaştırılmış GB karışımlarının basınç dayanımının, kontrol GB'ye göre daha düşük olduğu görülmüştür. Kontrol ve kauçuklaştırılmış GB'lerin mukavemeti, 600°C'ye kadar ısı maruziyeti sonrası azalmıştır. Bununla birlikte, basınç dayanımı 600°C'den yüksek bir sıcaklığa maruz kaldığında artmış, 800°C'de 600°C'ye göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Mousa, (2017) çalışmasında, SD'li, farklı oranlarda ve boyutlarda geri dönüştürülmüş kauçuk lastik içeren betonun (HSC) basınç dayanımı üzerinde sıcaklığın etkisini

sunmaktadır. Elastomerik malzemenin çimentolu bir matris içine dahil edilmesinin amaçlarının, HSC'nin rijitliğini azaltarak yapının diğer malzemeleriyle uyumlu hale getirmek, katı atıkların geri dönüşümü ve yangına dayanımını artırmak olduğunu belirtmiştir. Bu çalışma için iki grup beton kullanılmıştır. Birinci grup, çimento içeriği 500 kg/m<sup>3</sup>, S/B oranı 0,3, iri agrega olarak çakıl ve çimento ağırlığı yerine %0, %10, %15 ve %20 SD içeren dört karışımdan oluşmaktadır. İkinci grubun beton formülasyonu çimentonun ağırlıkça %20'si oranında SD, agreganın hacimce %0, %3 ve %5' i oranında geri dönüştürülmüş ince kauçuk (2 mm) ve %3'ü oranında kaba kauçuk (5 mm) ile yer değiştirmesi ile üretilmiştir. Üretilen numuneler 22°C'den 800°C sıcaklığa kadar ısıya maruz bırakılmıştır. Dolomit, kauçuk içeren beton karışımlarının yüksek sıcaklıktaki performansını artırmak için ikinci grupta iri agrega olarak kullanılmıştır. Kauçuk parçacıkların yüzey dokusundaki mikroskobik bir artış yoluyla kauçuklaştırılmış betonun mukavemetini artırıp çevresindeki matris ile yapışmayı geliştirmek amacı ile kauçuk parçacıkları, 20 dakika boyunca alkalin NaOH çözeltisine batırılarak ön işleme tabi tutulmuştur. Artan kauçuk oranıyla basınç dayanımı ve çekme dayanımı doğrusal olarak düşüş göstermiştir. %3 ince kauçuğa sahip HSC'ye geri dönüştürülmüş kauçuk parçacıklarının dahil edilmesi, sıcaklığın artmasıyla basınç dayanımını iyileştirmiştir. Bununla birlikte, %3 kaba kauçukta gelişme 300°C'ye kadar sıcaklıkta basınç dayanımını geliştirmiştir. Sonuç olarak kauçuk betonlarda artan sıcaklıkta kontrol numunelerine göre daha fazla dayanım kaybı yaşanmıştır. Bu durumun nedeni beton matrisindeki su buharının, kauçuk parçacıklarının yanmasından sonra oluşan kanallardan kaçmasının yüksek boşluk basıncına neden olup çatlak oluşumu ile açıklanabilir. Ayrıca 300°C'ye maruz kalan betonlarda numunelerin rengi değişmezken, 400°C, 600°C ve 800°C'ye maruz kalan numunelerde sırasıyla sarımsı, siyah alanlı kırmızımsı ve kırık beyaz kısımlı açık gri renkler elde edilmiştir.

Marques vd., (2013) yaptıkları çalışmada, yüksek sıcaklıkların geri dönüştürülmüş lastik agrega ile üretilen betonun mekanik performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Doğal kaba agrega ile yapılmış bir referans beton ve kullanılmış lastiklerden %5, %10 ve %15 doğal ince ve kaba agrega ikame oranlarına sahip dört farklı beton bileşimi hazırlanmıştır. Numuneler 1 saat süre ile 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Ortam sıcaklığında soğutulduktan sonra, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı değerlendirilmiş ve yangına maruz kalmadan önce elde edilen referans değerlerle karşılaştırılmıştır. Artan lastik oranıyla basınç dayanımında ve yarmada çekme dayanımında %50'ye varan düşüşler yaşanmıştır. Artan sıcaklıkla hem lastik içeren beton hem de lastik

içermeyen numunelerde dayanım düşüklüğü yüksek oranlarda gerçekleşmiş ayrıca artan lastik oranıyla bu düşüş daha yüksek oranda gerçekleşmiştir. Mevcut deneylerde kullanılan değiştirme oranları için elde edilen sonuçlar, geri dönüştürülmüş lastik agregaya ile yapılan betonun, kabaca referans betonunkine benzer bir termal tepki gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, lastik agregalı betonun mekanik özellikleri, özellikle daha yüksek maruz kalma sıcaklıkları için, referans betonunkinden belirgin şekilde daha fazla etkilense de, göreceli azalma, yapısal uygulamalarda kullanılmasını engellememesi gerektiği belirtilmiştir.

Bengar vd., (2020) tarafından yapılan çalışmada, 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C gibi yüksek sıcaklıklarda ince agregayı %5, %10, %15 ve %20 oranında değiştirerek geri dönüştürülmüş lastik agregaya (RRA) içeren RRC'nin performansı araştırılmıştır. Bu amaçla, silindirik RRC'lerin fiziko-mekanik özellikleri, yani çekme, basınç dayanımı, elastisite modülü, rijitlik, en yüksek gerinim ve ağırlık kaybı, sıcaklıklardan sonra incelenmiştir. Sonuçlar, sıcaklık arttıkça beton numunelerin fiziko-mekanik özelliklerinde kayda değer bir bozulma olduğunu göstermektedir. Ayrıca, RRA ile yapılan numunelerin ısısal tepkisi, referans betonunkine (RC) nispeten benzer olduğu görülmüştür. Daha sonra, betonun mekanik özelliklerini yakalamak için bir dizi ampirik model önerilmiş ve bu çalışmadan çıkarılan sonuçlar ile ASCE, ACI 216, CEB-FIP 1990 ve EN 1992 kodlarına dayalı olarak tahmin edilenler arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Sonunda, ısı altında RRC özelliklerini tahmin edebilen ampirik bir denklem elde etmek için bir gerilim-gerinim modeli geliştirilmiş ve bu deneysel sonuçlarla kesin bir tutarlılık göstermiştir.

Derinpinar, (2021) yaptığı çalışmada bağlayıcının %0, %5, %10, %15 ve %20'si oranlarında cam tozunu YFC'ye ikame ederek elde ettiği GB numunelere; 150°C, 300°C, 450°C, 600°C ve 750°C sıcaklığa 1 saat boyunca maruz bıraktıktan sonra havada ve suda olmak üzere iki farklı soğutma işlemi uygulamıştır. Üretilen GB numuneler sıcaklık maruziyeti öncesi ve sonrası olarak çeşitli testlere (basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, kılcal geçirimsizlik, su emme) tabi tutulmuştur. Sonuç olarak GB beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım sonuçlarında zamanla dayanımın arttığı görülürken cam tozu miktarının artmasıyla basınç dayanımında azalma görülmüştür. Havada soğuyan numunelerde 300°C'de C0 numunesinde en yüksek, 750°C'de C20 numunesinde en düşük dayanım değerine ulaşılmıştır. Suda soğuyan numunelerde ise 150°C'de C0 numunesinde en yüksek dayanıma ulaşılmış ve 750°C sıcaklıkta dayanım değeri elde edilememiştir. Ayrıca havada soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanımı, suda soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanımından yüksek olduğu görülmüştür. Sıcaklık sonrası en yüksek kılcal geçirgenlik

değerleri %20 cam tozu ile elde edilirken, en düşük değerler %0 cam tozu ile elde edilmiştir. En düşük ağırlık kaybı, hava ve su soğutmalı numuneler için 150°C'de C0 numunesinde, en yüksek ağırlık kaybı ise hem hava hem de su soğutmalı numuneler için 750°C'de C20 numunesinde meydana gelmiştir.

Kuri vd., (2021) tarafından yapılan çalışmada, UK içeren öğütülmüş ferronikel cürufunun (GFNS) farklı yüzdelerin ve farklı sıcaklıklara maruz kalmanın geopolimer harçlar üzerindeki etkileri, 1000°C'ye kadar sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra kütle değişimi, çatlama davranışı, basınç dayanımı, mikroyapı ve ultrasonik darbe hızındaki değişiklikler ile değerlendirilmiştir. UK, %0, %25, %50 ve %75 GFNS ile ikame edilmiştir. Alkali aktivatör olarak 1:2 oranında 8 M NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılmıştır. Görsel gözlemler ve SEM görüntüleri, sıcaklığın artmasıyla geopolimer harcın boşluk ve çatlaklarının arttığını göstermiştir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıkta, UK-GFNS harmanlanmış geopolimer, UK geopolimer harcından daha iyi sıkıştırılmış bir yapı oluşturmuştur. UK-GFNS harmanlanmış geopolimer harçta geliştirilen N-M-A-S-H jeli, UK geopolimer harcına kıyasla onu yüksek sıcaklığa maruz kalmaya karşı daha yoğun ve kararlı hale getirmiştir. XRD sonuçları, 600°C'ye kadar tüm geopolimer örneklerinin kristal fazlarının ısıya maruz bırakılmadan öncekilerle hemen hemen aynı olduğunu göstermiştir. Sıcaklık 1000°C'ye yükseldikçe, kristal piklerin sayısı artmış ve amorf içerik önemli ölçüde azalmıştır. UK geopolimerinin N-A-S-H jelinin 1000°C'de faz dönüşümü nedeniyle yeni bir kristal türü bulunmuştur. Öte yandan, 1000°C'de UK-GFNS karışımı geopolimerin N-M-A-S-H jeli ayrılmış veya NaOH ve magnezyum silikat bazlı kristal fazlara dönüşmüştür.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Yüksek fırın cürufu

Bu çalışmada, GB numunelerin üretiminde bağlayıcının ağırlıkça %98'i oranında Karabük ilindeki Karçimsa firmasından temin edilen YFC kullanılmıştır. Kullanılan YFC yeterli incelikte olduğundan öğütülme işlemine gereksinim duyulmamıştır. YFC'nin özgül yüzey alanı  $3996 \text{ cm}^2/\text{g}$  iken özgül ağırlığı ise  $2,86 \text{ g/cm}^3$ tür. YFC'nin kimyasal bileşimi çizelge 3.1'de sunulmuştur. YFC'nin görüntüsü ise Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.1:** Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi.

Bileşim, (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cl
YFC	32.47	9.94	1.25	32.45	9.31	0.31	0.85	1.16	0.82	3.51	0.015



**Şekil 3.1:** Yüksek fırın cürufu.

##### 3.1.2. Nano silis

Bu çalışmada GB numunelerinin üretiminde bağlayıcının ağırlıkça %2'si oranında NS kullanılmıştır. Kullanılan NS'nin özgül ağırlığı  $2,20 \text{ g/cm}^3$ tür. Kullanılan NS Şekil 3.2'de gösterilmiş olup, bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.



**Çizelge 3.2:** Nano silisin kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Özellikler	
SiO <sub>2</sub>	%92
SO <sub>3</sub>	%0.80
Cl	%0.10
Serbest CaO	%0.70
Serbest Si	%0.25
Kızdırma kaybı	%2.42
Ortalama tane çapı	%100 nm
Hacimsel yoğunluk	600 kg/m <sup>3</sup>
28. gündeki puzolanik aktivite indeksi	%100
Renk	Gri
Erime noktası	1560°C



**Şekil 3.2:** Nano silis.

### 3.1.3. Agregas

Bu çalışmada, GB numuneleri üretiminde, 0-4 mm tane çapında dere kumu ince agregas olarak kullanılırken 4-8 mm tane çapında dere agregası iri agregas olarak kullanılmıştır. En büyük agregas tane çapı 8 mm olarak seçilmiştir. GB üretiminde kullanılan agregas dağılımı; TS 802 (2016)'da yer alan grafikten optimum bölge uygunluğu göz önünde bulundurularak hacimce ince agregas %65, iri agregas %35 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan agregalardan alınan örnekler üzerinde yapılan deney sonuçları Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir. Kullanılan agregalar Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.3:** İnce ve iri agrega.

#### **3.1.4. İri lastik atık**

Bu çalışmada, GB üretiminde agregaya belirli oranlarda ikame edilerek 4-8 mm boyutunda İLA kullanılmıştır. Kullanılan İLA Malatya ilinde bulunan Çetinkayalar Otomotiv firmasından temin edilmiş olup, özellikle tır lastiklerinin kaplama işlemleri için hazırlanması sırasında, raspa makinesinin kullanılmasıyla açığa çıkan malzemenin uygun elekten elenmesi ile elde edilmiştir. İLA'nın yoğunluğu  $1.10 \text{ g/cm}^3$ tür. İLA Şekil 3.4'de gösterilmiştir. İLA'nın bileşimi ise Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.4:** İri lastik atık.

**Çizelge 3.3:** İri lastik atık bileşimi.

BİLEŞEN	KÜTLECE AĞIRLIK (%)
Kauçuk	47.0
Metal	16.5
Katkı maddeleri	7.5
Tekstil elyaf	5.5
Çinko oksit	1.0
Kükürt	1.0

### 3.1.5. Alkali aktivatör

Bu çalışmada, GB üretiminde aktivatör olarak NaOH çözeltisi kullanılmıştır. 12 M konsantrasyonuna sahip çözelti elde edilirken musluk suyu kullanılmıştır. Kullanılan NaOH'in kimyasal özellikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir. Kullanılan NaOH ise Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

**Çizelge 3.4:** Sodyum hidroksit özellikleri.

Özellikler	Sodyum Hidroksit
Molekül formülü	NaOH
Molekül kütlesi (g/mol)	40.00
Renk	Beyaz
pH	13-14
Bağıl yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2.13



**Şekil 3.5:** Sodyum hidroksit.

### 3.1.6. Aletler

#### 3.1.6.1. Elekler

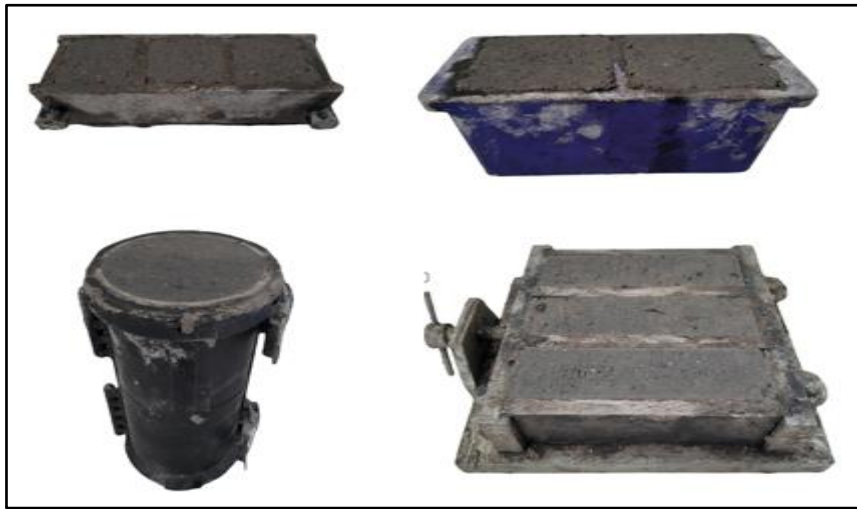
Bu çalışmada, GB üretiminde kullanılan agregalar; TS 706 EN 12620+A1 (2009)'a uygun olarak 4 mm ve 8 mm göz açıklığına sahip elekler kullanılarak elenmiştir. Agraga Eleme işleminde kullanılan sarsma tablası ve elekler Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Sarsma tablası ve elekler.

#### 3.1.6.2. Kalıplar

Bu tez çalışması kapsamında üretilen GB numuneleri; 50x50x50 mm, 100x100x100 mm, 40x40x160 mm ve Ø100x200 mm boyutlarındaki Şekil 3.7'de gösterilen kalıplara yerleştirilmiştir.



Şekil 3.7: Kalıplar.

### 3.1.6.3. Beton karışım mikseri

Bu çalışmada, GB üretiminde kullanılan malzemeler karıştırılırken Şekil 3.8’de gösterilen UTEST markalı beton karışım mikseri kullanılmıştır.



Şekil 3.8: Beton karışım mikseri.

### 3.1.6.4. Etüv

Bu çalışmada, GB üretiminde kullanılan agregaların özgül ağırlığını belirlemek için yapılan deneylerde ve GB numunelerine yapılan deneylerde Şekil 3.9’da gösterilen Mikrotest marka dijital termostatlı etüv cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.9: Etüv cihazı.

### 3.1.6.5. Basınç dayanım cihazı

Bu tez çalışması kapsamında üretilen GB numunelerine ait basınç dayanım değerleri tayin edilirken 3000 kN yükleme kapasitesine sahip tek eksenli ELE marka otomatik basınç dayanım test cihazı kullanılmıştır. Şekil 3.10'da gösterilen basınç dayanım cihazı kullanılırken üretilen GB numune boyutlarına uygun başlık aparatı kullanılmıştır.



Şekil 3.10: Basınç dayanım cihazı.

### 3.1.6.6. Hassas terazi

Tez çalışması süresince GB numune üretiminde ve deney aşamalarında ağırlık ölçümlerinde, Şekil 3.11'de gösterilen 0.01 g hassasiyete sahip hassas terazi kullanılmıştır.



Şekil 3.11: Hassas terazi.

### 3.1.6.7. Yüksek sıcaklık fırını

Bu tez çalışması kapsamında üretilen GB numuneler, yüksek sıcaklık testine tabi tutulurken Şekil 3.12'de gösterilen yüksek sıcaklık fırını kullanılmıştır.





**Şekil 3.12:** Yüksek sıcaklık fırını.

### 3.1.6.8. SEM-EDX cihazı

Bu tez çalışması kapsamında üretilen GB numunelerinin içyapısını incelemek amacıyla Şekil 3.13'te gösterilen LEO EVO 40 marka SEM cihazı kullanılmıştır.



**Şekil 3.13:** SEM-EDX cihazı.

## 3.2. Yöntem

Bu bölümde; GB numuneleri üretiminde kullanılan agregalara uygulanan deneyler, üretim esnasında kullanılan karışım oranları, GB numunelerin kalıplara yerleştirilip kür edilmesi ve

kür süreleri tamamlayıp sertleşen GB numunelerine uygulanan deneyler ayrıntılarıyla verilmiştir.

### **3.2.1. Agregalara uygulanan deneyler**

GB karışımında tane çapı 0-4 mm olan dere kumu ve tane çapı 0-8 mm olan dere agregası kullanılmıştır. Numune alımında TS EN 931-2'de belirtilen çeyrekleme metodu kullanılmıştır. GB üretiminde kullanılan agregaların karışım oranları; TS 802 (2016)'da yer alan grafikten optimum bölgeye uygunluğu göz önünde bulundurularak, hacimce ince agrega %65, iri agrega %35 olarak belirlenmiştir.

GB üretiminde kullanılan agregaların özgül ağırlıklarını belirlemek amacıyla aşağıda belirtilen deneyler uygulanmıştır. İri agregadan çeyrekleme metoduyla alınan belirli miktardaki numune, 24 saat boyunca etüvde kurutulmuştur. Numune, etüvden çıkartıldıktan sonra tartılıp Arşimet deneyi ile hacmi bulunmuştur. Hacmi bulunan iri agrega numunesinin kuru yüzey özgül ağırlığı hesaplanmıştır. Doygun yüzey kuru ağırlığını hesaplamak için ise aynı iri agregalardan çeyrekleme metoduyla bir miktar numune alınarak 24 saat suda bekletilmiştir. 24 saatin sonunda havlu yardımıyla iri agregaların yüzeyleri kurutulduktan sonra tartılmıştır. Kurutulan numunelere Arşimet deneyi uygulanarak hacimleri bulunmuştur. Daha sonra numunelerin doygun yüzey özgül ağırlığı hesaplanmıştır.

İnce agregadan çeyrekleme metoduyla alınan bir miktar numune etüvde 24 saat bekletilmiştir. 24 saat sonunda alınan ince agrega numuneleri tartılarak kuru ağırlıkları belirlenmiştir. İnce agregaların tane yapılarından dolayı hacimleri belirlenirken dereceli silindir kap kullanılmıştır. Hacimleri belirlenen numunelerin, kuru yüzey özgül ağırlıkları hesaplanmıştır. İnce agregadan çeyrekleme metoduyla bir miktar numune daha alınarak 24 saat suda bekletilmiştir. Sudan alınan ince agregaların, yüzeyleri kurutulduktan sonra hacmi belirlenerek doygun yüzey özgül ağırlığı hesaplanmıştır. Deney sonuçları Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

### **3.2.2. Geopolimer beton karışım oranlarının belirlenmesi**

Ağırlıkça %98 YFC ve %2 NS içeriği ile hazırlanan bağlayıcı kısım, dökümden 24 saat önce hazırlanan 12 M NaOH çözeltisi ile aktive edilmiştir. Çalışma boyunca bağlayıcı dozajı  $300 \text{ kg/m}^3$ ,  $400 \text{ kg/m}^3$  ve  $500 \text{ kg/m}^3$  olarak belirlenmiştir. Ayrıca iri agregalar (4-8 mm) hacimce %0, %5, %10 ve %15 oranlarında İLA ile değiştirilmiştir. Ç/B oranı da 0,45 olarak sabit tutulmuştur. İlk olarak katı partiküller NaOH çözeltisi ile karıştırılmadan önce GB'de



daha yüksek homojenlik elde etmek amacıyla 5 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra alkali çözelti ve bağlayıcı kısım 2 dakika karıştırılmıştır. Bu şekilde üretilen taze GB kalıplara dökülmüştür. 24 saat sonra yeterince sertleşen GB numuneleri kalıplardan çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılan GB numuneleri laboratuvar koşullarında 28 gün süresince küre bırakılmıştır. Üç farklı bağlayıcı dozajı ( $300 \text{ kg/m}^3$ ,  $400 \text{ kg/m}^3$  ve  $500 \text{ kg/m}^3$ ) ve dört farklı İLA içeriği (%0, %5, %10 ve %15) ile üretilen GB numuneleri ile toplam 12 farklı numune grubu oluşturulmuştur. Numune gruplarının kodları ve içeriği Çizelge 3.5'te GB karışımlarında kullanılan malzeme miktarları ise Çizelge 3.6'da detaylıca verilmiştir.

**Çizelge 3.5:** Üretilen geopolimer beton numune kodları.

Karışım Kodları	YFC	SD	İLA miktarı (%)
D300-R0	100	-	0
D300-R5	100	-	5
D300-R10	100	-	10
D300-R15	100	-	15
D400-R0	95	5	0
D400-R5	95	5	5
D400-R10	95	5	10
D400-R15	95	5	15
D500-R0	90	10	0
D500-R5	90	10	5
D500-R10	90	10	10
D500-R15	90	10	15

**Çizelge 3.6:** Geopolimer beton karışımlarında kullanılan malzeme miktarları.

Karışım Kodları	YFC, (kg/m <sup>3</sup> )	NS, (kg/m <sup>3</sup> )	NaOH, (kg/m <sup>3</sup> )	Agrega, (kg/m <sup>3</sup> )		
				Dere agregası		İLA
				0-4 mm	4-8 mm	
D300-R0	294	6	135	1269	704	-
D300-R5	294	6	135	1269	669	15
D300-R10	294	6	135	1269	634	29
D300-R15	294	6	135	1269	599	44
D400-R0	392	8	180	1135	630	-
D400-R5	392	8	180	1135	599	13
D400-R10	392	8	180	1135	567	26
D400-R15	392	8	180	1135	535	29
D500-R0	490	10	225	1001	556	-
D500-R5	490	10	225	1001	529	11
D500-R10	490	10	225	1001	500	23
D500-R15	490	10	225	1001	472	34

### 3.2.3. Geopolimer beton üretilmesi ve yerleştirilmesi

Çizelge 3.6'da verilen ağırlıklara uygun şekilde hassas terazide tartılan malzemeler, GB üretiminde kullanılmak üzere karışıma hazır hale getirilmiştir. Üretimden 24 saat önce NaOH çözeltisi hazırlanıp soğumaya bırakılmıştır. NaOH çözeltisinin, beklediği süreç içerisinde oluşabilecek çökmelerin önüne geçebilmek amacıyla çözelti tekrar karıştırılmıştır. Karışım hazırlanırken ilk olarak YFC ve NS 5 dakika karıştırılmıştır. Homojen bir bağlayıcı elde edildikten sonra karışıma NaOH çözeltisi eklenmiş ve bu şekilde elde edilen hamur 2 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından karışıma sırası ile iri agregası, İLA ve ince agregası katılarak karışım hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan GB farklı deneylerde kullanılmak üzere uygun kalıplara yerleştirilmiştir. GB'un kalıp içerisinde homojen bir şekilde yerleşmesini sağlamak amacıyla, şişleme çubuğu ile şişleme ve tokmakla kalıp kenarlarına vurma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kalıp içerisine yerleştirilen GB'un yüzeyleri mala yardımı ile pürüzsüz hale getirilmiştir. Belirtilen şekilde elde edilen GB numuneler, 24 saat süresince

kalıplarda priz almak üzere bekletilmiştir. 24 saat sonra sertleşen GB numuneleri kalıplardan çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılan GB numuneleri laboratuvar koşullarında 28 gün süresince kürlenmeye bırakılmıştır.

### **3.2.4. Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler**

Bu çalışma kapsamında üretilen GB numuneler, yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmadan önce;

- Basınç dayanımı
- Yarmada çekme dayanımı
- Eğilme dayanımı
- Geri tepme dayanımı (Ribaunt testi)
- Kılcal geçirimsizlik

Bu çalışma kapsamında üretilen GB numuneler, yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakıldıktan sonra;

- Basınç dayanımı
- Geri tepme dayanımı (Ribaunt testi)
- Ağırlık kaybı
- Kılcal geçirimsizlik, deneylerine tabi tutulmuştur.

#### **3.2.4.1. Basınç dayanımı**

Bu tez çalışması kapsamında üretilen GB numunelerin basınç dayanımları; TS EN 12390-3 (2019)'de belirtilen standartlara uygun olarak ölçülüp belirlenmiştir. Seçilen numuneler, pürüzsüz yüzey, yükleme yüzeyi olarak belirlendikten sonra düzeneğe yerleştirilmiştir. Basınç dayanımı deneyine tâbi tutulan numune boyutları olan, 50x50x50 mm ölçüleri cihazda seçilmiştir. Boyutu seçilen numune için yükleme hızı 1.40 kN/s olarak cihaz tarafından belirlenmiştir. Numunelerin basınç dayanım değerleri Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Basınç dayanım değerlerini elde edilirken aynı gruptan üçer adet numune deneylere tâbi tutulup üç sonucun aritmetik ortalaması alınarak elde edilen değer sonuç olarak kabul edilmiştir. Basınç dayanımı deney düzeneği Şekil 3.14'te gösterilmiştir.

$$F_c = \frac{P}{A_c} \quad (3.1)$$

$F_c$ : Basınç dayanımı, MPa

$P$ : Kırılma anındaki en büyük yük, N

$A_c$ : Numunenin, üzerine basınç yükünün uyguladığı en kesit alanı, mm<sup>2</sup>



**Şekil 3.14:** Basınç dayanımı deney düzeneği.

#### 3.2.4.2. Eğilme dayanımı

Bu tez çalışması kapsamında üretilen GB numunelerin eğilme dayanımları; SHIMADZU marka deney aleti yardımıyla TS EN 12390-5 (2019)' te belirtilen standartlara uygun olarak belirlenmiştir. 40x40x160 mm boyutlarında üretilen GB numuneleri, 28 günlük kür süresi dolduktan sonra yükleme tablasında yer alan mesnetlere dengeli şekilde oturtularak deneye tâbi tutulmuştur. Numunelerin eğilme dayanımları Denklem 3.2 kullanılarak elde edilmiştir. Eğilme dayanımı deney düzeneği ve deneye tabi tutulan numune örnekleri Şekil 3.15'de gösterilmiştir.

$$\sigma = \frac{3FL}{2BH^2} \quad (3.2)$$

F: Numunenin taşıyabildiği maksimum yük, (N)

L: Mesnetler arasındaki mesafe, (mm)

B: Numune kesitinin kuvvete dik doğrultudaki uzunluğu, (mm)

H: Numune kesitinin kuvvet doğrultusundaki uzunluğu, (mm)



Şekil 3.15: Eğilme dayanımı deney düzeneği.

### 3.2.4.3. Yarmada çekme dayanımı

Bu tez çalışması kapsamında üretilen GB numunelerin yarmada çekme dayanımları; TS EN 12390-6 (2010)'da belirtilen standartlara uygun olarak belirlenmiştir. Yarmada çekme dayanımı belirlemek amacıyla Ø100×200 mm boyutlarında üretilen GB silindir numuneler, 28 günlük kür süresini tamamladıktan sonra deneye tabi tutulmuştur. Numunelerin yarmada çekme dayanım değerleri Denklem 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır. Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği Şekil 3.16'da görülmektedir.

$$\sigma = \frac{2P}{\pi LD} \quad (3.3)$$

$\sigma$  : Yarmada çekme dayanımı, MPa

P: Silindir numuneye uygulanan basınç yükü, N

L: Silindir numunenin uzunluğu, mm

D: Silindir numunenin çapı, mm



Şekil 3.16: Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği.

#### 3.2.4.4. Kılcal geçirimsizlik deneyi

Bu tez çalışması kapsamında üretilen GB numunelerin kılcal geçirimsizlik değerleri; ASTM C1585'te belirtilen standartlara uygun olarak belirlenmiştir. Her gruptan seçilen üçer adet numune, tamamen kurumaları amacı ile 24 saat boyunca 105°C sıcaklıktaki etüvde bekletilmiştir. 105°C sıcaklığın GB numunelerin içinde bulunan İLA'lara olumsuz bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Etüvden çıkan numunelerin yan yüzeyleri, deneye tâbi tutulmadan önce su geçirmez bant ile kaplanmış bu şekilde numunelerin yan yüzeylerden su alması önlenmeye çalışılmıştır. Hazırlanan deney düzeneği içindeki suya 5 mm batırılacak şekilde yerleştirilen numunelerin alt yüzeylerinin su ile teması sağlanmıştır. Su ile temas eden numunelerin suda bekleme süreleri 5, 15, 30, 60 ve 1440 dakika olarak belirlenmiştir. Belirlenen sürelerden sonra su içerisinden çıkartılıp havlu yardımı ile kurutulan numunelerin ağırlıkları hassas terazide ölçülmüştür. GB numunelerin içerisine kapiler boşluklardan nüfuz eden su miktarından hareketle kılcal geçirimsizlik katsayısı Denklem 3.4 kullanılarak elde edilmiştir.

Kılcal geçirimsizlik katsayısı elde edilirken aynı gruptan üçer adet numunenin deney sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak elde edilen değer, sonuç olarak kabul edilmiştir. Kılcal geçirimsizlik deney düzeneği Şekil 3.17'de gösterilmiştir.

$$k = \frac{mt}{A \cdot d} \cdot \frac{1}{A \cdot \sqrt{t}} \quad (3.4)$$

k: Kılcal su emme katsayısı, (cm/dk<sup>0.5</sup>)

Q: Absorbe edilen su miktarı, (cm)

mt: Numunelerin t zamanına bağlı olarak ağırlık değişimi, (g)

A: Su ile temas eden yzzey alanı, (cm<sup>2</sup>)

t: Zaman, (dk)

d: Suyun yoğunluğu, (g/cm<sup>3</sup>)



şekil 3.17: Kılcal geçirimsizlik deney dzenegi.

#### 3.2.4.5. Ağırlık kaybı

Bu tez çalışması kapsamında üretilen GB numuneleri, yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra numunelerde oluşan deformasyonu inceleyebilmek amacıyla numunelerin ağırlık kaybı değerleri belirlenmiştir. GB numunelerin ağırlıkları, yüksek sıcaklığa tabi tutulmadan önce ve sonra hassas terazi yardımıyla ölçülmüştür. GB numunelerin ağırlık kaybı oranı Denklem 3.5 yardımıyla belirlenmiştir. Ağırlık kaybı oranı elde edilirken aynı gruptan üçer adet numunenin deney sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak elde edilen değer, sonuç olarak kabul edilmiştir.

$$\text{Ağırlık kaybı (\%)} = \frac{(W - W_0)}{W_0} \times 100 \quad (3.5)$$

W<sub>0</sub>: Numunenin başlangıçtaki ağırlığı, g

W: Numunenin yüksek sıcaklık sonrası ağırlığı, g

### 3.2.4.6. Geri tepme dayanımı (Ribaunt testi)

Bu tez çalışması kapsamında üretilen GB numunelerin geri tepme dayanımları; Abdelmonem vd. (2019), yaptıkları çalışmada kullandıkları düzenek ve yönteme göre belirlenmiştir. 100x100x100 mm boyutlarında üretilen GB küp numunenin üst yüzeyinin tam merkez noktasına çarpmak üzere, 1 m yükseklikten 0,5 kg ağırlığındaki bir adet çelik küre bilye serbest bırakılmıştır. Numune kırılana kadar bu işlem tekrarlanmıştır. Bu işlem yapılırken numuneden tepen çelik bilyenin tepme yüksekliğini tespit etmek amacı ile video kayıt cihazı kullanılmıştır. Serbest bırakılan çelik bilyenin ilk konumundaki yüksekliği (1 m) kullanılarak Denklem 3.6 yardımı ile çelik bilyenin ilk potansiyel enerjisi hesaplanmıştır. Serbest bırakılan çelik bilyenin tepme sonrası yüksekliği not edilerek Denklem 3.7 yardımı ile çelik bilyenin son potansiyel enerjisi hesaplanmıştır. Çelik bilyenin ilk ve son potansiyel enerjisi arasındaki fark Denklem 3.8 yardımı ile hesaplanarak, ribaunt testine tâbi tutulan numunenin enerji emme kapasitesi belirlenmiştir.

Enerji emme kapasitesi elde edilirken aynı gruptan üçer adet numunenin deney sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak elde edilen değer, sonuç olarak kabul edilmiştir. Geri tepme dayanımı deney düzeneği Şekil 3.18'de gösterilmiştir.

$$E_{P1} = m \times g \times h \quad (3.6)$$

$$E_{P2} = m \times g \times h_s \quad (3.7)$$

$$E_p = E_{P1} - E_{P2} \quad (3.8)$$

$E_{P1}$  = Çelik bilyenin ilk potansiyel enerjisi

$E_{P2}$  = Çelik bilyenin son potansiyel enerjisi

$m$  = Çelik bilyenin kütlesi (0,5 kg)

$g$  = Yer çekimi ivmesi (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$h$  = Çelik bilyenin serbest bırakıldığı yükseklik (1 m)

$h_s$  = Çelik bilyenin çarpışma sonrası ulaştığı yükseklik





**Şekil 3.18:** Geri tepme dayanımı deney düzeneği.

#### **3.2.4.7. Yüksek sıcaklık dayanımı**

Bu tez çalışması kapsamında üretilen GB numunelerin, yüksek sıcaklık dayanımlarının belirlenmesi amacı ile söz konusu numuneler 250°C, 500°C ve 750°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Numuneler yüksek sıcaklık fırınında, istenilen sıcaklık elde edildikten itibaren 1 saat bekletilmiştir. Yüksek sıcaklık fırınında 1 saat bekletildikten sonra numuneler fırından çıkarılarak havada soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan numunelere; basınç dayanımı, ağırlık kaybı, darbe dayanımı ve kılcal geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır. Aynı zamanda yüksek sıcaklık maruziyeti öncesi ve sonrası görsel incelemeler ve mikro yapı analizleri yapılmıştır. Yüksek sıcaklık dayanımı deneyi yapılırken aynı gruptan üçer adet numunenin deney sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak elde edilen değer, sonuç olarak kabul edilmiştir. Yüksek sıcaklık dayanımı deney düzeneği Şekil 3.19’da gösterilmiştir.



**Şekil 3.19:** Yüksek sıcaklık dayanımı deney düzeneği.

#### **3.2.4.8. SEM- EDX analizi**

Bu tez çalışması kapsamında üretilen GB numunelerinden alınan parçaların SEM –EDX analizleri yapılmadan önce sinyal oluşumunu kuvvetlendirmek ve numune üzerine düşen elektronların bir noktada birikmesini engellemek amacı ile numunelerin yüzeyi altın paladyum tozu ile kaplanmıştır. Kaplama işleminden sonra numuneler cihazın içerisine yerleştirilerek görüntü ve analizler elde edilmiştir. SEM-EDX analizleri İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Agregada Deneyleri İle İlgili Bulgular ve Tartışma

GB üretiminde kullanılan iri ve ince dere agregalarının, özgül ağırlıkları deneylerle belirlenmiştir. Agregaların kuru özgül ağırlık, doymun kuru yüzey özgül ağırlık, görünen özgül ağırlık ve su emme oranları hesaplanarak sonuçları Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.1:** Dere agregalarının özgül ağırlıkları ve su emme oranı.

Özellik	Agrega (mm)	
	0-4	4-8
Kuru özgül ağırlık, g/cm <sup>3</sup>	2.49	2.60
Doymun kuru özgül ağırlık, g/cm <sup>3</sup>	2.57	2.62
Görünen özgül ağırlık, g/cm <sup>3</sup>	2.62	2.69
Su emme oranı, (%)	2.00	1.50

### 4.2. Geopolimer Beton Kontrol Numunelerin Basınç Dayanımı

Çizelge 4.2’de, farklı İLA (%0, %5, %10, %15) oranları ve bağlayıcı dozajları (300 kg/m<sup>3</sup>, 400 kg/m<sup>3</sup>, 500 kg/m<sup>3</sup>) kullanılarak üretilen 12 grup GB numunelerin yüksek sıcaklık öncesi 28 günlük basınç dayanım değerleri verilmiştir.

**Çizelge 4.2:** Kontrol numuneleri basınç dayanımı.

Numune	Basınç Dayanımı (MPa)
D300-R0	19,54
D300-R5	18,02
D300-R10	16,79
D300-R15	14,72
D400-R0	36,33
D400-R5	34,53
D400-R10	33,59
D400-R15	33,06
D500-R0	39,70
D500-R5	37,80
D500-R10	34,47
D500-R15	33,78

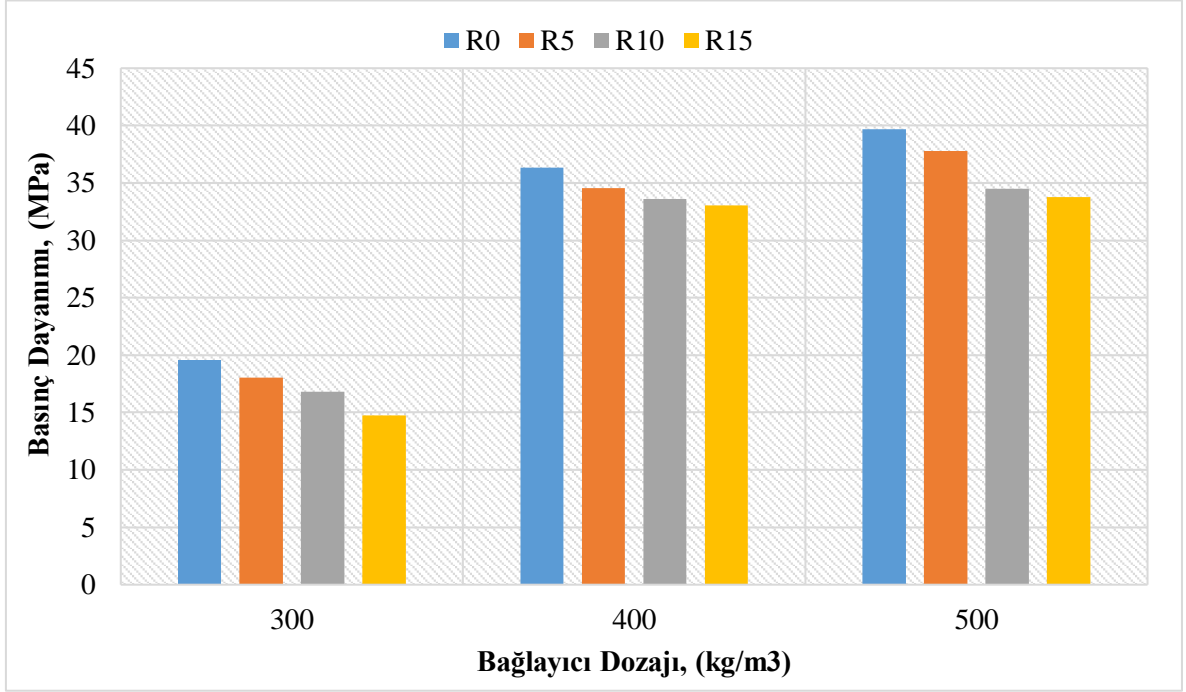
#### 4.2.1. Bağlayıcı dozajının GB kontrol numunelerinin basınç dayanımına etkisi

Şekil 4.1, farklı İLA (%0, %5, %10 ve %15) oranlarıyla üretilen GB numunelerinin 28 günlük basınç dayanım değerleri üzerinde farklı bağlayıcı dozajlarının ( $300 \text{ kg/m}^3$ ,  $400 \text{ kg/m}^3$  ve  $500 \text{ kg/m}^3$ ) etkisini göstermektedir. Şekil 4.1 ve Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi, tüm GB numunelerin basınç dayanımı değerleri, bağlayıcı dozajının artmasıyla birlikte artış göstermiştir. Örneğin, bağlayıcı dozajının,  $300 \text{ kg/m}^3$ ten  $500 \text{ kg/m}^3$ e artmasıyla referans numunelerin (R0) basınç dayanımı  $19,54 \text{ MPa}$ 'dan  $39,7 \text{ MPa}$ 'ya yaklaşık %103'lük bir artış ile yükselmiştir. Referans numunelerine benzer şekilde, bağlayıcı dozajının  $300 \text{ kg/m}^3$ ten  $500 \text{ kg/m}^3$ e yükseltilmesi, R5, R10 ve R15 numunelerinin basınç dayanımı değerlerinde sırasıyla %110, %105 ve %129 oranında artışa neden olmuştur. Ayrıca sonuçlar; bağlayıcı dozajını  $300 \text{ kg/m}^3$ ten  $400 \text{ kg/m}^3$ e yükselterek numunelerde gözlenen basınç dayanımı artışlarının, bağlayıcı dozajını  $400 \text{ kg/m}^3$ ten  $500 \text{ kg/m}^3$ e çıkararak meydana gelen artışlardan çok daha yüksek olduğunu göstermiştir. Örneğin, bağlayıcı dozajındaki  $300 \text{ kg/m}^3$  ila  $400 \text{ kg/m}^3$  arasındaki artış, R0, R5, R10 ve R15 numunelerinin basınç dayanımı değerlerinde sırasıyla %86, %92, %100 ve %125 oranında artışa neden olmaktadır. Bununla birlikte, dozajın  $400 \text{ kg/m}^3$ ten  $500 \text{ kg/m}^3$ e çıkarılmasından kaynaklanan basınç dayanımı değerlerindeki artışlar; R0, R5, R10 ve R15 numuneleri için sırasıyla %9,27, %9,47, %2,62 ve %2,18'dir. Bağlayıcı dozajındaki artışın GB numunelerinin basınç dayanımı değerlerini arttırdığı gerçeği, daha fazla bağlayıcı içerik kullanımı ile kompakt bir mikro yapının oluşumunu sağlayan, geopolimerizasyon reaksiyon ürünlerinin bol miktarda oluşması ile açıklanabilir. Bulgularımıza paralel olarak, mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin bağlayıcı dozajını artmasıyla arttığını gösteren benzer çalışmalar yapılmıştır.

Mallikarjuna ve Gunneswara, (2018) tarafından yapılan çalışmada UK ve YFC, alkali aktivatör solüsyonu olarak  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ve NaOH kullanılarak aktive edilmiştir.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  aktivatör oranı 2,5 olarak alınmış ve NaOH çözeltisinin konsantrasyonu 8 M'de tutulmuştur. Bu çalışmada ele alınan ana parametrelerden biri, çeşitli UK ve YFC kombinasyonları için bağlayıcı dozajı ( $360 \text{ kg/m}^3$ ,  $420 \text{ kg/m}^3$  ve  $450 \text{ kg/m}^3$ ) olmuştur. Sonuçlar, YFC içeriğinin GB'nin basınç dayanımı ve işlenebilirliği üzerinde en etkili parametre olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca Ç/B oranı 0,45 ve 0,50 olan karışımların tamamında bağlayıcı dozajı arttıkça basınç dayanımı artmıştır.

Mermerdaş vd., (2017) yaptıkları çalışmada geopolimer harç için öğütülmüş granül YFC ve UK kullanmışlardır. Geopolimer harcın ana bileşenleri hafif pomza agregası ve alkali aktif UK veya öğütülmüş granüle YFC bağlayıcıdır. Alkali aktivatör, 1/2.5 oranında  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ile

12 M NaOH çözeltisinin bir karışımıdır. Alkali çözeltinin bağlayıcıya oranı 0.50 olarak alınmıştır. 7 bağlayıcı içeriği  $650 \text{ kg/m}^3$  ile  $1250 \text{ kg/m}^3$  arasında  $100 \text{ kg/m}^3$  lük artışla alınmıştır. Test sonuçları, bağlayıcı içeriğindeki artışın geopolimer harcın basınç dayanımını arttırdığını göstermektedir. YFC içeriğinde bağlayıcı dozunun artmasıyla basınç dayanımı 27.7 MPa'dan 33.3 MPa'ya yaklaşık %20 artış göstermiştir.



**Şekil 4.1:** Bağlayıcı dozajının GB numunelerin 28 günlük basınç dayanımı üzerine etkisi.

#### 4.2.2. İLA oranının GB kontrol numunelerin basınç dayanımına etkisi

Şekil 4.2, farklı bağlayıcı dozajlarıyla ( $300 \text{ kg/m}^3$ ,  $400 \text{ kg/m}^3$  ve  $500 \text{ kg/m}^3$ ) üretilen GB numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı değerleri üzerindeki farklı İLA oranlarının (%0, %5, %10 ve %15) etkisini göstermektedir. Deneysel bulgular, İLA oranının artmasının GB numunelerinin basınç dayanımı değerlerinde önemli düşümlere neden olduğunu açıkça göstermektedir. Referans numuneler ile karşılaştırıldığında, Şekil 4.2'de görülebileceği gibi,  $300 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcı dozajlı GB numunelerinde %5, %10 ve %15 İLA kullanımı, basınç dayanım değerlerini sırasıyla %8, %14 ve %25 oranında azaltmış olup  $400 \text{ kg/m}^3$  ve  $500 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerinde de benzer düşüşler gözlenmiştir.

Bulgularımıza paralel olarak Eren vd., (2021) yaptıkları çalışmada bağlayıcı olarak  $500 \text{ kg/m}^3$  dozajlı öğütülmüş granüle YFC, alkali aktivatör olarak ise 12 M NaOH ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranı 2,5 olacak şekilde  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  kullanmışlardır. %1 çengel uçlu SF ve iki

tip lastik kauçuk kullanılarak toplamda 6 farklı karışım üretilmiştir. Kırıntı kauçuklar ve lastik kauçuk parçaları, %10 ve %15 oranlarında doğal agregalara ikame olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak %10 ve %15 kırıntı kauçuğu kullanımının basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı değerlerinde bir miktar azalmaya yol açtığı bildirilmiştir.

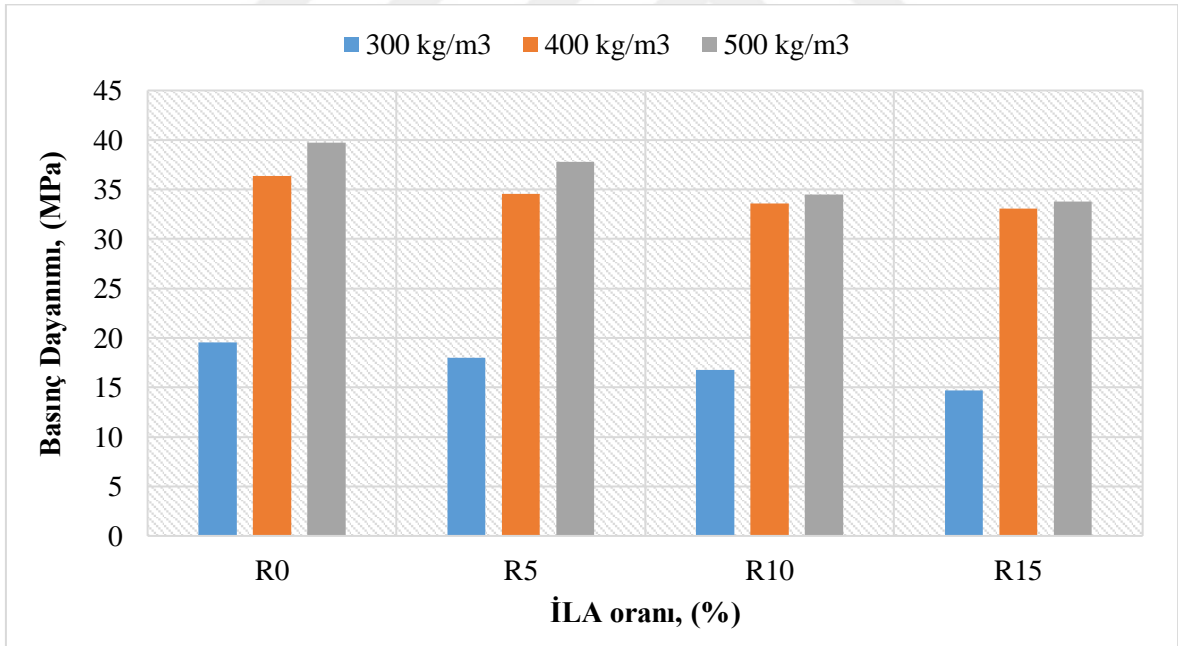
Wongsa vd., (2018) yaptıkları çalışmada, geri dönüştürülmüş lastiklerden ince agrega olarak %100 kırıntı kauçuk (0-4 mm) içeren hafif geopolimer harcın mekanik ve termal özelliklerini araştırmışlardır. Geopolimer bağlayıcı olarak NaOH (10, 15 ve 20 M) ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> çözeltileri ile aktive edilen yüksek kalsiyumlu UK kullanılmıştır. Sonuçlar, nehir kumunun kırıntı kauçuğu ile değiştirilmesinin geopolimer harcın basınç dayanımını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Kırıntı kauçuk geopolimer harcının 28 günlük basınç ve eğilme dayanımları, dere kumu içeren kontrol geopolimer harcıninkinden sırasıyla %93 ve %74 daha düşük olmuştur.

Benzer şekilde başka bir çalışmada, Afshinnia ve Poursaee, (2015) , yüksek oranda reaktif agrega ile hazırlanan harç numunelerinde Alkali-Silika Reaksiyonunun neden olduğu genleşmeyi azaltmak için kırıntı kauçuğun etkisini incelemişlerdir. Bu bağlamda, hızlandırılmış harç çubuğu testi için ince agrega ikamesi olarak hacimce %0, %16 ve %24 kırıntı kauçuk içeren harç çubukları hazırlanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, ince agrega ikamesi olarak %16 ve %24 ufalanmış kauçuğun kullanılmasının harç çubuklarındaki ASR genleşmesini sırasıyla %43 ve %39 oranında azalttığını göstermiştir. Ancak %16 ve %24 kırıntı kauçuk içeren harç küplerinin basınç dayanımı 28 günde sırasıyla %20 ve %47 oranında azalmıştır.

Kırıntı kauçuğu kullanımının GB numunelerin basınç dayanımına etkisinin incelendiği bir diğer çalışmada, Aly vd., (2019) bağlayıcı olarak granüle YFC aktivatör olarak ise NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılmışlardır. Agregada olarak ise iri ve ince doğal agregaların toplam hacminin %0, %10, %20 ve %30 oranlarına ikame olarak kırıntı kauçuk lastik (1-4 mm) atık kullanılmışlardır. %20 ve %30 lastik ilavesinin beklendiği gibi basınç dayanımını düşürdüğü belirtilmiştir. Basınç dayanımının belirli lastik ikamesiyle %10 artması NaOH'ın lastik atıklarla reaksiyona girmesi sonucunda lastik yüzeyinde aşınma oluşturmalarının aderansı olumlu etkilemesi olarak yorumlanmıştır.

Dong vd., (2021) yaptıkları çalışmada geri dönüştürülmüş parça kauçuk parçacıklarını (2-5 mm), esas olarak 4-7 mm boyutlarındaki iri agregaların yerini almak için kullanmışlardır. Karışımlardan birinde daha kalın kauçuk (5-7 mm) kullanılmıştır. Bu kauçuklar NaOH ile ön işleme tabi tutulmuştur. Karışımlarda F sınıfı UK ve granüle YFC geopolimer bağlayıcıları olarak kullanılmış ve bu karışımlardan birinde SD yer almıştır. S/B oranı 0,33 olan karışımlarda alkali aktivatör olarak 12 M NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> içeren bir hibrit aktivatör kullanılmıştır. Kauçuk içermeyen kontrol karışımı ile 56 günde 61.4 MPa'lık yüksek bir basınç mukavemeti elde edilirken, kauçuk içeriği arttıkça mukavemet azalmıştır.

Ayrıca İLA kullanımı ile basınç dayanımı değerlerindeki düşüşün olası nedenleri şu şekilde sıralanabilir; beton agregalarının ve kauçuk agregalarının elastisite modüllerindeki yüksek farklılıklar, kauçuk parçacıkları ile bağlayıcı arasında zayıf ara yüz geçiş bölgesinin (ITZ) varlığı, diğer beton bileşenlere kıyasla düşük özgül ağırlığı nedeniyle matris içindeki kauçuk parçacıklarının heterojen dağılımı ve kauçuk parçacıklarının bağlı hava boşluklarını hapseden yüzeylerine hidrofobik özelliği olarak sıralanabilir (Youssif ve Elgawady, 2012; Liv d., 2010; Ho vd., 2018; Siddique ve Naik, 2014).



Şekil 4.2: GB numunelerin 28 günlük basınç dayanımına İLA oranının etkisi.

#### 4.3. Geopolimer Beton Kontrol Numunelerin Eğilme Dayanımı

Çizelge 4.3'de, farklı İLA (%0, %5, %10, %15) oranları ve bağlayıcı dozajları (300 kg/m<sup>3</sup>, 400 kg/m<sup>3</sup>, 500 kg/m<sup>3</sup>) kullanılarak üretilen 12 grup GB numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımı değerleri verilmiştir.

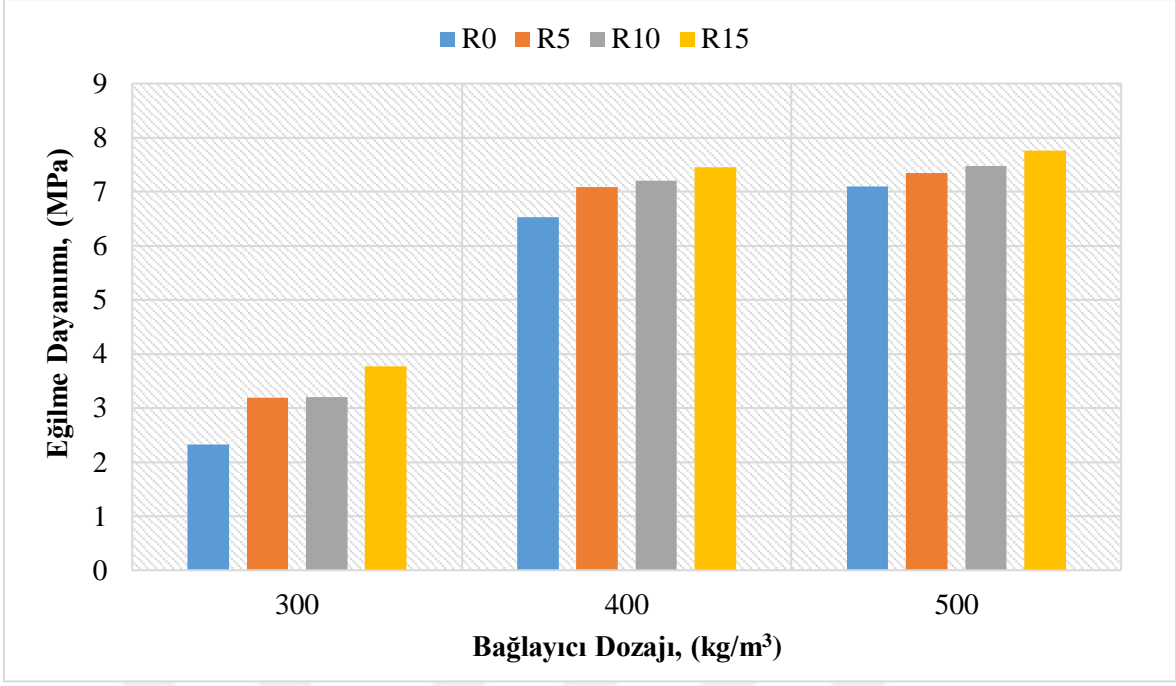
**Çizelge 4.3:** GB numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değerleri.

Numune	Eğilme Dayanımı (MPa)
D300-R0	2,33
D300-R5	3,19
D300-R10	3,20
D300-R15	3,77
D400-R0	6,53
D400-R5	7,08
D400-R10	7,21
D400-R15	7,45
D500-R0	7,09
D500-R5	7,35
D500-R10	7,48
D500-R15	7,77

#### 4.3.1. Bağlayıcı dozajının GB numunelerin eğilme dayanımına etkisi

Şekil 4.3, bağlayıcı dozajının farklı İLA kullanım oranları ile üretilen GB numunelerinin eğilme dayanımı değerleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Sonuçlar, GB numunelerinin eğilme dayanımının, bağlayıcı dozajının artmasıyla önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Referans numuneler için, bağlayıcı dozajının 300 kg/m<sup>3</sup>ten 500 kg/m<sup>3</sup>e yükselmesiyle GB numunelerinin eğilme dayanımı değerleri yaklaşık %204'lük bir artış göstermiştir. Ek olarak, bağlayıcı dozajının 300 kg/m<sup>3</sup>ten 500 kg/m<sup>3</sup>e çıkarılmasıyla, R5, R10 ve R15 numunelerinin eğilme dayanımı değerleri sırasıyla % 130, % 133 ve % 106 oranında artmıştır. Basınç dayanımı testine paralel olarak, bağlayıcı dozajının 300 kg/m<sup>3</sup>ten 400 kg/m<sup>3</sup>e yükselmesi sonucu eğilme dayanımlarındaki artışlar, dozajın 400 kg/m<sup>3</sup>ten 500 kg/m<sup>3</sup>e çıkarılmasından kaynaklanan eğilme dayanımı değerlerindeki artışlardan çok daha yüksektir. Sonuç olarak, basınç dayanımı testi sonuçları ile tutarlı olarak, bağlayıcı dozajındaki artışların mekanik özellikler üzerindeki olumlu etkisinin, eğilme dayanımı test sonuçlarında da kolayca gözlemlenebileceği belirtilebilir. Ek olarak, basınç dayanımı sonuçlarına benzer şekilde, bağlayıcı dozajındaki artışın (400 kg/m<sup>3</sup>ten 500 kg/m<sup>3</sup>e) eğilme dayanımı değerleri üzerindeki sınırlı pozitif etkisinin, kullanılan 0,45 sabit Ç/B oranından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. İşlenebilirlikteki azalmanın neden olduğu bazı çökme ve sıkışma problemlerinden, bağlayıcı dozajını artırırken sabit Ç/B oranının kullanılmasının sorumlu olabileceği öne sürülmüştür. Bu durumun, bağlayıcı dozajının artırılması sonucu oluşan daha kompakt bir mikro yapının mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde sınırlayıcı bir bileşen olabileceği düşünülmüştür.





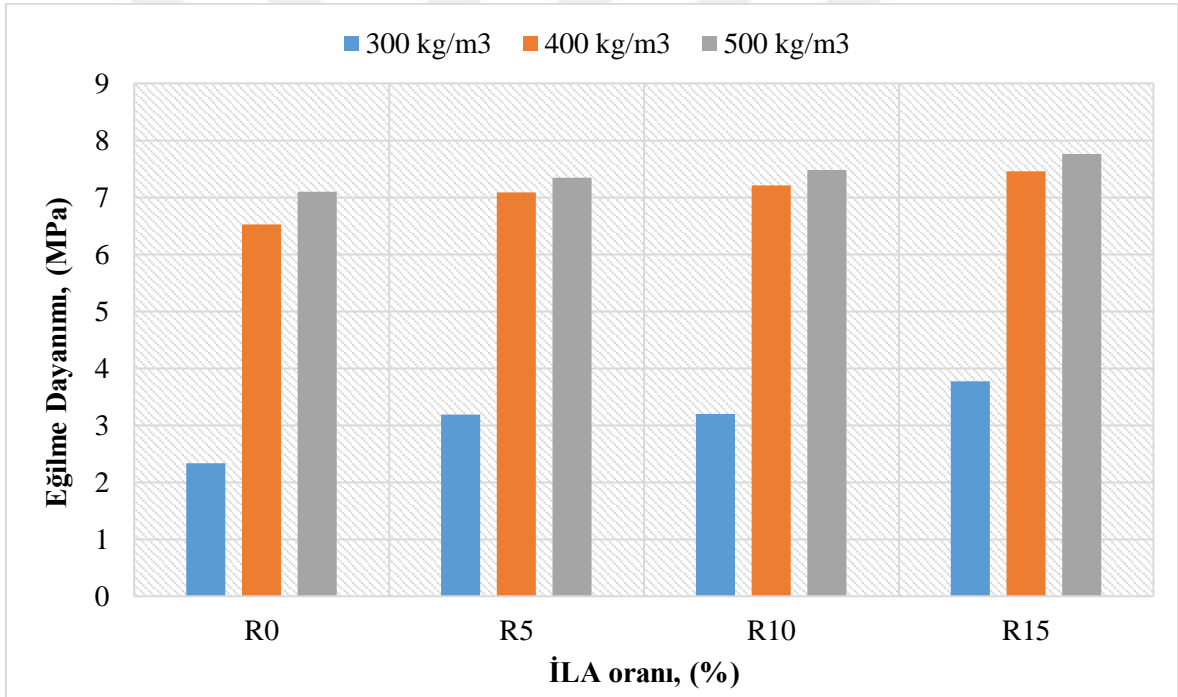
Şekil 4.3: Bağlayıcı dozajının GB numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı üzerine etkisi.

#### 4.3.2. İLA oranının GB numunelerin eğilme dayanımına etkisi

Şekil 4.4, farklı bağlayıcı dozajlarda ( $300 \text{ kg/m}^3$ ,  $400 \text{ kg/m}^3$  ve  $500 \text{ kg/m}^3$ ) üretilen GB numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımı değerleri üzerindeki İLA oranlarının (%0, %5, %10 ve %15) etkisini göstermektedir. Şekil 4.4 ve Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi İLA oranlarındaki artışların GB numunelerin eğilme dayanımı değerlerinde artışa neden olduğu gözlenmiştir. Maksimum eğilme dayanımı değerleri, bağlayıcı dozajından bağımsız olarak R15 numunelerinden elde edilirken, R0 numuneleri tüm bağlayıcı dozajları için minimum eğilme mukavemetine sahiptir. Basınç dayanımının sonuçlarının aksine İLA kullanımının eğilme dayanımı üzerindeki olumlu etkisi, iri agregalarla değiştirilen İLA'nın GB matrisinde lif görevi görmesi ile açıklanabilir.  $300 \text{ kg/m}^3$ lük bağlayıcı dozajla üretilen GB numuneleri için, İLA'nın iri agregaya ile değiştirilmesi, eğilme dayanımı değerlerini sırasıyla %37, %37 ve %62 oranında artırmıştır.  $400 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerinde ise iri agregaya ile %5, %10 ve %15 oranında yer değiştiren İLA kullanımıyla eğilme dayanımı değerleri sırasıyla %8, %10 ve %14 oranlarında artırmıştır. Son olarak,  $500 \text{ kg/m}^3$ lük bağlayıcı dozajla üretilen GB numuneleri için, İLA'nın iri agregaya ile değiştirilmesi, eğilme dayanımı değerlerini sırasıyla %4, %6 ve %10 oranında artırmıştır. Sonuçlarımızla tutarlı olarak, bazı araştırmalar, atık lastik kauçuğunun lif olarak kullanılmasıyla eğilme dayanımı değerlerinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir.

Al-Azzawi vd., (2018) tarafından yapılan araştırmada, hurdaya çıkarılan lastiklerden elde edilen kauçuk atıkları, %0,5 süper akışkanlaştırıcı içeren beton karışımına lif olarak eklenmiştir. Beton kirişlerin eğilme davranışı, betonun mekanik özellikleri ve beton karışımlarının işlenebilirliği incelenmiştir. 2-4 mm arasında değişen kauçuk lifler, imento ağırlığının %0,5'i ve %1'i oranında ilave edilmiştir. Sonuçlar, doğal agregalı betona lif olarak kauçuk malzemenin eklenmesinin, normal betona kıyasla sünekliği, basınc dayanamını ve eğilme dayanamını arttırdığını göstermiştir.

Bununla birlikte, daha küçük boyutlarda kullanılan atık lastik kauçuk parçacıklarının eğilme mukavemeti değerleri üzerinde benzer bir olumlu etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir (Pham vd., 2021). Bu gözlemler, İLA kullanımına bağlı eğilme mukavemeti artışlarının, bağ yapısından ziyade kullanılan kauçuğun geometrisinden kaynaklanan köprüleme etkisinden kaynaklandığı konusunda yorum yapmamızı mümkün kılmıştır.



şekil 4.4: İLA oranının GB numunelerin 28 günlük eğilme dayanamına etkisi.

#### 4.4. Geopolimer Beton Kontrol Numunelerin Yarmada ekme Dayanamı

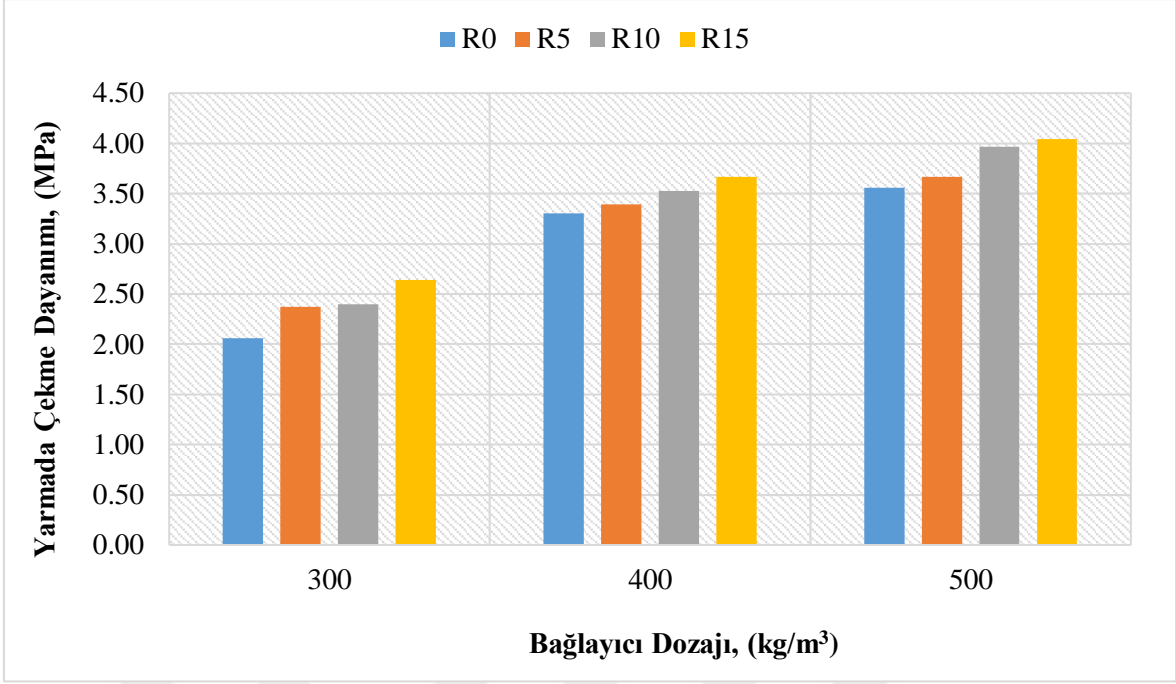
Çizelge 4.4'de, farklı İLA (%0, %5, %10, %15) oranları ve bağlayıcı dozajları (300 kg/m<sup>3</sup>, 400 kg/m<sup>3</sup>, 500 kg/m<sup>3</sup>) kullanılarak üretilen 12 grup GB numunelerin 28 günlük yarmada çekme dayanamı değerleri verilmiştir.

**Çizelge 4.4:** GB numunelerin yarmada çekme dayanımı değerleri.

Numune	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)
D300-R0	2,06
D300-R5	2,37
D300-R10	2,40
D300-R15	2,64
D400-R0	3,30
D400-R5	3,39
D400-R10	3,53
D400-R15	3,67
D500-R0	3,55
D500-R5	3,67
D500-R10	3,97
D500-R15	4,04

#### 4.4.1. Bağlayıcı dozajının GB numunelerin yarmada çekme dayanımına etkisi

Şekil 4.5, farklı bağlayıcı dozajlarının laboratuvar koşullarında kürlenmiş GB numunelerin yarmada çekme dayanımı değerleri üzerindeki etkilerini göstermektedir. Sonuçlar, GB numunelerinin yarmada çekme dayanımı değerlerinin, bağlayıcı dozajının artmasıyla önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Maksimum yarmada çekme dayanımı değerleri, D500-R15 numunelerinden elde edilmiştir. Öte yandan, minimum yarmada çekme dayanımı değerleri, 300 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB örneklerinde gözlenmiştir. Ayrıca deneysel bulgular, bağlayıcı dozajının 300 kg/m<sup>3</sup>ten 500 kg/m<sup>3</sup>e yükselmesiyle R0, R5, R10 ve R15'in yarmada çekme dayanımı değerlerinin sırasıyla %72, %55, %65 ve %53 oranında arttığını göstermiştir. Ek olarak, bağlayıcı dozajının 400 kg/m<sup>3</sup>ten 500 kg/m<sup>3</sup>e çıkarılmasının bir sonucu olarak meydana gelen artışlar, bağlayıcı dozajının 300 kg/m<sup>3</sup>ten 400 kg/m<sup>3</sup> e arttırılmasına kıyasla daha düşüktür.



Şekil 4.5: Bağlayıcı dozajının GB numunelerin yarmada çekme dayanımı üzerine etkisi.

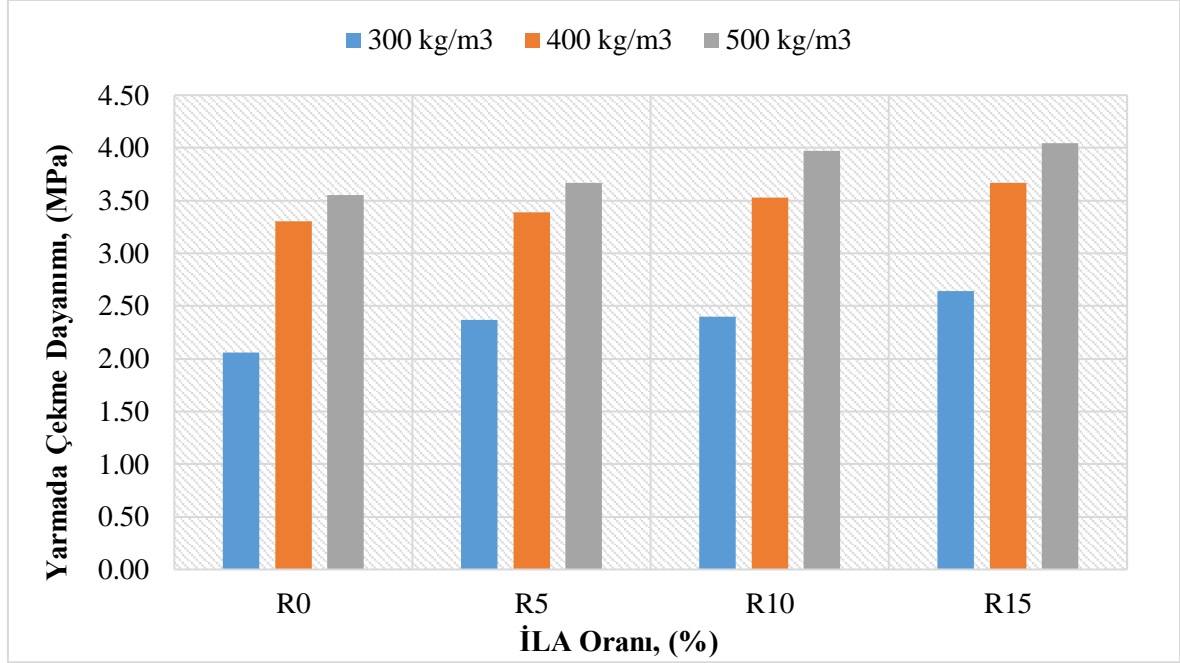
#### 4.4.2. İLA oranının GB numunelerin yarmada çekme dayanımına etkisi

Şekil 4.6, farklı İLA oranlarının laboratuvar koşullarında kürlenmiş GB numunelerin yarmada çekme dayanımı değerleri üzerindeki etkilerini göstermektedir. Çizelge 4.4 ve Şekil 4.6'dan gözlemlenen deneysel bulgular, İLA oranındaki artışların GB numunelerin yarmada çekme dayanımı değerlerini arttırdığını göstermiştir. 300 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numuneleri için İLA oranının %0'dan %5, %10 ve %15'e yükselmesi, GB numunelerinin yarmada çekme dayanımı değerlerinde sırasıyla %15, %16, %28 oranında artışa neden olmuştur. 400 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajla üretilen GB numunelerinde, %5, %10 ve %15 oranlarında İLA kullanımı için gözlenen artışlar sırasıyla %3, %7 ve %11 olmuştur. Son olarak, 500 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numuneleri için İLA oranının %0'dan %5, %10 ve %15'e yükselmesi, GB numunelerinin yarmada çekme dayanımı değerlerinde sırasıyla %3, %12 ve %14 oranında artışa neden olmuştur.

Bulgularımıza benzer şekilde, Luhar vd., (2019) çalışmalarında, kauçuklaştırılmış GB'yi ve normal PÇ'li betonu; basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü gibi bir takım deneyler üzerinden karşılaştırmışlardır. GB, F sınıfı UK'nin 14 M NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ile aktive edilmesiyle elde edilmiştir. Her iki betonda kullanılan kauçuklar hacimce %10, %20, %30 olarak ince agrega ile ikame edilmiştir. Atık kauçuk yüzdesi arttıkça, basınç dayanımı her yaşta azalmıştır. Normal PÇ'li betonun basınç

dayanımının GB'ninkinden daha az olduğu belirlenmiştir. Kauçuklaştırılmış GB'nin eğilme ve çekme dayanımı gibi gerilme özellikleri, kauçuk lif yüzdesi arttıkça artmıştır.

Bu sonuçların kauçuk liflerin Şekil 4.7'de gösterilen köprüleme etkisinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir.



Şekil 4.6: İLA oranının GB numunelerin 28 günlük yarmada çekme dayanımına etkisi.

Basınç dayanımı ve çekme dayanımı oranı olan kırılgenlik indeksinin, beton numunelerinin çatlama dayanımını değerlendirmek için kullanılan önemli bir parametre olduğu belirtilmiştir (Feng vd., 2018). GB örneklerinin kırılgenlik indeks değerleri Çizelge 4.5'te verilmiştir. Çizelge 4.5'te gözlemlenen deneysel bulgular, kullanılan bağlayıcı dozajından bağımsız olarak, İLA kullanım oranındaki artışın GB numunelerinin kırılgenlik indeksini azalttığını göstermiştir. Sonuçlar ayrıca kırılgenlik açısından optimal değerlerin %15 İLA kullanımından elde edildiğini ortaya koymuştur. Öte yandan, bağlayıcı dozajının artması, tüm numune gruplarında kırılgenlik indeksinde önemli artışlara neden olmuştur. Bağlayıcı dozajının artmasıyla ortaya çıkan daha yoğun bir jel oluşumunun kırılgenlik özelliğini arttırdığı öne sürülmüştür.



**Şekil 4.7:** Köprüleme etkisi.

**Çizelge 4.5:** GB numunelerin kırılma indeks değerleri.

<b>Karışım</b>	<b>Basınç Dayanımı, (MPa)</b>	<b>Yarmada Çekme Dayanımı, (MPa)</b>	<b>Kırılma İndeksi</b>
D300-R0	19,54	2,06	9,49
D300-R5	18,02	2,37	7,60
D300-R10	16,79	2,40	7,00
D300-R15	14,72	2,64	5,58
D400-R0	36,33	3,30	11,01
D400-R5	34,53	3,39	10,19
D400-R10	33,59	3,53	9,52
D400-R15	33,06	3,67	9,01
D500-R0	39,70	3,55	11,18
D500-R5	37,80	3,67	10,30
D500-R10	34,47	3,97	8,68
D500-R15	33,78	4,04	8,36

#### **4.5. Geopolimer Beton Kontrol Numunelerin Darbe Dayanımı**

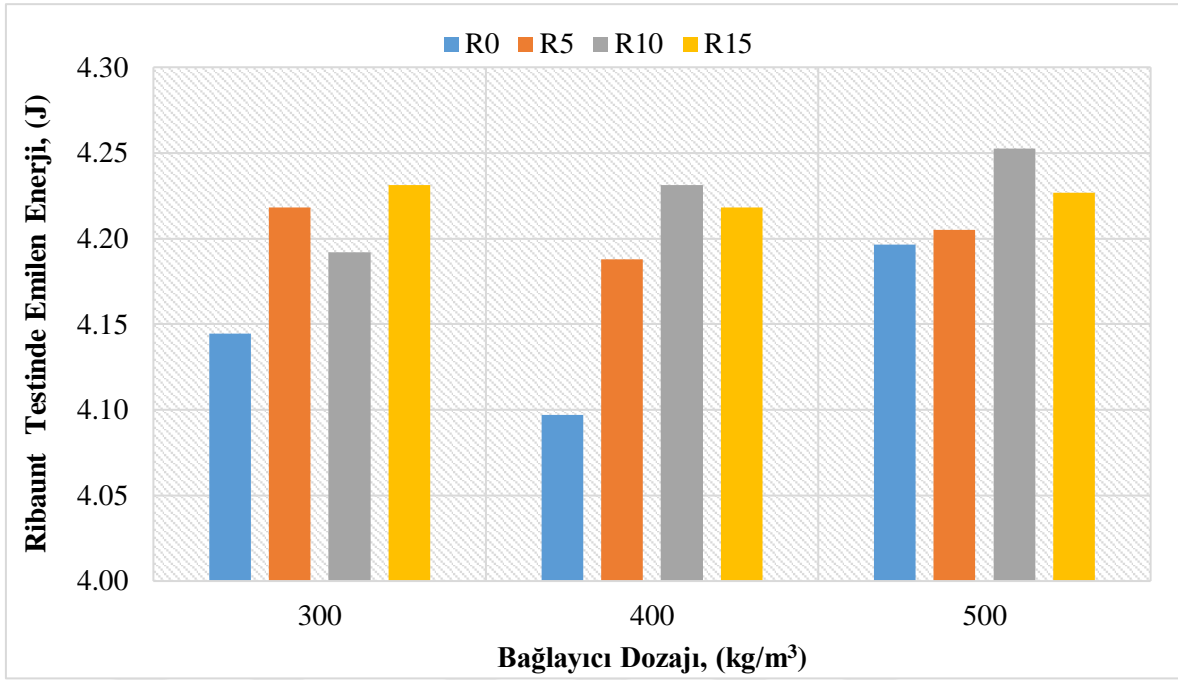
Çizelge 4.6'da, farklı İLA (%0, %5, %10, %15) oranları ve bağlayıcı dozajları (300 kg/m<sup>3</sup>, 400 kg/m<sup>3</sup>, 500 kg/m<sup>3</sup>) kullanılarak üretilen 12 grup GB numunelerinin 28 günlük darbe dayanımı testi değerleri verilmiştir.

**Çizelge 4.6:** GB numunelerin darbe dayanımı testi değerleri, (J)

Numune	Emilen Enerji
D300-R0	4,145
D300-R5	4,218
D300-R10	4,192
D300-R15	4,231
D400-R0	4,097
D400-R5	4,188
D400-R10	4,231
D400-R15	4,218
D500-R0	4,196
D500-R5	4,205
D500-R10	4,253
D500-R15	4,227

#### 4.5.1. Bağlayıcı dozajının GB numunelerin darbe dayanımı üzerindeki etkisi

Şekil 4.8, farklı bağlayıcı dozajlarının; laboratuvar koşullarında kürlenmiş GB numunelerin, ribaunt testi kullanılarak belirlenen darbe dayanımı değerleri üzerindeki etkilerini göstermektedir. Deneysel bulgular sonucunda, bağlayıcı dozaj miktarı ile darbe direnci arasında doğrusal bir ilişki kurulamamış olsa da genel olarak 500 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen numunelerde en yüksek darbe direnci değerlerinin gözlemlendiğini ortaya koymuştur. R10 numuneleri için, bağlayıcı dozajındaki 300 kg/m<sup>3</sup>ten 500 kg/m<sup>3</sup>e artış, darbe direncinin %1,38 oranında artmasına neden olmuştur. Ek olarak, en düşük darbe dayanımı değerleri, 400 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozaj kullanılarak üretilen GB numunelerinden elde edilmiştir. Ayrıca, bağlayıcı dozajının 300 kg/m<sup>3</sup>ten 500 kg/m<sup>3</sup>e çıkarılması, R0 numunelerinin darbe direnci değerlerinde sadece %1,23'lük bir artışa neden olmuştur. R5 numuneleri için, bağlayıcı dozajındaki artış, darbe direnci değerlerini yaklaşık %0.3 oranında azaltmıştır. Sonuç olarak, bağlayıcı dozajındaki artışın darbe dayanımı üzerindeki olumlu etkisi, nispeten daha yüksek bağlayıcı kullanımının, yoğun ve boşluksuz bir mikro yapı oluşturarak daha yüksek oranda alüminosilikat jel oluşumuna izin vermesi olarak açıklanabilir.



Şekil 4.8: Bağlayıcı dozajının GB numunelerin darbe dayanımı üzerindeki etkisi.

#### 4.5.2. İLA oranının GB numunelerin darbe dayanımına etkisi

Şekil 4.8 ve Çizelge 4.6, farklı İLA oranlarının, laboratuvar koşullarında kürlenmiş GB numunelerin ribaunt testi kullanılarak belirlenen darbe dayanımı değerleri üzerindeki etkilerini de göstermektedir. GB numunelerinin enerji emme kapasitesi, İLA kullanım oranındaki artışla önemli ölçüde iyileştirilmiştir. 400 kg/m<sup>3</sup> ve 500 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen numunelerde, %10 İLA kullanılarak üretilen numunelerden maksimum darbe dayanım değerleri elde edilmiştir. Ancak 300 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen numunelerde maksimum darbe dayanım değerleri R15 numunelerinden elde edilmiştir. 300 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerinde İLA kullanımının %0'dan %5, %10 ve %15'e yükselmesi, darbe enerjilerinde sırasıyla yaklaşık %1,76, %1,14 ve %2,07'lik bir artışa neden olmuştur. Benzer şekilde, 400 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen numunelerde, bu artış oranları sırasıyla %5, %10 ve %15 İLA kullanımı için yaklaşık %2,22, %3,27 ve %2,97 olarak gerçekleşmiştir. Son olarak, 500 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajlı GB numuneleri için %5, %10 ve %15 İLA kullanımının darbe enerjilerini sırasıyla %0,21, %1,36 ve %0,74 oranında arttırdığı belirlenmiştir.

Gupta vd., (2015) yaptıkları çalışmada, ince agregaların atık kauçuklarla değiştirilmesinin betonun darbe dayanımına etkisi değerlendirmişlerdir. Üç farklı S/B (0.35, 0.45, 0.55) oranlı beton için altı kauçuk değiştirme seviyesi (%0, %5, %10, %15, %20 ve %25) ve üç SD değiştirme seviyesi (%0, %5 ve %10) dikkate alınmıştır. Beton üzerindeki etki testleri



üç farklı teknikle yapılmıştır; düşme ağırlığı testi, eğilme yükleme testi ve geri tepme testi(ribaunt). İlk çatlağa ve nihai arızaya neden olmak için gereken darbe sayısının, her üç S/B oranı için kauçuk içeriğinin ikame seviyesinin artmasıyla önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Kauçuk liflerin ikame seviyesindeki artışın, üç S/B oranının tümü için emilen darbe enerjisini önemli ölçüde iyileştirdiği görülebilir. İLA'nın kullanılması ile görülen darbe dayanımındaki artış, kauçuk parçacıklarının düşük sertliği ve enerjinin çoğunun kauçuk lifler tarafından emilmesi nedeniyle matrisin esnekliği ile açıklanabilir.

Gerges vd. (2018) yaptıkları çalışmalarında, beton karışımlarında alternatif bir ince agrega olarak geri dönüştürülmüş kauçuk tozu kullanmanın etkisini araştırmışlardır. Beton karışımlarındaki doğal kum kısmen %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kauçuk tozu ile değiştirilmiştir. Kauçuk oranı arttıkça enerji emilimi artmıştır. Kauçuklaştırılmış beton, tipik bir kırılma kırılmaya uğramadığından gelişmiş bir enerji emilimi sergilemiştir. Kauçuk tozlarının betonu daha sünek hale getirdiği ve daha yüksek enerji emilimi sergilediği belirtilmiştir.

Liu vd., (2012) 0,178 mm, 1,11 mm ve 2 mm'lik seçilmiş kauçuk parçacıklarının ve 30 mm uzunluğunda %0,5'lik hacim fraksiyonunda çelik elyafın kullanımını içeren kauçuk takviyeli ve kauçuk/çelik lif takviyeli betonun darbeye dayanıklılık performansı üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ağırlıkça fraksiyonu %5, %10, %15 ve %20 olan kauçuk partiküllerini içeren betonun dinamik performansı sırasıyla 0,2 MPa, 0,3 MPa, 0,4 MPa ve 0,5 MPa darbe yükleri altında incelenmiştir. Kauçuk katkılı betonun enerji emme kapasitesi, kauçuk içeriği %10'un altında olduğunda kauçuk içeriğinin artmasıyla artmıştır. Bununla birlikte, kauçuk içeriği %10'un üzerinde olduğunda kauçuk katkılı betonun enerji emme kapasitesi azalmıştır. Genel olarak, kauçuklu betonun enerji emme kapasitesi normal betonunkinden daha yüksektir. Deformasyon ve enerji emme kapasitesi, kauçuk içeriği sabit kaldığında kauçuk boyutlarının artmasıyla artmıştır.

#### **4.6. Geopolimer Beton Kontrol Numunelerin Kılcal Geçirimsizlik Katsayısı**

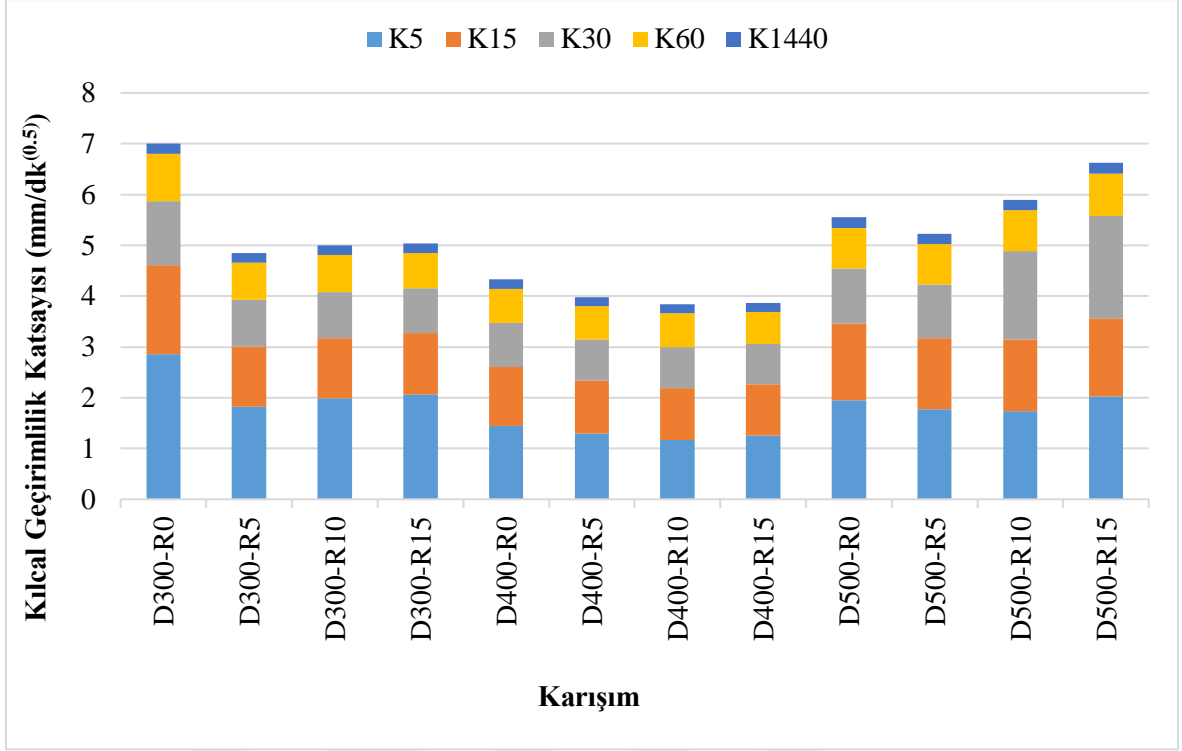
Şekil 4.9 ve Çizelge 4.7, GB numunelerinin 5 farklı zaman aralıklarında (0-5, 5-15, 15-30, 30-60, 60-1440 dakika), 28 günlük kılcal geçirimsizlik katsayı değerlerini göstermektedir. 28 günlük numunelerde 5 farklı zaman aralığında ölçülen kılcal su geçirimsizliği katsayısı değerlerinin numune içeriklerindeki değişikliklere bağlı olarak büyük farklılıklar gösterdiği ortaya çıkmıştır. Şekil 4.9 'da görüleceği üzere en düşük kılcal geçirimsizlik katsayısı değeri D400-R15 numunesinden elde edilirken, en yüksek kılcal geçirimsizlik katsayısı D300-R0

örneğinde gözlenmiştir. En düşük kılcal geçirimsizlik katsayısı değeri %15 İLA ikamesi ile elde edilmesine rağmen, İLA oranı ile kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri arasında uygun bir ilişki kurulamamıştır. Bağlayıcı dozajının kılcal geçirimsizlik katsayısı üzerindeki etkisine gelince, kullanılan İLA oranlarına bakılmaksızın, 400 kg/m<sup>3</sup>lük bağlayıcı dozajı ile üretilen numunelerden en düşük kılcal geçirimsizlik katsayısı elde edilmiştir.

Gupta vd., (2014) yaptıkları çalışmada, ince agreganın yerine hacimce %0, %5, %10, %15 ve %20 oranında kauçuk külü ikame edilerek üç farklı S/B ( 0.35, 0.45, 0.55) oranında toplam 15 farklı kauçuk külü beton karışımı ve %10 kauçuk külü sabit tutularak ince agreganın yerine hacimce %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranında kauçuk lif ikame edilerek üç farklı S/B oranında toplam 18 farklı modifiye beton karışımı elde edilmiştir. Kauçuk kül oranının su emme değerleri üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğunu ayrıca kauçuk lif ilavesinin su emme değerlerini azalttığını belirtmişlerdir.

**Çizelge 4.7:** GB numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri.

Karışım Adı	Kılcal Geçirimsizlik Katsayısı (mm/dk <sup>(0.5)</sup> )				
	k <sub>5</sub>	k <sub>15</sub>	k <sub>30</sub>	k <sub>60</sub>	k <sub>1440</sub>
D300-R0	2,8621	1,7454	1,2561	0,9346	0,2044
D300-R5	1,8246	1,1877	0,9128	0,7384	0,1834
D300-R10	1,9856	1,1877	0,9055	0,7281	0,1876
D300-R15	2,0571	1,2083	0,8836	0,7023	0,1865
D400-R0	1,4489	1,1567	0,8690	0,6713	0,1813
D400-R5	1,2879	1,053	0,8106	0,6454	0,1802
D400-R10	1,1627	1,0224	0,8106	0,6609	0,1802
D400-R15	1,2521	1,0121	0,7960	0,6300	0,1739
D500-R0	1,9498	1,5078	1,0808	0,8004	0,2087
D500-R5	1,7709	1,3942	1,0589	0,7952	0,2097
D500-R10	1,7351	1,4149	1,7351	0,8004	0,2044
D500-R15	2,0214	1,5388	2,0214	0,8262	0,2118



Şekil 4.9: GB numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri.

#### 4.7. Yüksek sıcaklık Sonrası GB Numunelerinin Özellikleri

##### 4.7.1. Basınç dayanımı

Farklı bağlayıcı dozajına ve İLA içeriğine sahip GB numunelerinin üç farklı yüksek sıcaklık performansı araştırılmıştır. Çizelge 4.8 ve Şekil 4.10'da, üretilen GB numunelerinin yüksek sıcaklıklar (250°C, 500°C ve 750°C) sonrası basınç dayanım değerleri verilmiştir. Şekil 4.11 ise farklı bağlayıcı dozajı ve İLA değişkenlerinin, yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerde basınç dayanımındaki etkisini oransal olarak göstermektedir. Beklendiği gibi, deneysel sonuçlar, tüm GB numunelerinin basınç dayanımı değerlerinin, özellikle çok yüksek sıcaklıklarda (500°C ve 750°C) önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Bu durumun iki olası nedeninden bahsedilebilir. Bunlardan ilki, beton karışımı içinde serbest veya kimyasal olarak bağlanmış suyun buharlaşmasından kaynaklanan ve yüksek sıcaklığın etkisi altında parçalanmaya neden olan yüksek iç basınç olarak ifade edilebilir. İkinci sebep, kauçuk parçacıkları ile bağlayıcı kısım arasındaki ITZ'nin, belirli bir sıcaklık değerinden sonra İLA'nın bozunma işlemi nedeniyle daha sorunlu hale gelmesidir (Aslani ve Kelin, 2018). Bulgular, atık lastiklerin bozulması için kritik sıcaklık değerinin 250°C'nin üzerinde olduğu sonucuna vardığımızı doğrulamıştır. Öte yandan, incelenen üç yüksek sıcaklık değeri arasında, basınç dayanımı değerlerindeki en yüksek düşüşler, %15 İLA içeriğine sahip R15

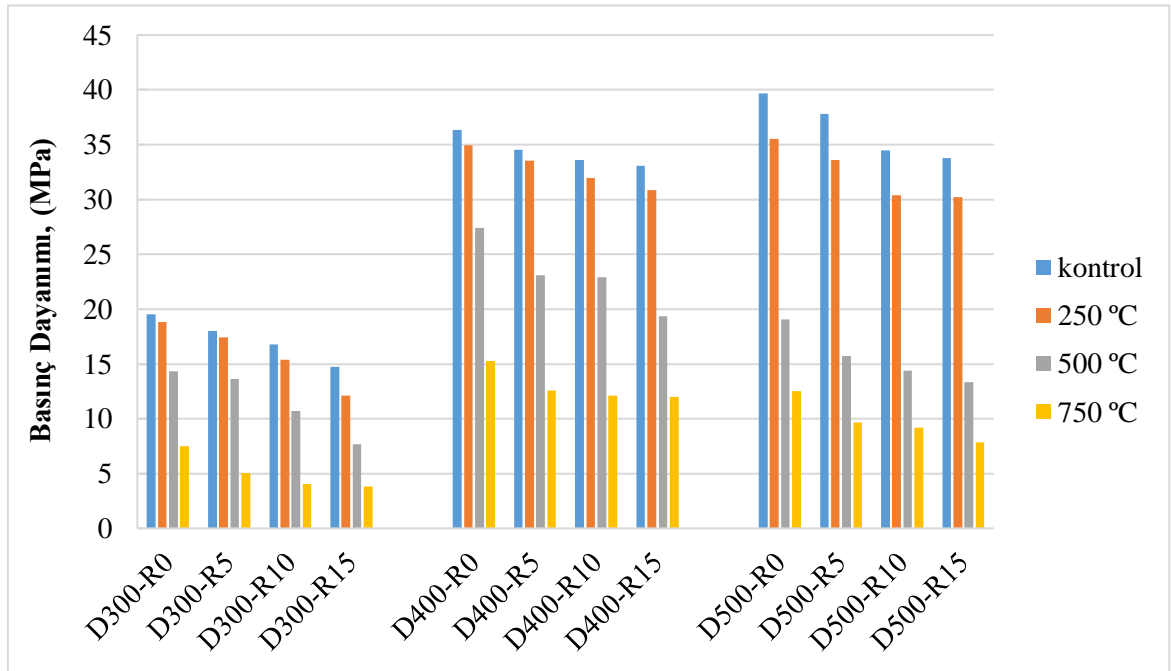
numunelerinden elde edilmiştir. 250°C'de basınç dayanımında en yüksek düşüş D300-R15 numunesinde gözlenirken (%18 azalma), 500°C ve 750°C'de tutulan numunelerde basınç dayanımı değerlerinde maksimum azalma D500-R15 numunelerinden elde edilmiştir (sırasıyla %61 ve %77 azalma). Ek olarak, Şekil 4.11'de gösterildiği gibi, İLA içeriğindeki artışın, bağlayıcı dozajları ve sıcaklık değerlerinden bağımsız olarak yüksek sıcaklığın etkisiyle basınç dayanımı değerlerinde daha fazla azalmaya yol açtığı belirlenmiştir.

Bu bulgulara paralel olarak Mousa, (2017) tarafından yapılan bir çalışmada basınç dayanımı değerlerinde en yüksek kayıpların kauçuk agrega içeren örneklerde gözlemlendiği belirtilmiştir. Benzer şekilde, Marques vd., (2013) çalışmalarında, yüksek sıcaklıkların geri dönüştürülmüş kauçuk agrega ile üretilen betonun artık mekanik performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Doğal kaba agrega ile yapılmış bir referans beton ve kullanılmış lastiklerden %5, %10 ve %15 doğal ince ve kaba agrega ikame oranlarına sahip dört farklı beton bileşimi hazırlanmıştır. Numuneler 1 saat süre ile 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Artan sıcaklıkla hem kaçuk lastikli beton hemde kauçuk lastik içermeyen betonda dayanım düşüklüğü yüksek oranlarda gerçekleşmiş ayrıca artan lastik oranıyla bu düşüş daha yüksek oranda gerçekleşmiştir. Ayrıca yapılan bir çalışmada %10'dan fazla kauçuk lastik kullanılarak üretilen numunenin yapısındaki çok ciddi bozulmalar nedeniyle basınç dayanımı testinin yapılamadığı belirtilmiştir (Gupta vd.,2017).

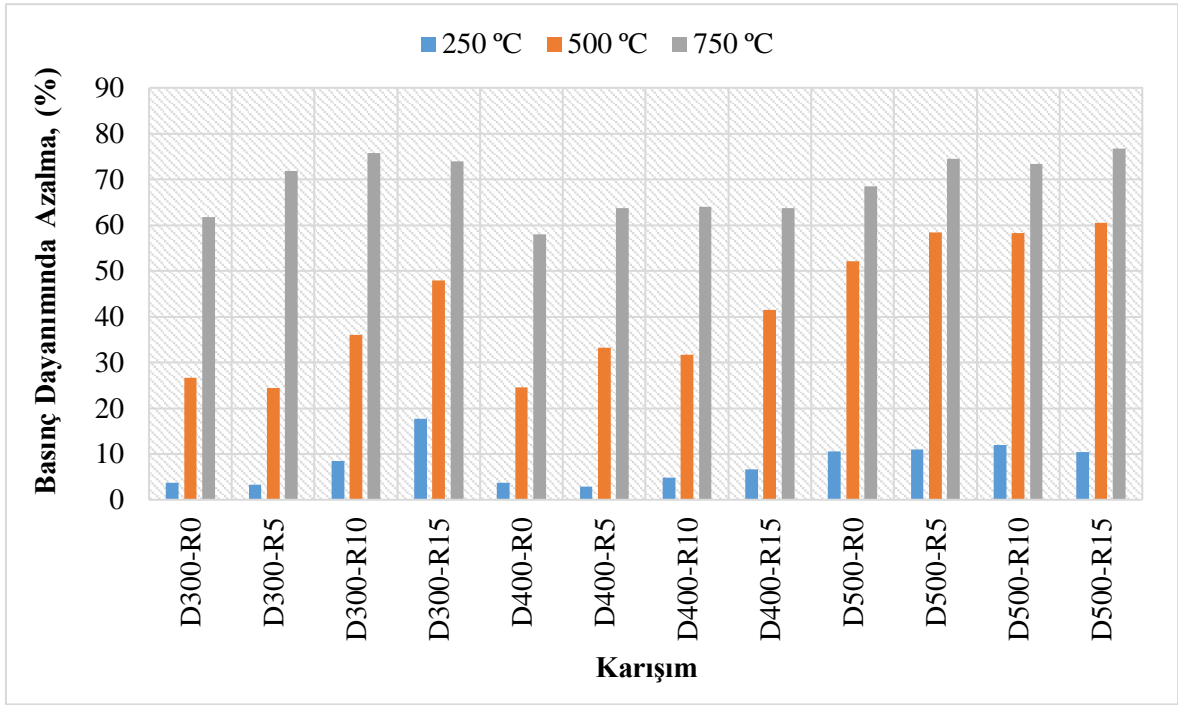
İLA oranındaki değişikliklerin basınç dayanımı değerleri üzerindeki etkilerinin incelenmesini takiben, bağlayıcı dozajının yüksek sıcaklık performansı üzerindeki etkisine ilişkin bazı bulgulara bakıldığında bağlayıcı dozajı ile yüksek sıcaklık dayanımı arasında uygun bir ilişki kurulamamış olsa da 400 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen numunelerden basınç dayanımı kayıpları açısından en iyi performansın elde edildiği söylenebilir. 500°C'ye maruz kalan numune hariç, en düşük basınç dayanımı kayıpları 400 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerinde gözlenmiştir.

**Çizelge 4.8:** GB numunelerin yüksek sıcaklık etkisi sonrasında basınç dayanım değerleri.

Karışım Adı	Kontrol	250 °C	500 °C	750 °C
D300-R0	19,54	18,81	14,32	7,48
D300-R5	18,02	17,43	13,61	5,07
D300-R10	16,79	15,36	10,73	4,07
D300-R15	14,72	12,11	7,67	3,83
D400-R0	36,33	34,97	27,40	15,27
D400-R5	34,53	33,52	23,07	12,55
D400-R10	33,59	31,95	22,93	12,09
D400-R15	33,06	30,84	19,37	11,97
D500-R0	39,70	35,50	19,03	12,53
D500-R5	37,80	33,63	15,74	9,64
D500-R10	34,47	30,37	14,38	9,17
D500-R15	33,78	30,24	13,33	7,87



**Şekil 4.10:** GB numunelerin yüksek sıcaklık etkisi sonrasında basınç dayanım değerleri.



Şekil 4.11: Yüksek sıcaklıkların etkisiyle basınç dayanımındaki oransal değişiklikler.

#### 4.7.2. Ağırlık kaybı

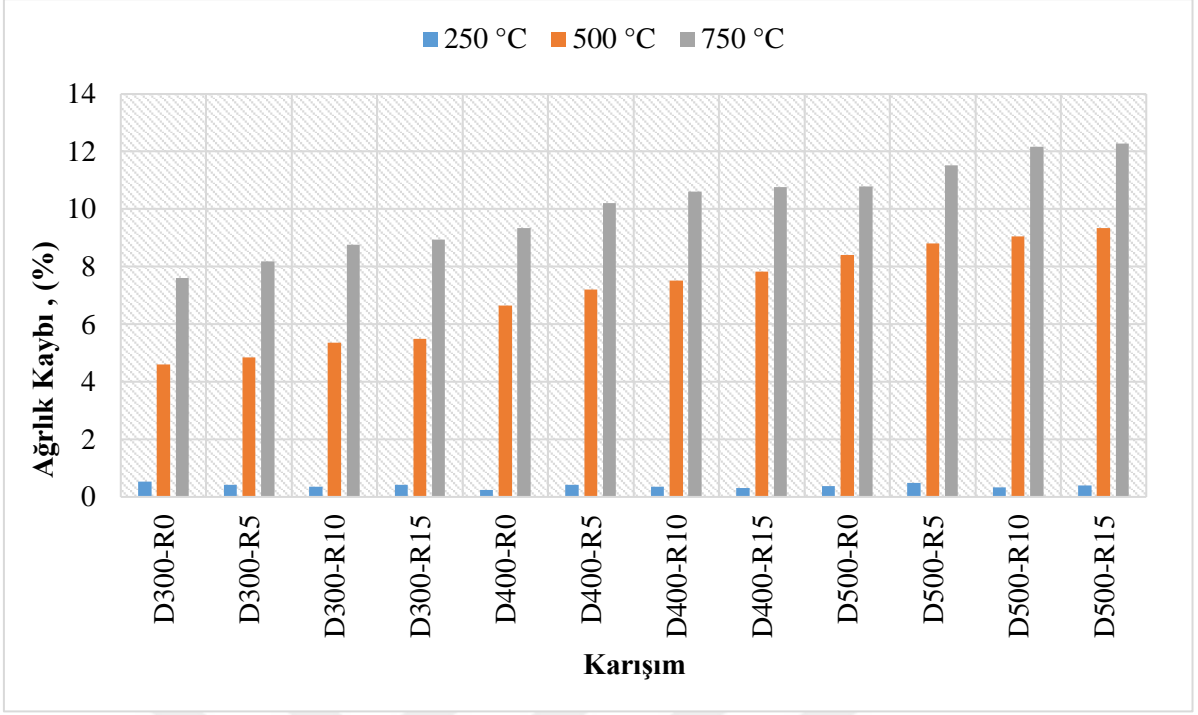
Bu bölümde, yüksek sıcaklığa maruz kalan GB numunelerinin ağırlıklarındaki değişiklikler araştırılmıştır. Çizelge 4.9 ve Şekil 4.12'de gösterildiği gibi, yüksek sıcaklığa maruz kalan tüm örneklerde ağırlık kaybının meydana geldiği gözlenmiştir. Deneysel bulgular, 250°C'nin üzerinde İLA ile üretilen örneklerin ağırlık kaybının kontrol örneklerinden çok daha yüksek olduğunu göstermiştir. Kontrol numuneleriyle karşılaştırıldığında, 750°C'de İLA oranının %0'dan %15'e yükselmesi, 300 kg/m<sup>3</sup>, 400 kg/m<sup>3</sup> ve 500 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajlarla üretilen numunelerde ağırlık kayıplarında sırasıyla %18, %15 ve %14 oranında artışa neden olmuştur. Gözlenen bu durumun yüksek sıcaklıklarda kullanılan İLA'ların ayrışmaya başlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sonuçlar ayrıca, İLA'nın yüksek sıcaklıklardaki olumsuz etkisinin, daha yüksek bağlayıcı dozajları kullanılarak üretilen numunelerde daha az olduğunu göstermektedir.

Ek olarak, bağlayıcı dozajının artmasıyla, yüksek sıcaklığın etkisi altında ağırlık kaybı oranında artışların meydana geldiği gözlenmiştir. Örneğin, bağlayıcı dozajındaki 300 kg/m<sup>3</sup> den 500 kg/m<sup>3</sup>e olan artış, 750°C'de kontrol numuneleri için ağırlık kaybında %42 oranında artışa neden olmuştur. Yüksek sıcaklıkların etkisi altında bağlayıcı dozajı ile ağırlık kaybı arasındaki benzer ilişkiler, İLA kullanılarak üretilen örneklerde de gözlenmiştir. Ayrıca, numunelerde gözlenen ağırlık kaybının, uygulanan sıcaklık arttıkça çarpıcı bir şekilde arttığı gözlenmiştir.

Elde ettiğimiz sonuçlara paralel olarak, inceledikleri tüm yüksek sıcaklıklarda kauçuklaştırılmış GB'lerin ağırlık kaybının kontrol örneklerinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Luhar vd., 2018). Nispeten düşük sıcaklıklarda düşük ağırlık kayıpları (% 1'in altında), GB numunelerin yapısındaki serbest suyun buharlaşmasına bağlanmaktadır. Bununla birlikte, artan sıcaklıkla birlikte önemli ağırlık kayıplarının, alüminosilikat jellerin dehidrasyonundan ve çatlakların oluşmasından kaynaklandığı söylenebilir (Kong vd.2007; Kantarci vd., 2017).

**Çizelge 4.9:** GB numunelerin ağırlık kaybı değerleri, (%).

<b>Karışım</b>	<b>250°C</b>	<b>500°C</b>	<b>750°C</b>
D300-R0	0,54	4,60	7,59
D300-R5	0,42	4,84	8,19
D300-R10	0,35	5,37	8,77
D300-R15	0,43	5,48	8,94
D400-R0	0,24	6,65	9,34
D400-R5	0,43	7,20	10,22
D400-R10	0,34	7,52	10,61
D400-R15	0,31	7,82	10,77
D500-R0	0,37	8,40	10,80
D500-R5	0,49	8,80	11,52
D500-R10	0,33	9,05	12,16
D500-R15	0,40	9,34	12,27



Şekil 4.12: Yüksek sıcaklıkların etkisiyle ağırlıktaki değişim.

#### 4.7.3. Kılcal geçirgenlik

Çizelge 4.10, Çizelge 4.11, Çizelge 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te yüksek sıcaklıkların etkisi altında farklı bağlayıcı dozajlar ve İLA oranları kullanılarak üretilen GB numunelerin kılcal geçirgenlik katsayı değerleri gösterilmektedir. Görüleceği üzere tüm değişkenlerden bağımsız olarak en düşük kılcal geçirgenlik katsayı değerleri 250°C'ye maruz kalan numunelerden elde edilmiştir. En düşük kılcal geçirgenlik katsayılarının 250°C gibi nispeten düşük sıcaklıklarda meydana gelmesi, polimerizasyon işleminin hızlanmasına bağlanmış olup ve bu da bu sıcaklık değerlerinde daha kompakt bir mikro yapıya yol açtığı şeklinde yorumlanmıştır. Kılcal geçirgenlik katsayıları, uygulanan yüksek sıcaklıkların 250°C'nin üzerine çıkmasıyla büyük ölçüde artmıştır. Bu durumun, İLA'nın bozulmasından ve daha yüksek sıcaklıklarda meydana gelen buhar basıncından kaynaklanan içyapı kusurlarındaki önemli artışlardan kaynaklandığı tahmin edilmektedir. D300-R0 numuneleri için 250°C'deki kılcal geçirgenlik katsayısı, 750°C'deki kılcal geçirgenlik katsayısından yaklaşık beş kat daha azdır. D300-R0 örneği için meydana gelen bu dramatik düşüşlere diğer örneklerde de rastlanmıştır.



**Çizelge 4.10:** GB numunelerin 250°C sonrası kılcal geçirimlilik katsayı değerleri.

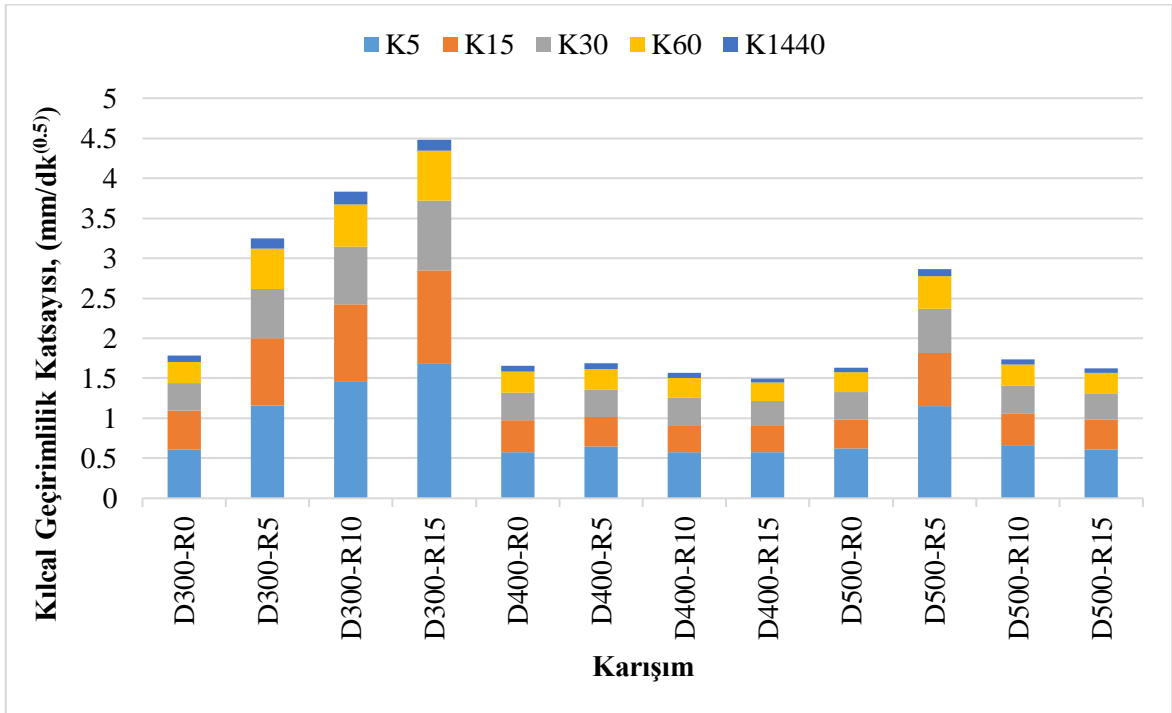
<b>Kılcal Geçirimlilik Katsayısı (mm/dk<sup>(0.5)</sup>)</b>					
<b>Karışım</b>	<b>k<sub>5</sub></b>	<b>k<sub>15</sub></b>	<b>k<sub>30</sub></b>	<b>k<sub>60</sub></b>	<b>k<sub>1440</sub></b>
D300-R0	0,6082	0,4854	0,3432	0,2685	0,0791
D300-R5	1,1628	0,8366	0,6208	0,5009	0,1265
D300-R10	1,4669	0,9605	0,7157	0,5319	0,1602
D300-R15	1,6815	1,1671	0,8691	0,6300	0,1307
D400-R0	0,5724	0,4028	0,3432	0,2634	0,0759
D400-R5	0,6440	0,3718	0,3432	0,2582	0,0717
D400-R10	0,5724	0,3305	0,3505	0,2530	0,0622
D400-R15	0,5724	0,3305	0,3140	0,2272	0,0485
D500-R0	0,6261	0,3615	0,3432	0,2479	0,0527
D500-R5	1,1538	0,6662	0,5514	0,4054	0,0880
D500-R10	0,6619	0,3925	0,3505	0,2685	0,0622
D500-R15	0,6082	0,3718	0,3359	0,2530	0,0569

**Çizelge 4.11:** GB numunelerin 500°C sonrası kılcal geçirimlilik katsayı değerleri.

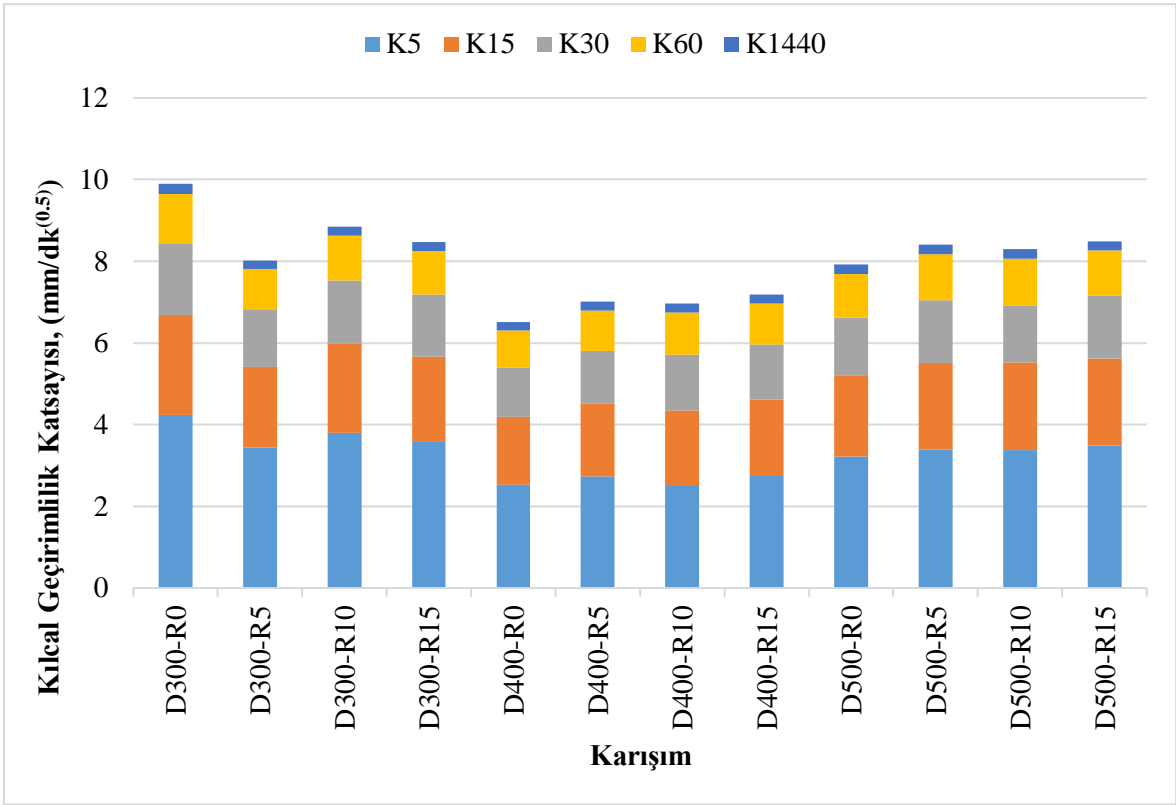
<b>Kılcal Geçirimlilik Katsayısı (mm/dk<sup>(0.5)</sup>)</b>					
<b>Karışım</b>	<b>k<sub>5</sub></b>	<b>k<sub>15</sub></b>	<b>k<sub>30</sub></b>	<b>k<sub>60</sub></b>	<b>k<sub>1440</sub></b>
D300-R0	4,2396	2,4477	1,7308	1,2239	0,2519
D300-R5	3,4346	1,9830	1,4022	0,9915	0,2077
D300-R10	3,7924	2,1895	1,5482	1,0948	0,2245
D300-R15	3,5956	2,0759	1,5117	1,0689	0,2193
D400-R0	2,5223	1,6628	1,2123	0,9140	0,2055
D400-R5	2,7369	1,7764	1,2999	0,9812	0,2161
D400-R10	2,5044	1,8487	1,3657	1,0225	0,2224
D400-R15	2,7727	1,8487	1,3364	1,0018	0,2193
D500-R0	3,2199	1,9726	1,4241	1,0638	0,2361
D500-R5	3,3988	2,1172	1,5336	1,1206	0,2382
D500-R10	3,3809	2,1482	1,3949	1,1412	0,2382
D500-R15	3,4883	2,1276	1,5336	1,1103	0,2287

**Çizelge 4.12:** GB numunelerin 750°C sonrası kılcal geçirimlilik katsayı değerleri.

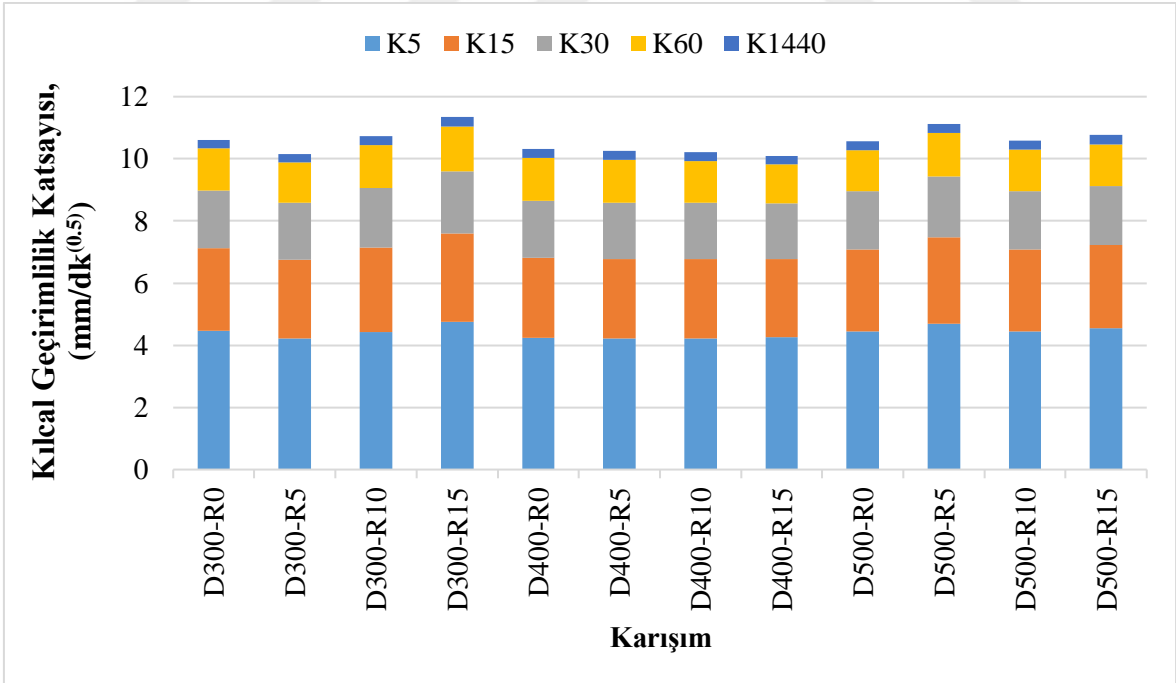
Karışım	Kılcal Geçirimlilik Katsayısı (mm/dk <sup>(0.5)</sup> )				
	k <sub>5</sub>	k <sub>15</sub>	k <sub>30</sub>	k <sub>60</sub>	k <sub>1440</sub>
D300-R0	4,4721	2,6440	1,8696	1,3478	0,2751
D300-R5	4,2217	2,5303	1,8257	1,3013	0,2730
D300-R10	4,4185	2,7163	1,9207	1,3943	0,2846
D300-R15	4,7584	2,8402	2,0083	1,4407	0,2941
D400-R0	4,2396	2,5820	1,8257	1,3839	0,2825
D400-R5	4,2217	2,5613	1,8111	1,3736	0,2804
D400-R10	4,2217	2,5613	1,8111	1,3323	0,2783
D400-R15	4,2575	2,5200	1,7819	1,2600	0,2688
D500-R0	4,4364	2,6440	1,8696	1,3271	0,2825
D500-R5	4,6868	2,7782	1,9645	1,3994	0,3004
D500-R10	4,4364	2,6543	1,8769	1,3271	0,2930
D500-R15	4,5437	2,6853	1,8988	1,3426	0,2973



**Şekil 4.13:** GB numunelerin 250°C sonrası kılcal geçirimlilik katsayısı değerleri.



Şekil 4.14: GB numunelerin 500°C sonrası kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri.



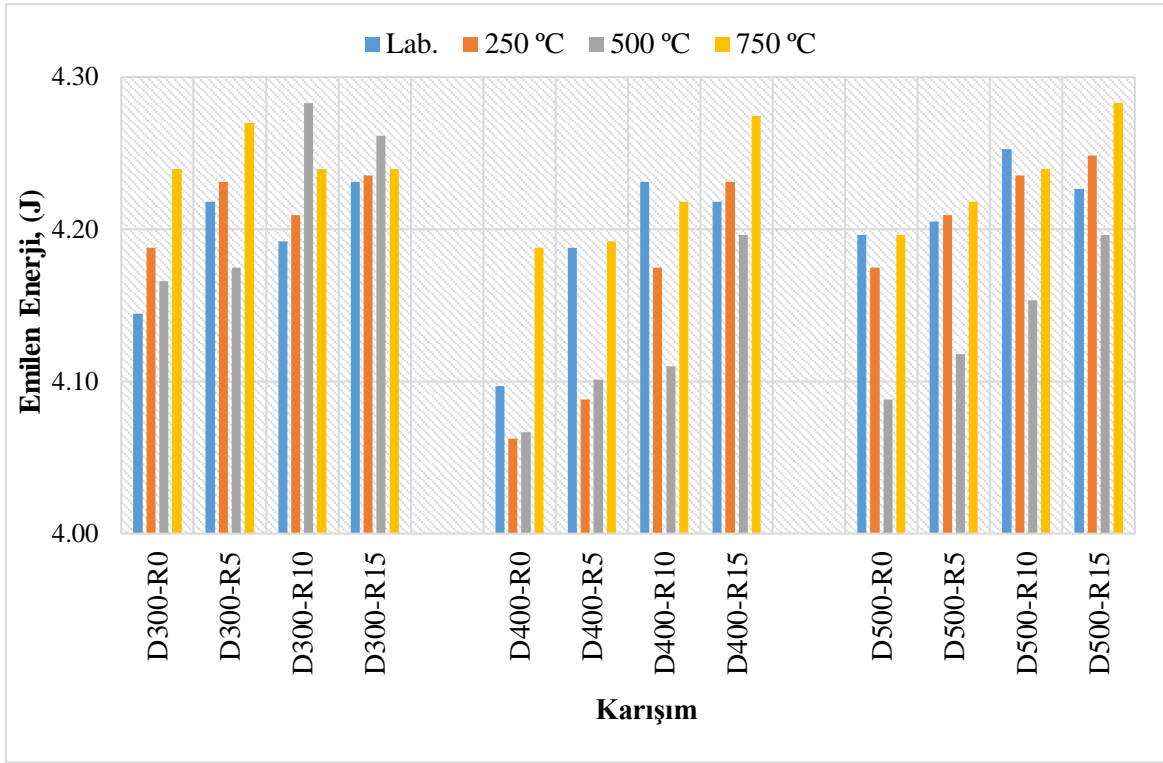
Şekil 4.15: GB numunelerin 750°C sonrası kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri.

#### 4.7.4. Darbe dayanımı

Çizelge 4.13 ve Şekil 4.16'da GB numunelerinin yüksek sıcaklıklar (250°C, 500°C ve 750 °C) sonrası darbe dayanımı testi yapılarak elde edilen enerji değerleri verilmiştir. Deneysel sonuçlar, İLA kullanımındaki artışın tüm sıcaklık değerlerinde darbe dayanım değerlerini artırdığını göstermiştir. 250°C'de 400 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerinde İLA'nın %0'dan %15'e çıkması darbe dayanım değerlerinde %4,61 artış sağlamıştır. İLA oranının %0'dan %15'e çıkarılmasıyla gözlenen benzer artış oranları, bağlayıcı dozajı 300 kg/m<sup>3</sup> ve 500 kg/m<sup>3</sup> olan GB numunelerinde de sırasıyla yaklaşık %1,12 ve %1,75 olmuştur. Bu artışlar diğer sıcaklık değerlerinde ve bağlayıcı dozajlarında da gözlenmiştir. Deneysel bulgular ayrıca, sıcaklık değerlerinin artmasıyla darbe enerjilerinin önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Artan sıcaklık değerlerinin numunelerin enerji emme kapasitesini artırdığını gösteren bu durum, darbe etkisinin numuneye temas etmesinden sonra yüksek sıcaklıklara maruz kalan numunelerde oluşan çatlakların kapanma sürecine bağlanmıştır.

**Çizelge 4.13:** GB numunelerin yüksek sıcaklıklar sonrası darbe dayanımı testi yapılarak elden edilen enerji değerleri, (J)

Karışım	Kontrol	250 °C	500 °C	750 °C
D300-R0	4,145	4,188	4,166	4,240
D300-R5	4,218	4,231	4,175	4,270
D300-R10	4,192	4,209	4,283	4,240
D300-R15	4,231	4,235	4,261	4,240
D400-R0	4,097	4,062	4,067	4,188
D400-R5	4,188	4,088	4,101	4,192
D400-R10	4,231	4,175	4,110	4,218
D400-R15	4,218	4,231	4,196	4,274
D500-R0	4,196	4,175	4,088	4,196
D500-R5	4,205	4,209	4,118	4,218
D500-R10	4,253	4,235	4,153	4,240
D500-R15	4,227	4,248	4,196	4,283



Şekil 4.16: Yüksek sıcaklıklar sonrası darbe dayanımı testi yapılarak elde edilen enerji değerleri.

#### 4.7.5. Görsel inceleme

300 kg/m<sup>3</sup>, 400 kg/m<sup>3</sup> ve 500 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen ve yüksek sıcaklıklara maruz kalan GB numunelerin görsel incelemeleri sırasıyla Şekil 4.17, 4.18 ve 4.19'da verilmiştir. Şekil 4.17 daha düşük bağlayıcı dozajı (300 kg/m<sup>3</sup>) ile üretilen GB numunelerindeki çok düşük basınç dayanımı değerlerinden sorumlu olan agrega ve bağlayıcı parçalar arasındaki zayıf yapışmayı açıkça göstermektedir. Ayrıca, elde edilen mikro yapısal gözlemlere ve mekanik dayanımlara ek olarak, görsel incelemeler, yüksek mukavemet elde etmek ve kompakt bir yapı oluşturmak için yeterli miktarda bağlayıcı dozajının kullanılması gerektiğini ortaya koymuştur. Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19, İLA kullanımından bağımsız olarak, 250°C'ye maruz kalan GB örneklerinin fiziksel görünümünde kayda değer bir değişiklik gözlenmediğini göstermiştir. Bununla birlikte, uygulanan sıcaklık 500°C'yi aştığında, renk değişiklikleri belirginleşmiştir. Yüksek sıcaklığın etkisiyle meydana gelen renk değişikliklerinin geopolimer matrisindeki su kaybı ve faz dönüşümünden kaynaklandığı belirtilmiştir (Short vd., 2001). GB numunelerinde renk değişimlerinin yanı sıra yüksek sıcaklık etkisi altında belirgin çatlak ve boşlukların oluştuğu gözlenmiştir. Suyun buharlaşması ve matris fazlarının dönüşümünden kaynaklandığı düşünülen çatlak oluşumlarının, İLA kullanımının artmasıyla birlikte daha belirgin hale

geldiği gözlenmiştir. Bu durumun İLA'nın yüksek sıcaklıklarda bozulmasından kaynaklandığı tahmin edilmiştir.

Kuri vd., (2021) yaptıkları çalışmada, 750°C'ye maruz kalan tüm GB örneklerinde belirgin bir kırmızı renk oluşumunu tespit etmişlerdir. İLA kullanımından bağımsız olarak tüm numunelerdeki bu renk değişiminin, mineral bileşenlerin oksidasyonundan kaynaklandığı belirtilmiştir.


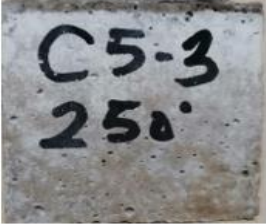




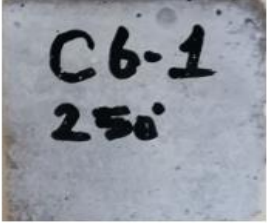


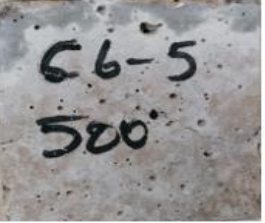
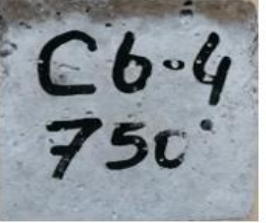




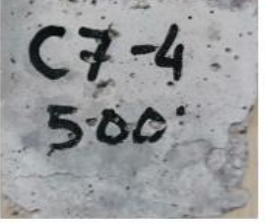


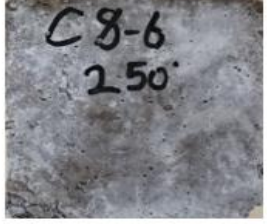
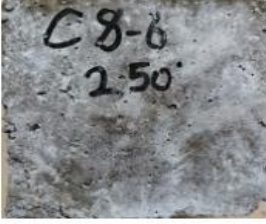










Şekil 4.17: 300 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin renk değişimi.



	250 °C		500 °C		750 °C	
	Öncesi	Sonrası	Öncesi	Sonrası	Öncesi	Sonrası
D400-R0						
D400-R5						
D400-R10						
D400-R15						

Şekil 4.18: 400 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin renk değişimi.



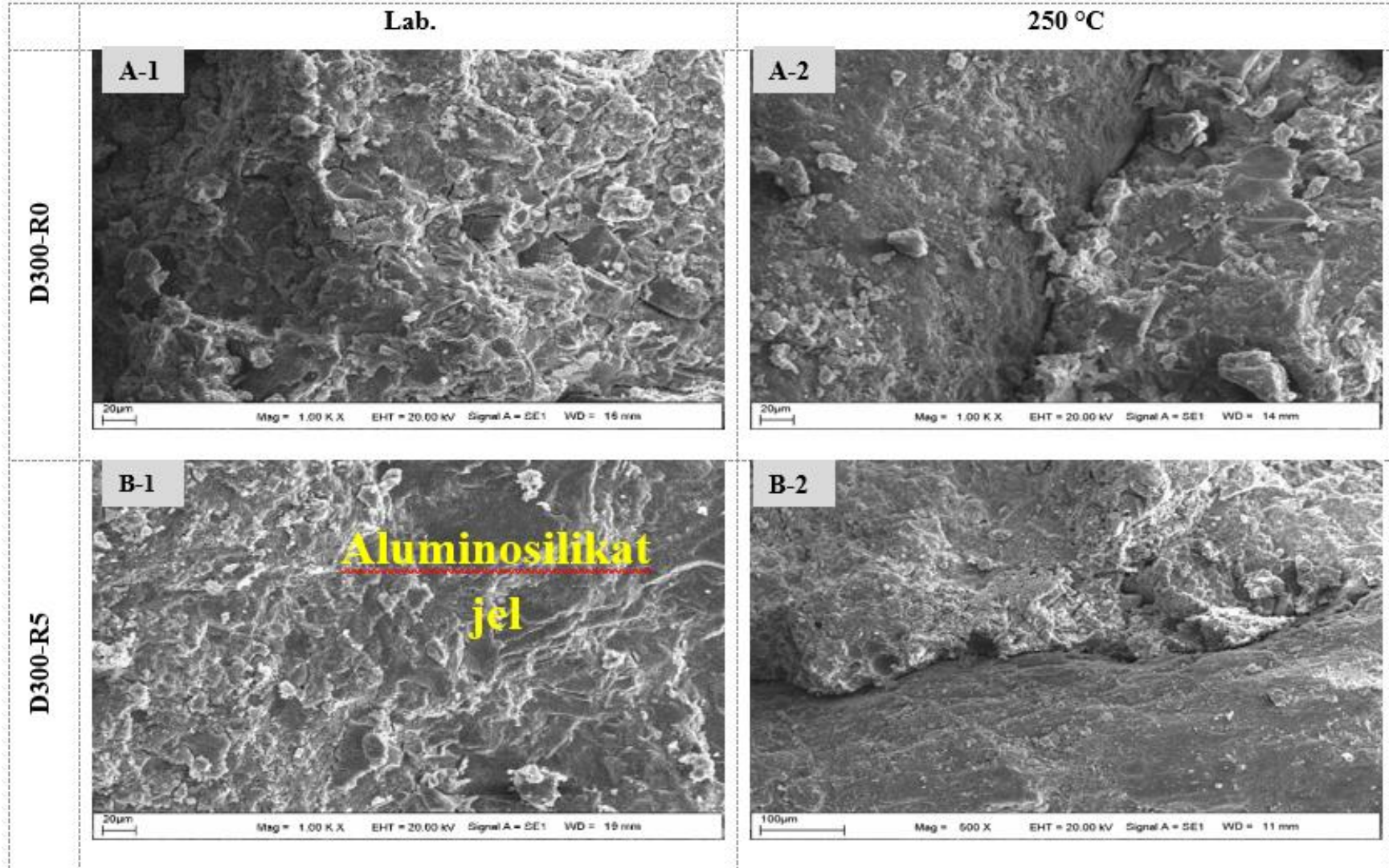
		250 °C		500 °C		750 °C	
		Öncesi	Sonrası	Öncesi	Sonrası	Öncesi	Sonrası
D500-R0							

Şekil 4.19: 500 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin renk değişimi.

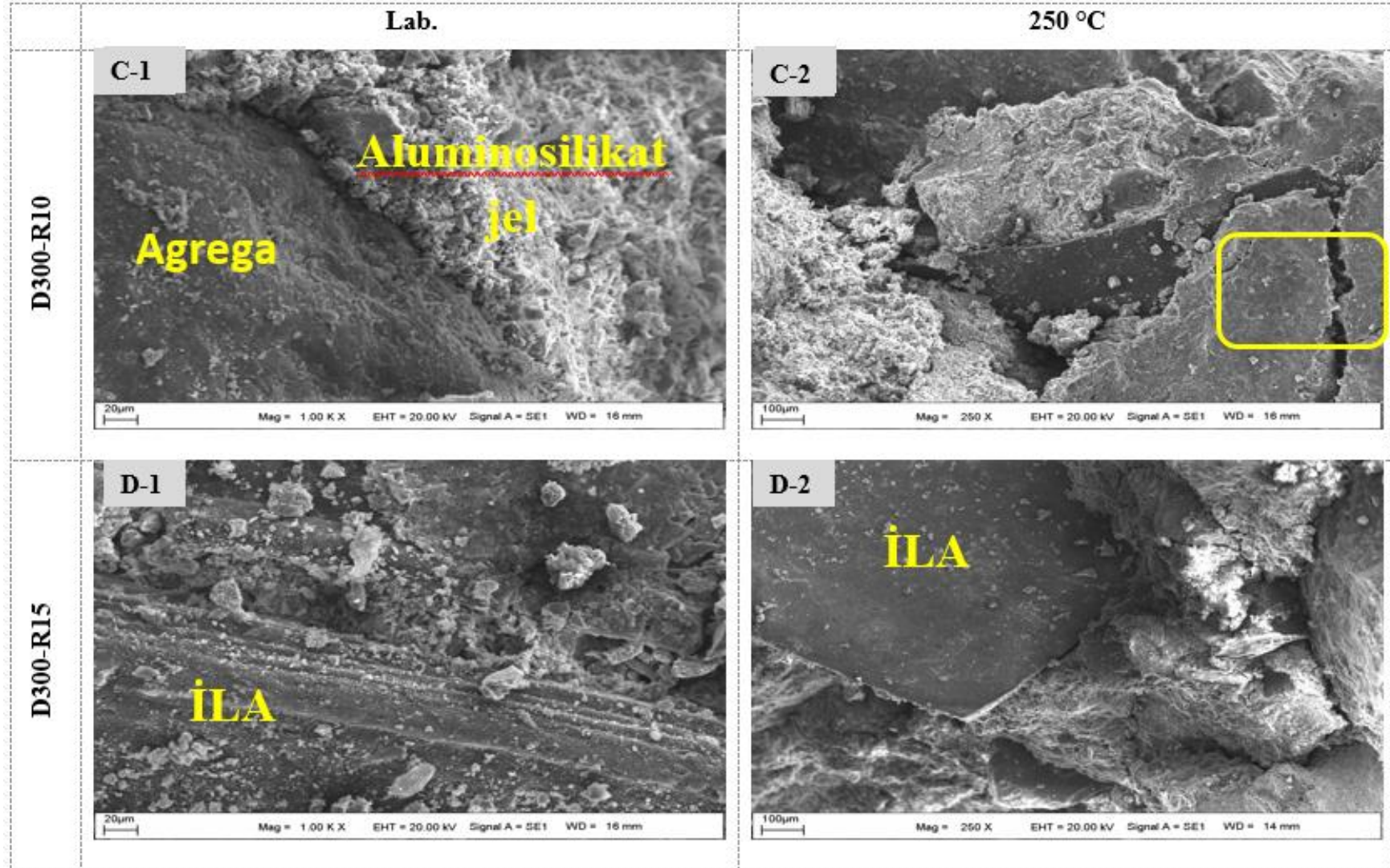
#### 4.7.6. Mikro yapı

Şekil 4.20-31'de, 25°C'den 750°C'ye kadar yüksek sıcaklıklara maruz kalan GB örneklerinin SEM mikrograflarını göstermiştir. Ayrıca Şekil 4.32'de farklı dozajlarda üretilen GB numunelerinin EDX analizleri verilmiştir. Hemen hemen tüm GB örneklerinde, kısmen veya tamamen reaksiyona girmemiş YFC parçacıklarının varlığı belirlenmiştir. SEM görüntüleri, laboratuvar koşullarında kürlenmiş GB numuneleri için çatlak oluşumunun ihmal edilebilir olduğunu gösterirken, artan sıcaklığın etkisiyle tüm numunelerde birçok mikro çatlak ve boşluk oluştuğu gözlenmiştir. Öte yandan, yüksek sıcaklığa maruz kalmayan GB örneklerinde İLA ve alümino silikat bağlayıcı arasında zayıf ara yüzey geçiş bölgesinin (ITZ) varlığı tespit edilirken, sıcaklık arttıkça bu ITZ'nin genişlediği gözlenmiştir. Özellikle, İLA kullanımının basınç dayanımı üzerindeki olumsuz etkisi, mikroyapısal analizlerde açıkça gözlemlenen ve bağlayıcı matris ile kauçuk parçacıkları arasında güçlü bir bağ oluşturamamaktan kaynaklanan bu ITZ'lerin varlığına bağlanmıştır. GB matrisinde jel fazı, agrega ve İLA arasındaki termal uyumsuzluktan kaynaklanan bu boşluk ve çatlakların oluşumunun, GB'nin yüksek sıcaklık etkisi altında mukavemet ve dayanıklılık özelliklerinin azalmasından sorumlu olduğu söylenebilir.



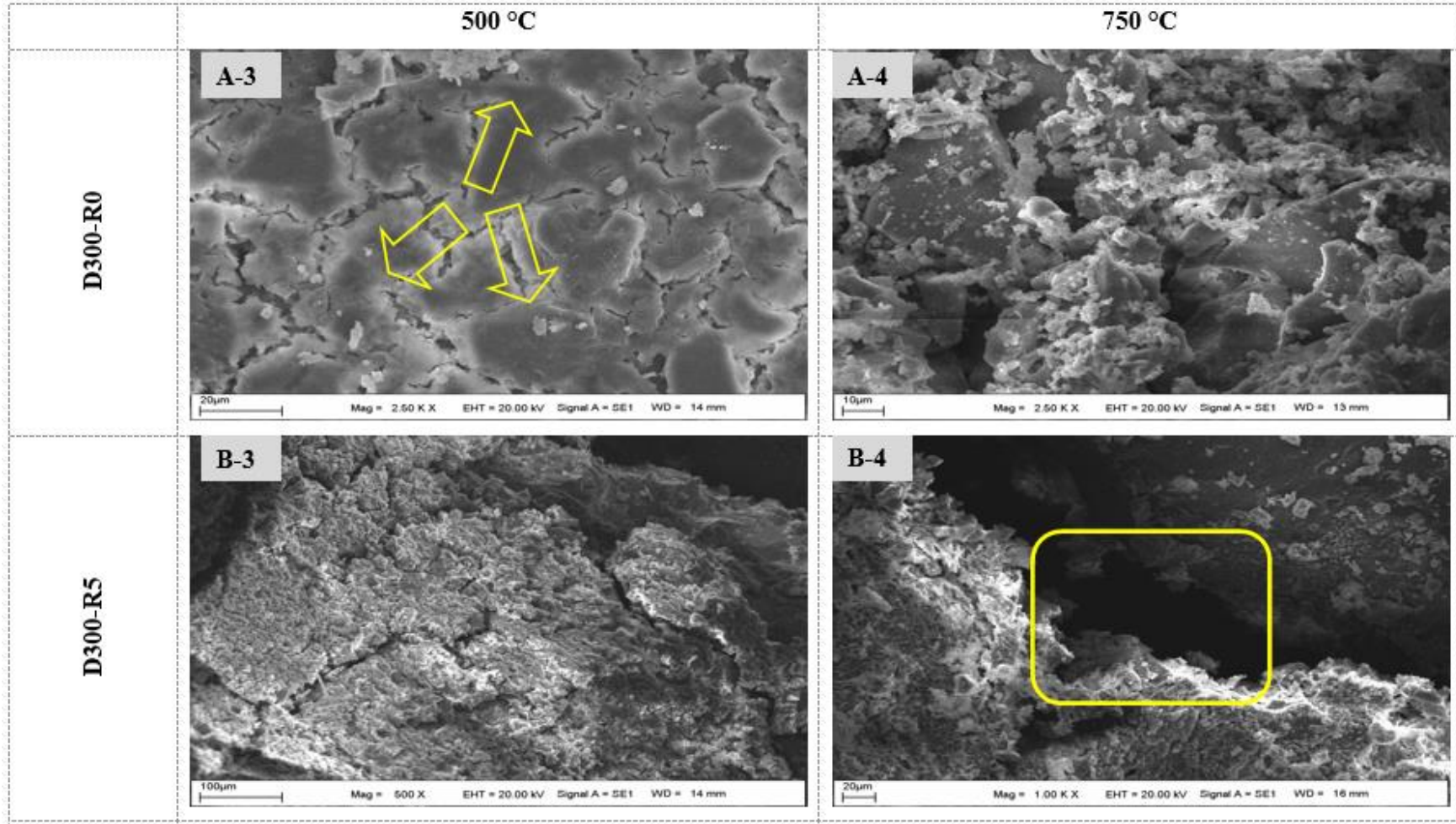


Şekil 4.20: 300 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları.

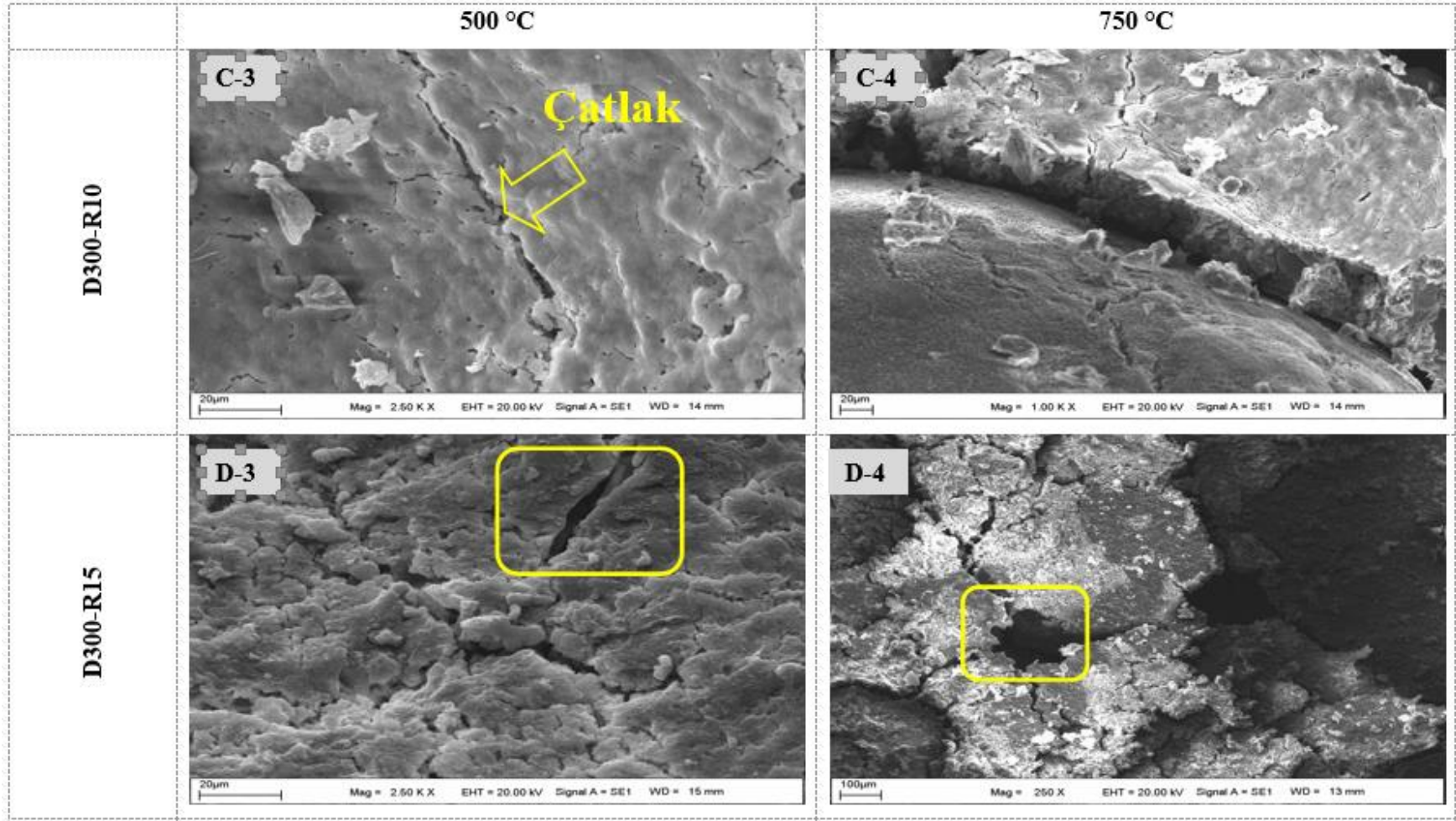


Şekil 4.21 (devam) : 300 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları.



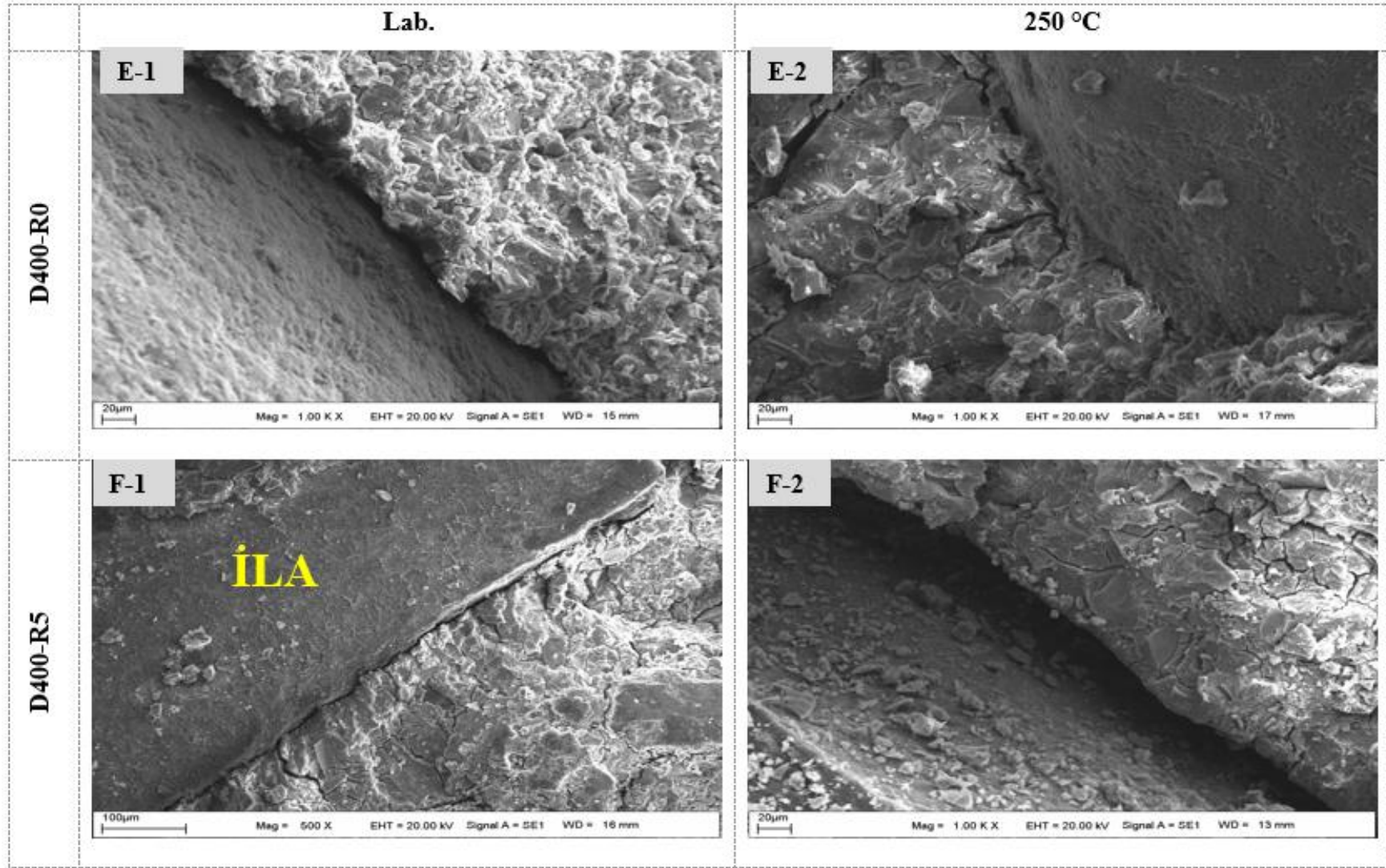


Şekil 4.22 (devam) : 300 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları.

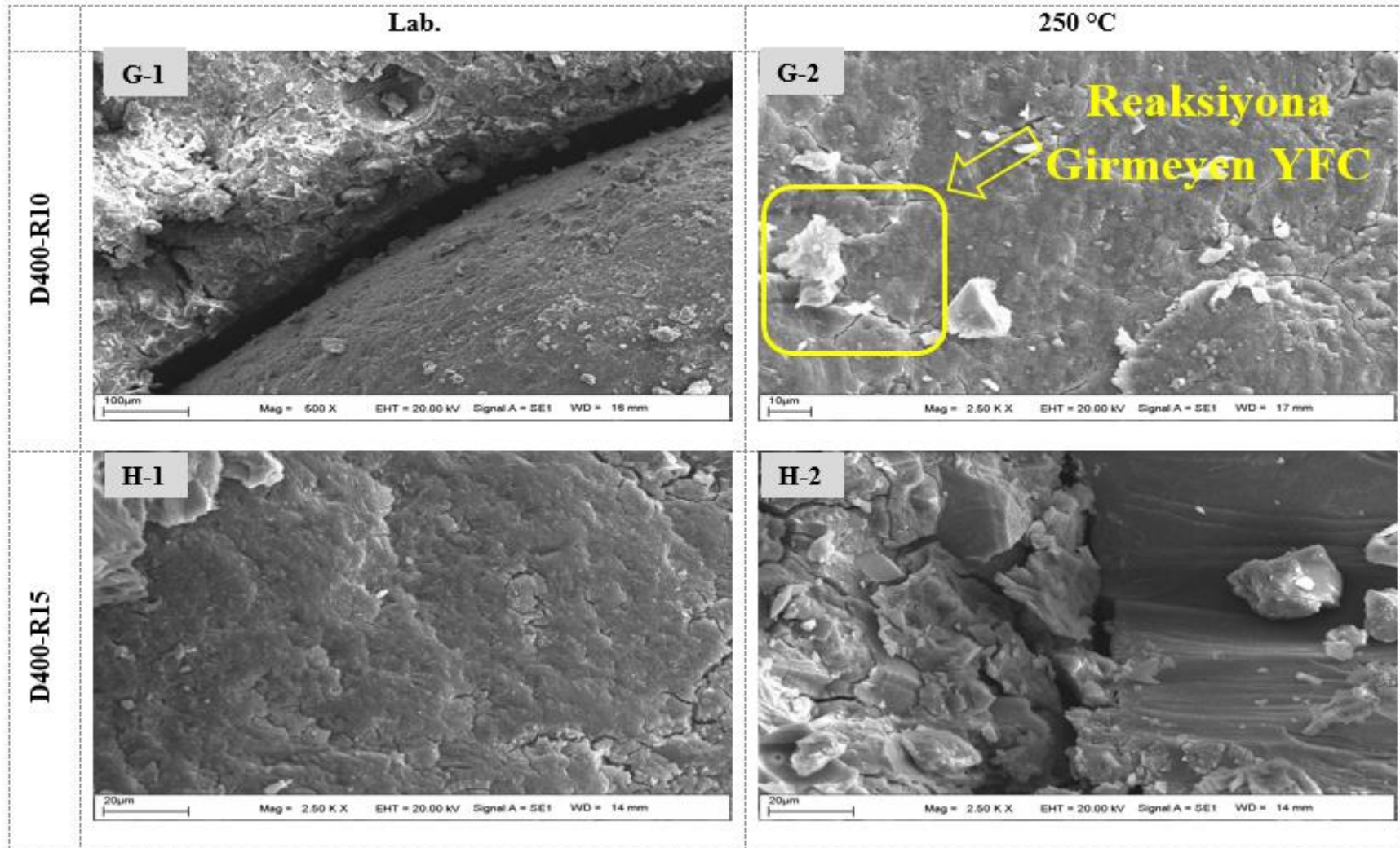


Şekil 4.23 (devam) : 300 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları.



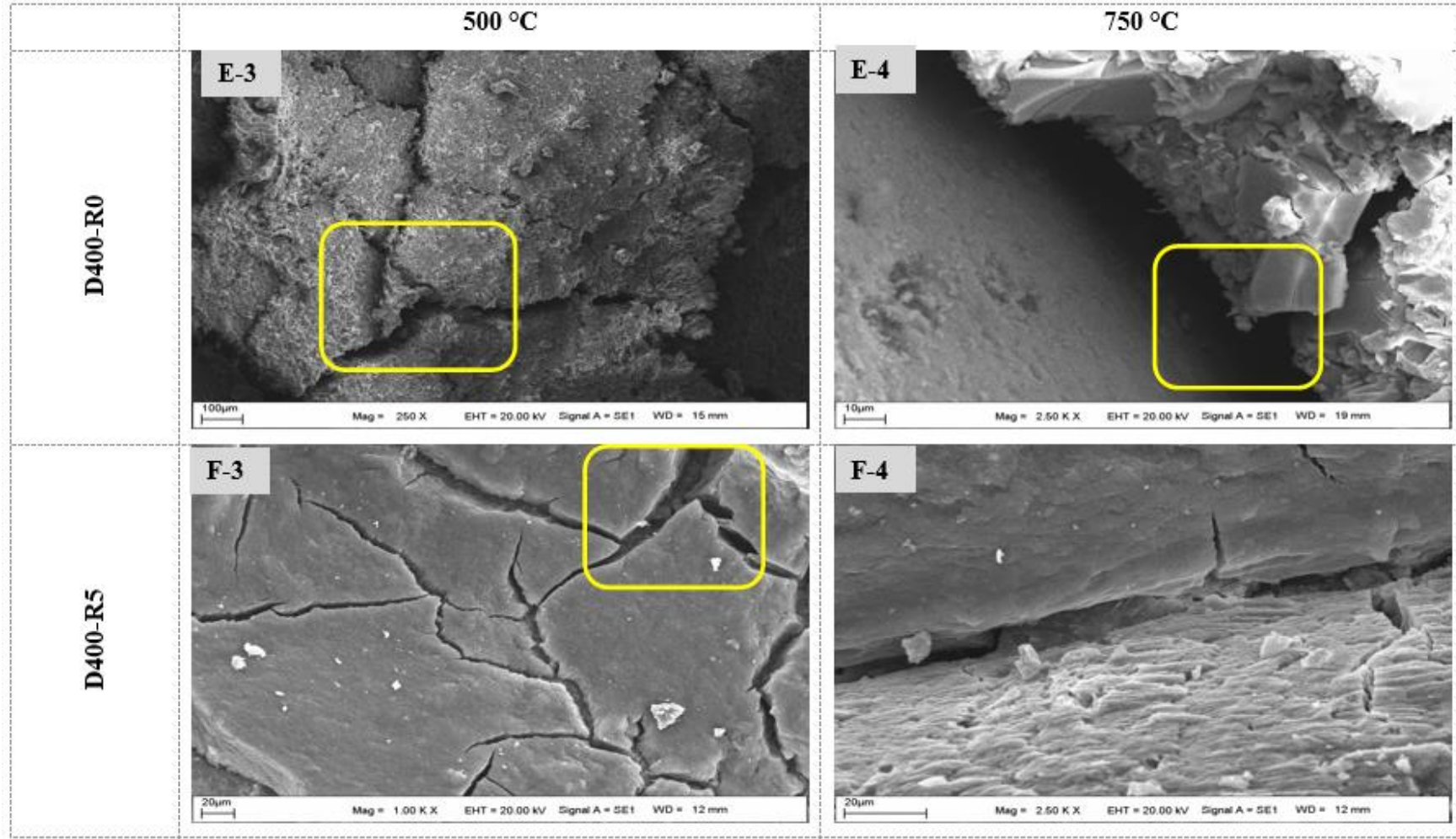


Şekil 4.24: 400 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları

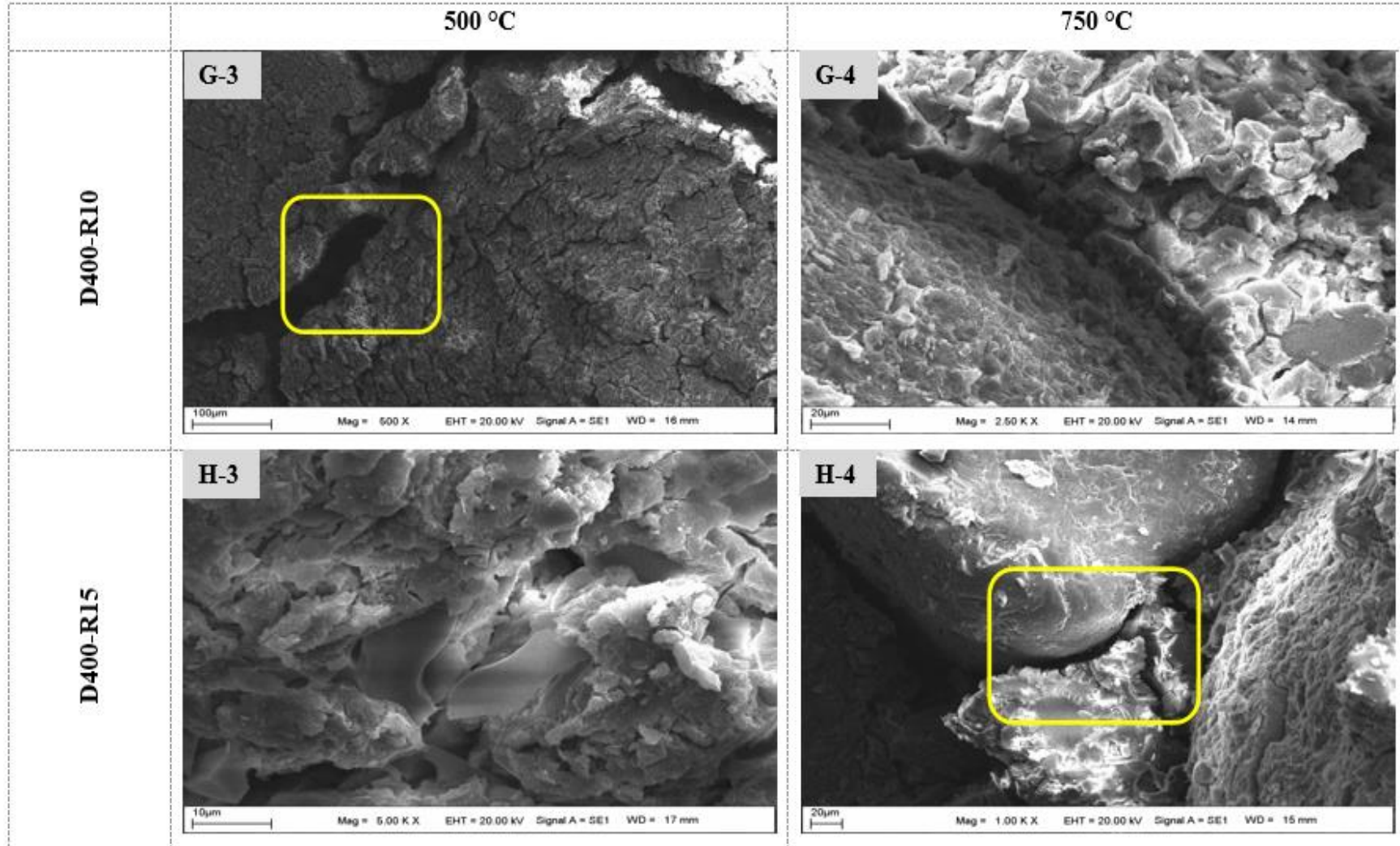


Şekil 4.25 (devam) : 400 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları



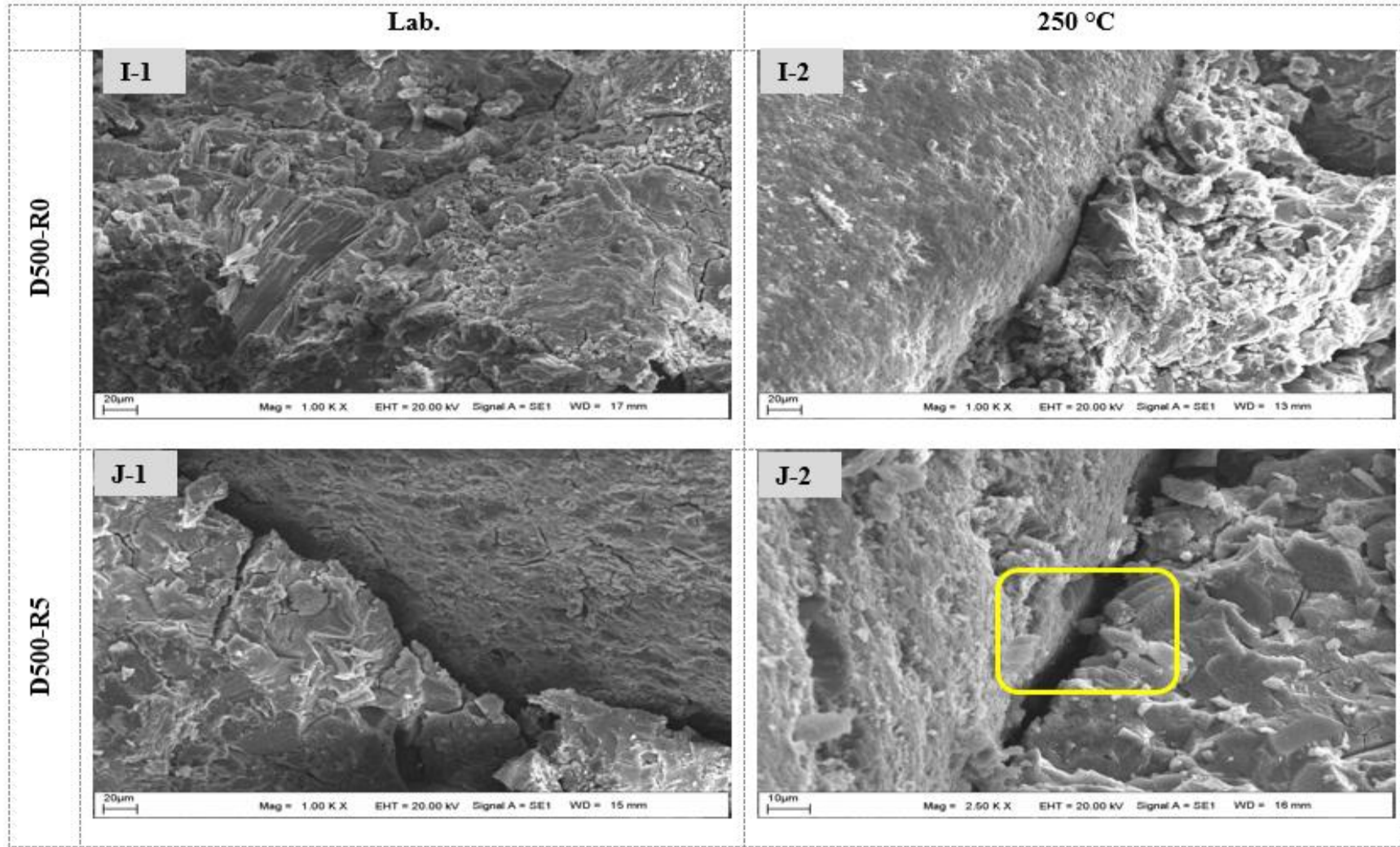


Şekil 4.26 (devam) : 400 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları

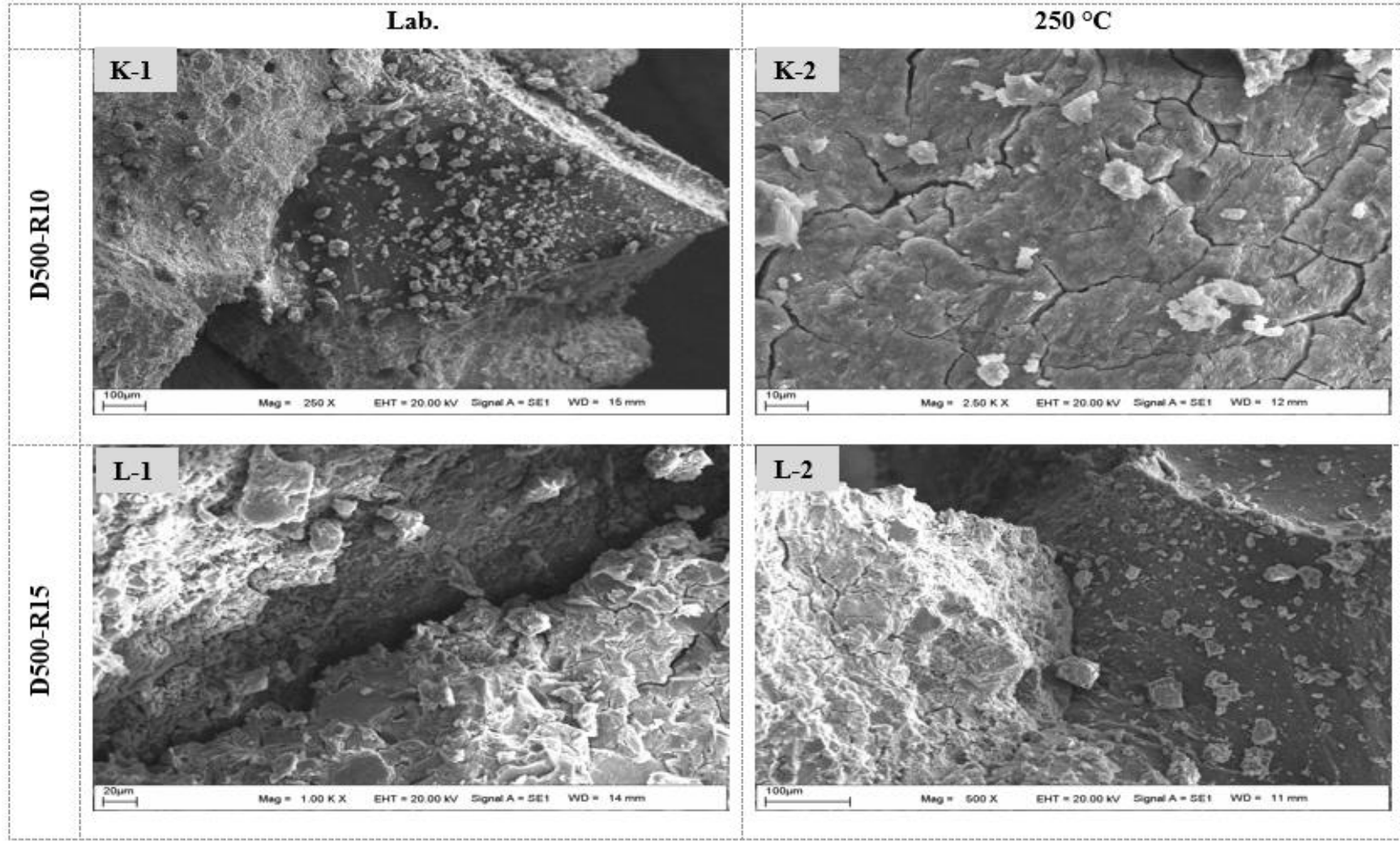


Şekil 4.27 (devam) : 400 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları

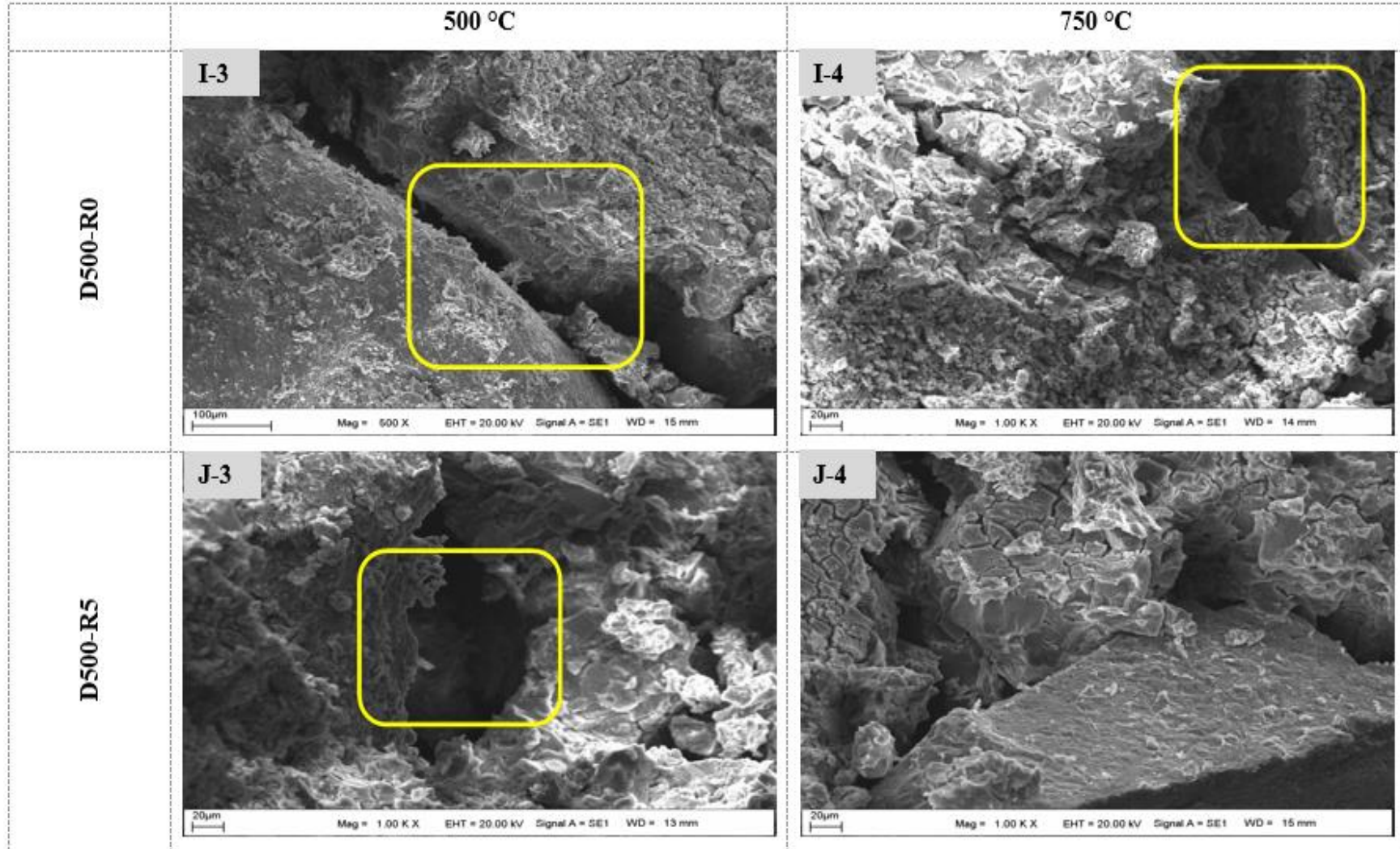




Şekil 4.28: 500 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları

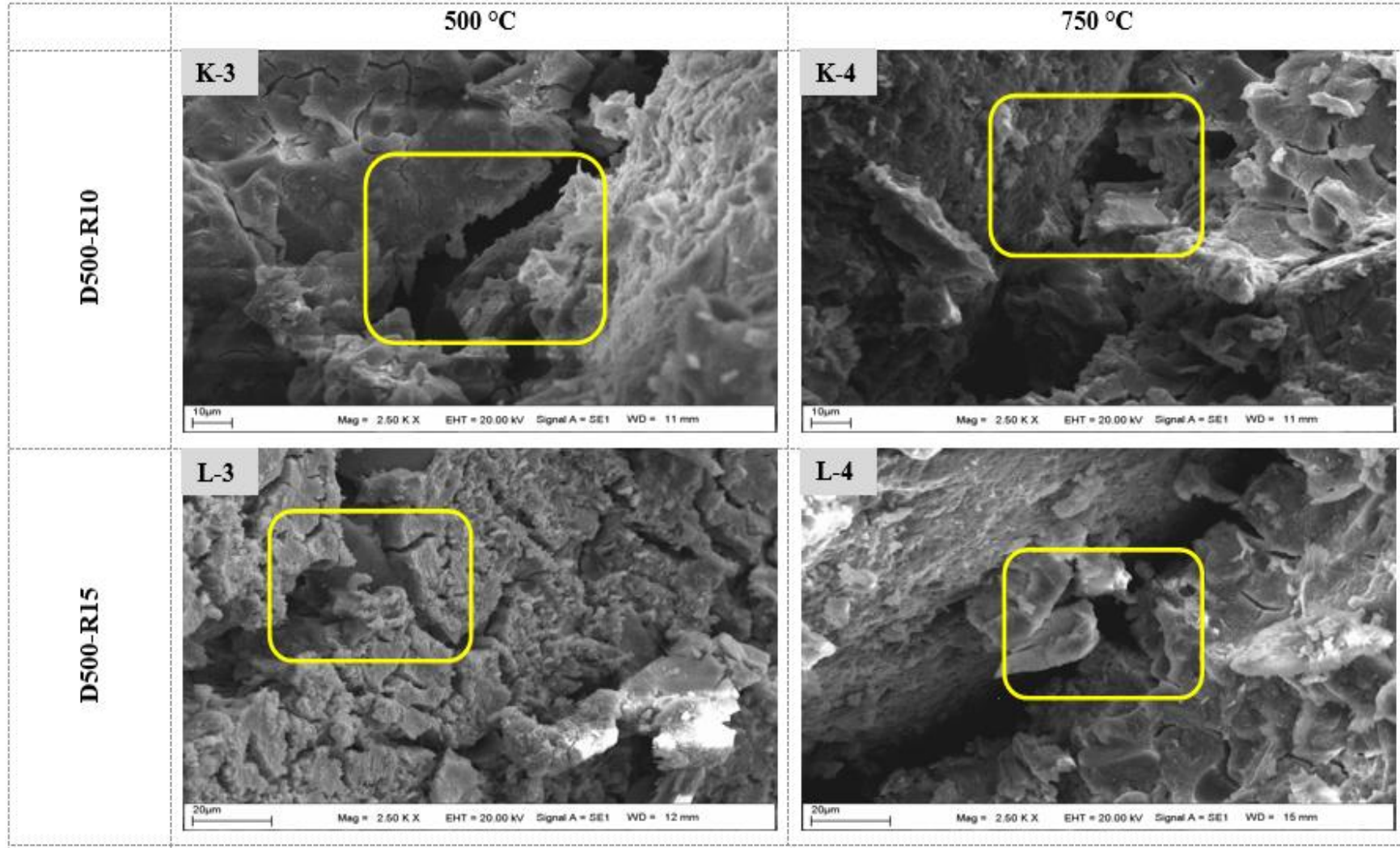


Şekil 4.29 (devam) : 500 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları

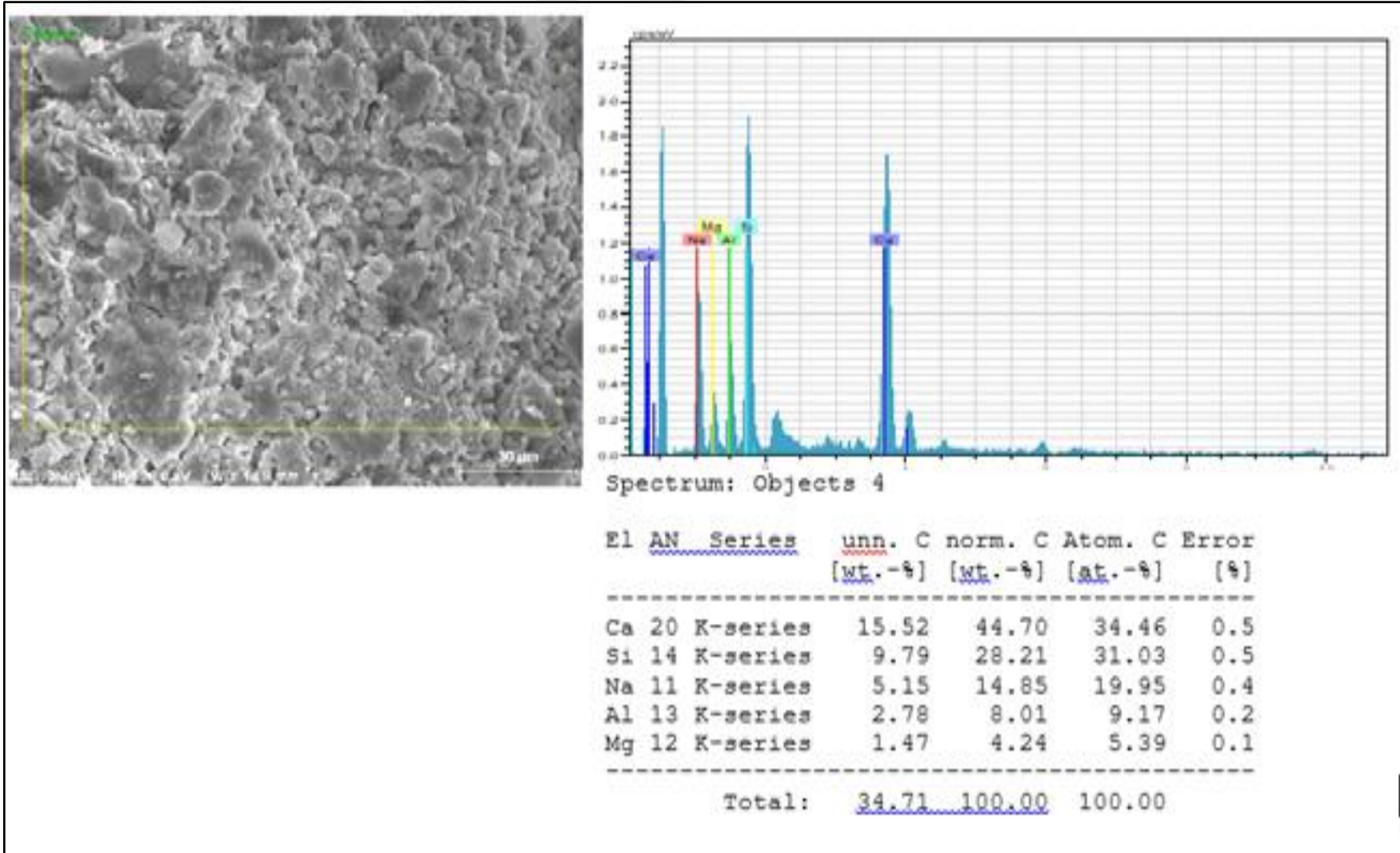


Şekil 4.30 (devam) : 500 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları





Şekil 4.31 (devam) : 500 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ile üretilen GB numunelerin SEM mikrografları.



Şekil 4.32: 500 kg/m<sup>3</sup> dozajlı bir GB numunenin EDX analizi.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Farklı İLA (%0, %5, %10 ve %15) oranları ve bağlayıcı dozajları ( 300 kg/m<sup>3</sup>, 400 kg/m<sup>3</sup>, 500 kg/m<sup>3</sup>) kullanılarak üretilen GB'lerin çeşitli özelliklerinin ayrıntılı olarak incelendiği bu çalışmadan elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

1. Bağlayıcı dozajındaki artışın, boşluk oluşumunu azaltan alüminosilikat jel miktarını artırarak daha yoğun bir mikro yapıya ve üstün mekanik özelliklere yol açtığı sonucuna varılmıştır. Bu çıkarım, bağlayıcı dozajındaki artışın (300 kg/m<sup>3</sup>ten 400 kg/m<sup>3</sup>e), İLA kullanımından bağımsız olarak basınç dayanımı değerlerini önemli ölçüde arttırdığı bulgularıyla desteklenmiştir. Bununla birlikte, bağlayıcı dozajının 400 kg/m<sup>3</sup>ten 500 kg/m<sup>3</sup>e yükseltilmesinin bir sonucu olarak bu önemli artışlar gözlenmemiştir. Bunun nedeninin, bağlayıcı dozajındaki artışa rağmen Ç/B oranının sabit kalması sonucu zayıf işlenebilirliğin neden olduğu bazı sıkıştırma sorunlarından kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Öte yandan, İLA kullanımının basınç dayanımı değerleri üzerindeki olumsuz etkisinin, İLA'nın herhangi bir ön işleme maruz kalmaması, doğal agregalardan çok farklı elastisite modülüne sahip olması ve geopolimer kompozitlerle zayıf yapışması gibi faktörlerden kaynaklandığı belirtilmelidir.
2. Basınç dayanımı test sonuçlarına benzer şekilde, bağlayıcı dozajındaki artış (300 kg /m<sup>3</sup>ten 400 kg/m<sup>3</sup>e) GB numunelerinin eğilme ve yarmada çekme dayanımı değerlerini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına benzer şekilde, bağlayıcı dozajının 400 kg/m<sup>3</sup>ten 500 kg/m<sup>3</sup>e yükseltilmesi ise önemli artışlara yol açmamıştır. Ayrıca İLA oranının kullanımındaki artış eğilme ve yarmada çekme dayanımı değerlerini arttırmıştır.
3. İLA kullanım oranının artması, GB numunelerinin darbe dayanımı değerlerinde artışa neden olmuştur. Bu durum, lastik parçacıklarının düşük sertliği ve dolayısıyla enerjinin çoğunun lastik lifleri tarafından emilmesi nedeniyle matrisin esnekliği ile açıklanabilir.
4. En düşük kılcal geçirimsizlik değerleri %15 İLA kullanımı ve 400 kg/m<sup>3</sup> dozajı ile üretilen numunelerden elde edilmiştir. Ayrıca İLA kullanımı ile kılcal geçirimsizlikteki azalmanın polar olmayan bir yapıya sahip olan İLA'nın hidrofobik yapısından kaynaklandığı öne sürülmüştür.
5. İLA kullanım oranının artmasıyla birlikte; yüksek sıcaklık etkilerine maruz kalan GB numunelerinin basınç dayanımındaki azalmalar ve ağırlık kayıpları daha yüksek seviyelerde olmuştur. Gözlenen bu durumların, yüksek sıcaklıklarda kullanılan İLA'ların



ayrışmasının başlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunların aksine sıcaklık değerlerinin artmasıyla birlikte GB numunelerinin darbe dayanım değerlerinde önemli gelişmeler gözlenmiştir.

6. Görsel incelemeler, bağlayıcı dozajının GB numunelerinde kompakt matris oluşumu, güçlü yapışma ve yüksek mukavemet özellikleri elde etmek için yeterli miktarda kullanılması gerektiğini ortaya koymuştur. Ek olarak, İLA kullanılarak üretilen GB numunelerinde, İLA'nın yüksek sıcaklıkların etkisiyle bozunmaya maruz kalmasından kaynaklanan daha yüksek oranlarda belirgin çatlak oluşumları gözlenmiştir.
7. Yapılan SEM analizleri, daha yüksek bağlayıcı dozajlarla üretilen GB numunelerinde daha kompakt bir mikro yapının oluştuğunu ve yüksek sıcaklığın etkisi altında mekanik özelliklerde azalmaya neden olan mikro çatlakların oluşumunu kanıtladığını göstermiştir.

Bu çalışmada, iri atık lastiklerin kullanılmasıyla, basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık performansları açısından olumsuz etkilerinin aksine, diğer performans kriterlerini önemli ölçüde iyileştiren bulgular elde edilmiştir. Bu anlamda bu çalışmanın YFC ve İLA kullanımı ile etkin ve verimli bir geri dönüşüm sürecine katkı sağladığı söylenebilir. Ancak atık lastik kullanımının, yapısal betonların en önemli özelliği olan basınç dayanımı üzerindeki olumsuz etkisinin ortadan kaldırılması gerektiği de aşikâr bir gerçektir. Bu nedenle, atık kauçuk partiküllerinin kullanımının gelecekte basınç dayanımı üzerindeki olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için bazı girişimlerde bulunulmalıdır. Bunlardan en önemlisi bu atık kauçukların beton üretiminde kullanılmadan önce ön işlemden geçirilmesidir. Geliştirilecek bir ön arıtma yöntemi ile atık kauçukların sadece basınç dayanımının artırılması değil, aynı zamanda ısıl direncin artırılması da araştırmaların olası bir konusu olabilir. Bu girişimlerin mekanik, dayanıklılık ve maliyet analizi açısından optimizasyon süreçlerinin tamamlanması da önerilmektedir. Bu sayede çevre dostu, üstün performans ve düşük maliyetli yapısal elemanların verimli geri dönüşüm ile üretilebileceği umulmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Abdelmonem, A., El-Feky, MS, Nasr, ESA, ve Kohail, M. (2019).** Performance of high strength concrete containing recycled rubber. *Construction and Building Materials*, 227, 116660. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.041>
- Afshinnia, K., ve Poursaee, A. (2015).** The influence of waste crumb rubber in reducing the alkali-silica reaction in mortar bars. *Journal of Building Engineering*, 4, 231-236.
- Al-Azzawi, A. A., Shakir, D., ve Saad, N. (2018).** Flexural Behavior of Rubberized Reinforced Concrete Beam. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.20), 316-320.
- Ali, I. M., Naje, A. S., ve Nasr, M. S. (2020).** Eco-friendly chopped tire rubber as reinforcements in fly ash based geopolymer concrete. *Global NEST Journal*, 22(3), 342-347.
- Aly, A. M., El-Feky, M. S., Kohail, M., ve Nasr, E. S. A. (2019).** Performance of geopolymer concrete containing recycled rubber. *Construction and Building Materials*, 207, 136-144.
- Antoni, D. W. ve Hardjito, D. (2015).** Improving the durability of pozzolan concrete using alkaline solution and geopolymer coating. *Procedia Engineering*, 125, 747 -753
- Arslan, K. M. (2014).** Sülfat Etkisine Maruz Kalmış Mineral ve Nano Katkılı Harçların Durabilitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Programı, İstanbul
- Aslani, F. ve Kelin, J. (2018).** Assessment and development of high-performance fibre-reinforced lightweight self-compacting concrete including recycled crumb rubber aggregates exposed to elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 200, 1009-1025.
- Bengar, H. A., Shahmansouri, A. A., Sabet, N. A. Z., Kabirifar, K. ve Tam, V. W. (2020).** Impact of elevated temperatures on the structural performance of recycled rubber concrete: Experimental and mathematical modeling. *Construction and Building Materials*, 255, 119374.
- Derinpınar N.A., (2021).** Cam tozu katkılı ve yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonların yangın dayanımının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Dinusha, S. T., ve Socrates, (2020).** S. S. Experimental investigation of geopolymer concrete using nano-silica.
- Dong, M., Elchalakani, M., Karrech, A., ve Yang, B. (2021).** Strength and durability of geopolymer concrete with high volume rubber replacement. *Construction and Building Materials*, 274, 121783.
- Dorum, A., Koçak, Y., Yılmaz, B., ve A., Uçar, (2009).** Yüksek fırın cürufunun çimento yüzey özelliklerine ve hidrasyona etkileri. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, (019), 47-58.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., ve van Deventer, J. S. (2007).** Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of materials science*, 42(9), 2917-2933.

- Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., ve Van Deventer, J.S.J. (2007).** The role of inorganic polymer technology in the development of ‘green concrete’, *Cement and Concrete Research*, 37 (12), 1590–1597
- Engin, Y. (2015).** Yüksek Fırın Cürufu ve Yüksek Fırın Cürufu Çimento Üretimi Özellikleri Etkileri, 1-20. <https://www.betonvecimento.com>
- Erdoğan, T. Y. (2007).** Puzolanik mineral katkılar ve tarihi geçmişleri (s:263-275). II.Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, 12-13 Nisan, Ankara
- Erdoğan, T.Y. (2003).** Beton. ODTÜ Geliştirme vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Ankara, Türkiye, 757 sayfa
- Eren, N. A., Alzebaree, R., Çevik, A., Niş, A., Mohammedameen, A., ve Gülşan, M. E. (2021).** The Effects of Recycled Tire Rubbers and Steel Fibers on the Performance of Self-compacting Alkali Activated Concrete. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(3), 890-900.
- Feng, W., Liu, F., Yang, F., Li, L., ve Jing, L. (2018).** Experimental study on dynamic split tensile properties of rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 165, 675-687.
- Fernandez-Jimenez, A., Monzo, M., Vicent, M., Barba, A., Palomo, A. (2008).** Alkaline activation of metakaolin–fly ash mixtures: Obtain of Zeoceramics and Zeocements. *Microporous Mesoporous Mater.* 108(1–3), 41-49
- Gerges, N. N., Issa, C. A., ve Fawaz, S. A. (2018).** Rubber concrete: Mechanical and dynamical properties. *Case Studies in Construction Materials*, 9, e00184.
- Gupta, T., Chaudhary, S., ve Sharma, R. K. (2014).** Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. *Construction and building Materials*, 73, 562-574.
- Gupta, T., Sharma, R. K., ve Chaudhary, S. (2015).** Impact resistance of concrete containing waste rubber fiber and silica fume. *International Journal of Impact Engineering*, 83, 76-87.
- Gupta, T., Siddique, S., Sharma, R. K., ve Chaudhary, S. (2017).** Effect of elevated temperature and cooling regimes on mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber fiber. *Construction and Building Materials*, 137, 35-45.
- Hendriks, C. A., Worrell, E., De Jager, D., Blok, K., ve Riemer, P. (1998).** Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. In Proceedings of the fourth international conference on greenhouse gas control technologies (pp. 939-944). *IEA GHG R&D Programme Interlaken*, Austria.
- Ho, A. C., Turatsinze, A., ve Vu, D. C. (2008).** On the potential of rubber aggregates obtained by grinding end-of-life tyres to improve the strain capacity of concrete. In Concrete repair, rehabilitation and retrofitting II (pp. 113-114). CRC Press.
- Huntzinger, D. N., ve Eatmon, T. D. (2009).** A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal Of Cleaner Production*, 17(7), 668-675.
- Ibrahim, K. I. M., Al-Tersawy, S. H. (2019).** The Hybrid Effect of Micro and Nano Silica on the Properties of Normal and High Strength Concrete, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 14, Issue 4 Ver. VI, 62-72.

- Kantarci F. (2018).** Nano silis, mikro silis ve polimer katkıları içeren volkanik tüf esaslı geopolimer beton üretimi ve özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi.
- Kantarci, F., Türkmen, İ., ve Ekinçi, E. (2021).** Improving elevated temperature performance of geopolimer concrete utilizing nano-silica, micro-silica and styrene-butadiene latex. *Construction and Building Materials*, 286, 122980.
- Khale, D., ve Chaudhary, R. (2007).** Mechanism of geopolimerization and factors influencing its development: a review. *Journal Of Materials Science*, 42(3), 729-746.
- Komnitsas, K. A. (2011).** Potential of geopolimer technology towards green buildings and sustainable cities. *Procedia Engineering*, 21, 1023-1032.
- Kong, D. L., Sanjayan, J. G., ve Sagoe-Crentsil, K. (2007).** Comparative performance of geopolimers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. *Cement And Concrete Research*, 37(12), 1583-1589.
- Kuri, J. C., Majhi, S., Sarker, P. K., ve Mukherjee, A. (2021).** Microstructural and non-destructive investigation of the effect of high temperature exposure on ground ferronickel slag blended fly ash geopolimer mortars. *Journal of Building Engineering*, 43, 103099.
- Li, Z., Ding, Z., Zhang, Y. (2004).** Development of Sustainable Cementitious Materials (pp. 55-76). Proc. *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*. May 20-21, Beijing
- Liu, F., Chen, G., Li, L., ve Guo, Y. (2012).** Study of impact performance of rubber reinforced concrete. *Construction And Building Materials*, 36, 604-616.
- Luhar, S., Chaudhary, S., ve Luhar, I. (2018).** Thermal resistance of fly ash based rubberized geopolimer concrete. *Journal of Building Engineering*, 19, 420-428.
- Luhar, S., Chaudhary, S., ve Luhar, I. (2019).** Development of rubberized geopolimer concrete: Strength and durability studies. *Construction and Building Materials*, 204, 740-753.
- Emiroğlu M. (2006)** “Atık Lastiğin Beton İçerisinde Kullanımı ve Betonun Karakteristiklerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ,
- Mallikarjuna Rao, G., ve Gunneswara Rao, T. D. (2018).** A quantitative method of approach in designing the mix proportions of fly ash and GGBS-based geopolimer concrete. *Australian Journal of Civil Engineering*, 16(1), 53-63.
- Marques, A. M., Correia, J. R., ve De Brito, J. (2013).** Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled rubber aggregate. *Fire Safety Journal*, 58, 49-57.
- McMahon, L. J., (1999)** ‘The Feasibility of Using Recycled Rubber Tires in the Production of Asphalt in Alaska presented to the faculty of Alaska Pacific University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Arts by’
- Mermerdaş, K., Algin, Z., Oleiwi, S. M., & Nassani, D. E. (2017).** Optimization of lightweight GGBFS and FA geopolimer mortars by response surface method. *Construction and Building Materials*, 139, 159-171.
- Mousa, M. I. (2017).** Effect of elevated temperature on the properties of silica fume and recycled rubber-filled high strength concretes (RHSC). *HBRC journal*, 13(1), 1-7.

- Mustakim, S. M., Das, S. K., Mishra, J., Aftab, A., Alomayri, T. S., Assaedi, H. S., ve Kaze, C. R. (2020).** Improvement in fresh, mechanical and microstructural properties of fly ash-blast furnace slag based geopolymer concrete by addition of nano and micro silica. *Silicon*, 1-14.
- Nazari, A., Riahi, S. (2011).** The effects of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on strength assessments and water permeability of concrete in different curing media. *Mater. Sci. Eng., A*, 528(3), 1173–1182.
- Pham, T. M., Lim, Y. Y., ve Malekzadeh, M. (2021).** Effect of pre-treatment methods of crumb rubber on strength, permeability and acid attack resistance of rubberised geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*, 41, 102448.
- Pham, T. M., Liu, J., Tran, P., Pang, V. L., Shi, F., Chen, W., ... ve Tran, T. M. (2020).** Dynamic compressive properties of lightweight rubberized geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 265, 120753.
- Pham, TM, Lim, YY ve Malekzadeh, M. (2021).** Kırıntılı kauçuğun ön işlem yöntemlerinin, kauçuklu jeopolimer betonun mukavemeti, geçirgenliği ve asit atak direncine etkisi. *Yapı Mühendisliği Dergisi*, 41, 102448.
- Presti, D. L. (2013).** Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, 49, 863-881.
- Provis, J. L., ve Van Deventer, J. S. J. (Eds.). (2009).** Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications. Elsevier.
- Raffoul, S., Garcia, R., Escolano-Margarit, D., Guadagnini, M., Hajirasouliha, I., ve Pilakoutas, K. (2017).** Behaviour of unconfined and FRP-confined rubberised concrete in axial compression. *Construction and Building Materials*, 147, 388-397.
- Rajini, B., Rao, A. N., & Sashidhar, C. (2021).** Micro-level studies of fly ash and GGBS—based geopolymer concrete using SEM and XRD. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1130, No. 1, p. 012062). IOP Publishing
- Sadaka, F., Campistrone, I., Laguerre, A., ve Pilard, J. F. (2012).** Controlled chemical degradation of natural rubber using periodic acid: Application for recycling waste tyre rubber. *Polymer Degradation and Stability*, 97(5), 816-828.
- Shi, C., Jiménez, A.F., Palomo, A. (2011).** New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 41, 750-763
- Short, N. R., Purkiss, J. A., & Guise, S. E. (2001).** Assessment of fire damaged concrete using colour image analysis. *Construction and building materials*, 15(1), 9-15.
- Siddique, R., ve Naik, T. R. (2004).** Properties of concrete containing scrap-tire rubber—an overview. *Waste management*, 24(6), 563-569.
- Singh, B., Gupta, M., Chauhan, M., ve Bhattacharyya, S. K. (2013).** Lightweight geopolymer concrete with EPS beads. In *Proc., 19th CIB world Building Congress*. Brisbane, Australia: Queensland Univ. of Technology.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., ve Bhattacharyya, S. K. (2015).** Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and building materials*, 85, 78-90.
- Tao, J. (2005).** Preliminary Study on the Water Permeability and Microstructure of Concrete Incorporating Nano-SiO<sub>2</sub>, *Cement and Concrete Research*, 35, Issue 10, 1943-1947.

- Thamilselvi, P., Siva, A., ve Oyejobi, D. (2017).** Geopolymer concrete: overview. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, 8(6), 10-14.
- Thomas, B. S., Chandra Gupta, R. (2016).** Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 113, 86–92. doi:10.1016/j.jclepro.2015.11.019
- Topal, Ö., Karakoç, M. B., ve Özcan, A. (2021).** Effects of elevated temperatures on the properties of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) based geopolymer concretes containing recycled concrete aggregate. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-15.
- TS 3526 (1980).** Beton agregalarında özgül ağırlık ve su emme oranı tayini. TSE, Ankara.
- TS 706 EN 12620+A1 (2009).** Beton agregaları. TSE, Ankara.
- TS 802 (2016).** Beton karışım tasarımı hesap esasları. TSE, Ankara.
- TS EN 12390-3/AC (2012).** Beton – Sertleşmiş beton deneyleri – Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 12390-7 (2010).** Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini, TSE, Ankara.
- TS EN 932-2 (1999).** Agregaların genel özellikleri için deneyler bölüm 2: Laboratuvar numunelerin azaltılması metodu. TSE, Ankara.
- TS EN 933-1 (2015).** Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini – Eleme yöntemi. TSE, Ankara.
- TS ISO 3310-2 (2015).** Deney elekleri – Teknik özellikler ve deneyler – Bölüm 2: Delikli metal plakalı deney elekleri. TSE, Ankara.
- Türkmen, İ., Karakoç, M. B., Kantarcı, F., Maraş, M. M., ve Demirboğa, R. (2016).** Fire resistance of geopolymer concrete produced from Elazığ ferrochrome slag. *Fire And Materials*, 40(6), 836-847
- Wongsa, A., Sata, V., Nematollahi, B., Sanjayan, J., ve Chindaprasirt, P. (2018).** Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer mortar incorporating crumb rubber. *Journal Of Cleaner Production*, 195, 1069-1080.
- Xu, H., ve Van Deventer, J. S. J. (2000).** The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal Of Mineral Processing*, 59(3), 247-266.
- Youssf, O., ve El Gawady, M. A. (2012).** An overview of sustainable concrete made with scrap rubber. *Proceedings of the ACMSM*, 22, 11-14.
- Zhang, S. L., Xin, Z. X., Zhang, Z. X., ve Kim, J. K. (2009).** Characterization of the properties of thermoplastic elastomers containing waste rubber tire powder. *Waste Management*, 29(5), 1480-1485.
- Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., ve Wang, H. (2014).** Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 56, 113-127.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Abdurrahman YOLCU

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

### Yayın Listesi:

- **Yolcu, A., Karakoç, M. B., Ekinci, E., Özcan, A., ve Sağır, M. A. (2022).** Effect of binder dosage and the use of waste rubber fiber on the mechanical and durability performance of geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*, 61, 105162.