

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

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI GEOPOLİMER HARCIN YÜKSEK
SICAKLIK ALTINDAKİ ÖZELLİKLERİNE İNCE LASTİK ATIĞININ VE
SİLİS DUMANININ ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Akif SAĞIR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

ARALIK 2022

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

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI GEOPOLİMER HARCIN YÜKSEK
SICAKLIK ALTINDAKİ ÖZELLİKLERİNE İNCE LASTİK ATIĞININ VE
SİLİS DUMANININ ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mehmet Akif SAĞIR
36193621038**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

ARALIK 2022

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmanın konusunun belirlenmesinde ve çalışmanın her aşamasında yardım, öneri ve desteğini esirgemeyerek beni yönlendiren ve bu çalışmayı bitirmemi sağlayan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ'a;

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

Çalışmamızın her aşamasında bana yardımcı olan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Enes EKİNCİ, Sayın Arş. Gör. Ahmet ÖZCAN, Sayın İnş. Müh. Abdurrahman YOLCU, Yüksek İnş. Müh. Aslıhan Nida DERİNPINAR ve laboratuvar sorumlusu Sayın İlhami BAYSAL'a

Her daim desteğini hissettirerek; ideallerim uğruna çalışma azmi aşılayıp hayatımın her aşamasında benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen Berivan ATAY'a

Ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmalarım süresince de benden her türlü desteği esirgemeyen aileme, bu çalışmayı ithafen yazdığım annem Rahime SAĞIR'a ve babam Ahmet SAĞIR'a, her zaman maddi ve manevi destekçilerim olan, aldığım her kararda arkamda olan ablalarım Seda SAĞIR'a ve Aslı SAĞIR'a ve ailemizin özel çocukları Fatih SAĞIR ile Pınar SAĞIR'a

Bu çalışmanın literatüre katkıda bulunmasını dilerim.

teşekkür ederim.

Mehmet Akif SAĞIR
İnşaat Mühendisi

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Geopolimer Harcın Yüksek Sıcaklık Altındaki Özelliklerine İnce Lastik Atığının ve Silis Dumanının 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.

Mehmet Akif SAĞIR



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR.....	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	5
2.1. Geopolimer	5
2.1.1. Geopolimer beton	6
2.1.2. Geopolimer harç	8
2.2. Yüksek Fırın Cürufu.....	10
2.3. Silis Dumanı	16
2.4. Lastik Atık	20
2.5. Yüksek Sıcaklık Etkisi	24
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	31
3.1. Materyal.....	31
3.1.1. Yüksek fırın cürufu	31
3.1.2. Silis dumanı	31
3.1.3. Doğal dere agregası	32
3.1.4. Lastik atık	33
3.1.5. Aktivatör.....	34
3.1.6. Aletler	35
3.1.6.1. Elekler	35
3.1.6.2. Beton karışım mikseri	36
3.1.6.3. Etüv	36
3.1.6.4. Basınç dayanım cihazı	37
3.1.6.5. Kalıplar.....	37
3.1.6.6. Hassas terazi.....	38
3.1.6.7. Yüksek sıcaklık fırını	38
3.1.6.8. SEM cihazı.....	39
3.2. Yöntem	39
3.2.1. Agregalara uygulanan yöntemler	40
3.2.2. Geopolimer harç karışım oranlarının belirlenmesi.....	40
3.2.3. Geopolimer harçların üretimi ve yerleştirilmesi	41
3.2.4. Sertleşmiş harç deneylerinde uygulanan yöntemler	42
3.2.4.1. Basınç dayanımı	43
3.2.4.2. Eğilme dayanımı	44

3.2.4.3.	Yarmada çekme dayanımı.....	45
3.2.4.4.	Kılcal geçirimsizlik	46
3.2.4.5.	Ağırlık kaybı	47
3.2.4.6.	Geri tepme dayanımı (Ribaunt testi).....	48
3.2.4.7.	Yüksek sıcaklık dayanımı	49
3.2.4.8.	SEM görüntü analizi	50
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	51
4.1.	Agrega Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma.....	51
4.2.	Sertleşmiş Harç Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma	51
4.2.1.	Geopolimer harç kontrol numuneleri ile ilgili bulgular ve tartışma.....	51
4.2.1.1.	Geopolimer harç kontrol numunelerinin basınç dayanımı.....	51
4.2.1.2.	Geopolimer harç kontrol numunelerinin yarmada çekme dayanımı.....	57
4.2.1.3.	Geopolimer harç kontrol numunelerinin eğilme dayanımı	60
4.2.1.4.	Geopolimer harç kontrol numunelerinin basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı arasındaki korelasyon.....	63
4.2.1.5.	Geopolimer harç kontrol numunelerinin kılcal geçirimsizliği	64
4.2.1.6.	Geopolimer harç kontrol numunelerinin geri tepme dayanımı	65
4.2.1.7.	Geopolimer harç kontrol numunelerinin görsel incelemeleri	67
4.2.2.	Yüksek sıcaklık sonrası geopolimer harç numuneleri ile ilgili bulgular ve tartışma.....	68
4.2.2.1.	Yüksek sıcaklık sonrası geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı ...	68
4.2.2.2.	Yüksek sıcaklık sonrası geopolimer harç numunelerin ağırlık kaybı	73
4.2.2.3.	Yüksek sıcaklık sonrası geopolimer harç numunelerin kılcal geçirimsizliği	75
4.2.2.4.	Yüksek sıcaklık sonrası geopolimer harç numunelerin geri tepme dayanımı	83
4.2.2.5.	Yüksek sıcaklık sonrası geopolimer harç numunelerin görsel analizi	85
4.2.3.	Mikro yapı analizi	87
5.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	90
6.	KAYNAKLAR	92
	ÖZGEÇMİŞ.....	101

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 : Silis dumanının kimyasal kompozisyonu	17
Çizelge 3.1 : Yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu.....	31
Çizelge 3.2 : Silis dumanının kimyasal kompozisyonu	32
Çizelge 3.3 : Lastik atık bileşimi	34
Çizelge 3.4 : Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri	35
Çizelge 3.5 : Üretilen geopolimer harç kodları.....	41
Çizelge 3.6 : Geopolimer harç karışımlarında kullanılan malzeme miktarları (kg/m ³).....	41
Çizelge 4.1 : Agreganın özgül ağırlık ve su emme değerleri.....	51
Çizelge 4.2 : Geopolimer harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı.....	52
Çizelge 4.3 : Geopolimer harç numunelerinin yarmada çekme dayanımları.....	58
Çizelge 4.4 : Geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımları	60
Çizelge 4.5 : Geopolimer harç numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı	64
Çizelge 4.6 : Geopolimer harç numunelerin geri tepme dayanımı	66
Çizelge 4.7 : Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası numunelerin basınç dayanımı	69
Çizelge 4.8 : Yüksek sıcaklık sonrası geopolimer harç numunelerin ağırlık kaybı.....	73
Çizelge 4.9 : Oda Koşulları ve 250 °C’de geopolimer numunelerin kılcal geçirimsizliği	76
Çizelge 4.10 : 500 °C ve 750 °C’de geopolimer numunelerin kılcal geçirimsizliği.....	77
Çizelge 4.11 : Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası numunelerinin geri tepme dayanımı	84

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 : Geopolimer betonun yapısal modelleri (Davidovits, 2011)	6
Şekil 2.2 : Geopolimer betonun bileşenleri (Chowdhury vd., 2021).....	7
Şekil 2.3 : Yüksek fırın cürufunun üretim şeması (Engin, 2015).....	11
Şekil 2.4 : Granülasyon yönteminin tasviri (Tokyay ve Erdoğan, 2009).....	12
Şekil 2.5 : Peletleme yönteminin tasviri (Tokyay ve Erdoğan, 2009).....	13
Şekil 2.6 : Silis dumanının üretim şeması.....	17
Şekil 2.7 : Silis dumanının arayüze etkisi (Khayat, 1992).....	18
Şekil 2.8 : Araç lastiğinin yapısı (Konlas Otomotiv Lastik Sanayi, 2022).....	20
Şekil 2.9 : Lastik atığının depolanması ve yakılması	21
Şekil 2.10 : Sıcaklık ile basınç dayanımı arasındaki ilişki (Baradan vd., 2002).....	26
Şekil 3.1 : Yüksek fırın cürufu.....	31
Şekil 3.2 : Silis dumanı	32
Şekil 3.3: İnce (0-4 mm) agrega	33
Şekil 3.4 : İnce (0-4 mm) lastik atık	33
Şekil 3.5 : İnce (0-4 mm) lastik atık gradasyon eğrisi	34
Şekil 3.6 : Sodyum hidroksit (NaOH).....	35
Şekil 3.7 : Sarsma tablası ve elekler	36
Şekil 3.8 : Beton karışım mikseri.....	36
Şekil 3.9 : Etüv.....	37
Şekil 3.10 : Basınç dayanım cihazı	37
Şekil 3.11 : Deneylerde kullanılan kalıplar.....	38
Şekil 3.12 : Hassas terazi	38
Şekil 3.13 : Yüksek sıcaklık fırını.....	39
Şekil 3.14 : SEM cihazı	39
Şekil 3.15 : Kalıplara yerleştirilen bir grup geopolimer numune	42
Şekil 3.16 : Deneye tabi tutulan numune ve numunenin kırılma yüzeyleri.....	44
Şekil 3.17 : Eğilme dayanımı deney düzeneği.....	45
Şekil 3.18 : Yarmada çekme deney düzeneği	46
Şekil 3.19 : Kılcal geçirimsizlik deneyi sırasında numuneler	47
Şekil 3.20 : Geri tepme dayanımı deneyi düzeneği	49
Şekil 3.21 : Yüksek sıcaklık fırınında numuneler.....	50
Şekil 3.22 : SEM görüntü analiz cihazı	50
Şekil 4.1 : Numunelerin 28 günlük basınç dayanımı	52
Şekil 4.2 : Geopolimer numunelerin 28 günlük yarmada çekme dayanımları	58
Şekil 4.3 : Geopolimer numunelerin eğilme dayanımları	61
Şekil 4.4 : Basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı arasındaki korelasyon	63
Şekil 4.5 : Numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı.....	65
Şekil 4.6 : Numunelerin geri tepme dayanımı	66
Şekil 4.7 : Kontrol numunelerinin görsel analizi	67

Şekil 4.8 : Kontrol numunelerin eğilme dayanımı testi	68
Şekil 4.9 : Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası numunelerin basınç dayanımı	70
Şekil 4.10 : Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin ağırlık kaybı	74
Şekil 4.11 : 5 dakikalık ölçüm için, 12 farklı geopolimer karışım tipinin sıcaklığa bağlı kılcal geçirimsizlik katsayı değişimi	78
Şekil 4.12 : 15 dakikalık ölçüm için, 12 farklı geopolimer karışım tipinin sıcaklığa bağlı kılcal geçirimsizlik katsayı değişimi	79
Şekil 4.13 : 30 dakikalık ölçüm için, 12 farklı geopolimer karışım tipinin sıcaklığa bağlı kılcal geçirimsizlik katsayı değişimi	80
Şekil 4.14 : 60 dakikalık ölçüm için, 12 farklı geopolimer karışım tipinin sıcaklığa bağlı kılcal geçirimsizlik katsayı değişimi	81
Şekil 4.15 : 1440 dakikalık ölçüm için, 12 farklı geopolimer karışım tipinin sıcaklığa bağlı kılcal geçirimsizlik katsayı değişimi	82
Şekil 4.16 : Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası geopolimer numunelerin geri tepme dayanımı	84
Şekil 4.17 : 250 °C'ye maruz kalan numunelerin görsel analizi	85
Şekil 4.18 : 500 °C'ye maruz kalan numunelerin görsel analizi	86
Şekil 4.19 : 750 °C'ye maruz kalan numunelerin görsel analizi	86
Şekil 4.20 : Yüksek sıcaklıkta numunelerin SEM görüntüleri	88
Şekil 4.21 : a) Geopolimer ile LA arasındaki ara yüzey (S100-SF0-W5) b) Geopolimer ile LA arasındaki ara yüzey (S95-SF5-W15) c) Örnek mikroyapıdaki LA'nın EDS görüntüsü (S100-SF0-W5)	89

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

Al	: Alüminyum
CH	: Kalsiyum Hidroksit
CO	: Karbon Monoksit
CO₂	: Karbondioksit
CSH	: Kalsiyum-Silikat-Hidrat
Fe₂O₃	: Demir Oksit
K₂SiO₃	: Potasyum Silikat
KOH	: Potasyum Hidroksit
LA	: Lastik Atık
MgO	: Magnezyum Oksit
MgSO₄	: Magnezyum Sülfat
Na₂O	: Sodyum Oksit
Na₂SiO₃	: Sodyum Silikat
Na₂SO₄	: Sodyum Sülfat
NaOH	: Sodyum Hidroksit
PÇ	: Portland Çimentosu
SD	: Silis Dumanı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	: Silisyum
SiO₂	: Silisyum Dioksit
TS	: Türk Standartları
UK	: Uçucu Kül
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI GEOPOLİMER HARCIN YÜKSEK SICAKLIK ALTINDAKİ ÖZELLİKLERİNE İNCE LASTİK ATIĞININ VE SİLİS DUMANININ ETKİSİ

Mehmet Akif SAĞIR

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

101+x sayfa

2022

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

Bu tez çalışmasında yüksek fırın cüruf esaslı geopolimer harçların yüksek sıcaklığa dayanıklılığı araştırılmış ve yüksek sıcaklık etkisi altında geopolimer harcın dayanımına silis dumanı (SD) ve atık lastiğin (LA) etkisi incelenmiştir. 12 Mol NaOH çözeltisi kullanılarak aktive edilen cüruf bazlı geopolimer harçlarda, cüruf yerine ağırlıkça %5 ve %10 SD kullanılmıştır. İnce agrega yerine hacimce %0, %5, %10 ve %15 LA kullanılmıştır. Kürlenme süresini tamamlayan numuneler 1 saat süresince 250, 500 ve 750 °C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra mekanik (basınç, eğilme ve yarma çekme dayanımları ve darbe dayanımı), fiziksel (ağırlık değişimi ve emicilik) ve mikro yapı özellikleri incelenmiştir. SD ikamesi arttıkça numunelerin mekanik ve fiziksel özellikleri artarken, LA ikamesi ile numunelerin mekanik ve fiziksel özellikleri azalmıştır. SD ikamesi numunelerin yüksek sıcaklığa dayanıklılığı üzerinde olumlu etkiye sahipken, LA ikamesi olumsuz etkiye sahiptir. Bu çalışmanın, harç üretiminde kullanılan geopolimerde bağlayıcı olarak endüstriyel atıkların kullanılması ve agrega olarak lastik atıklarının kullanılmasının hem çevre kirliliğinin önlenmesi hem de bu malzemelerin geri dönüşümünün sağlanması açısından literatüre katkı sağladığı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek fırın cürufu, geopolimer harç, yüksek sıcaklık, silis dumanı, lastik atık.

ABSTRACT

Master Thesis

EFFECT OF SILICA FUME AND WASTE RUBBER ON THE PERFORMANCE OF SLAG BASED GEOPOLYMER MORTARS UNDER HIGH TEMPERATURES

Mehmet Akif SAĞIR

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

101+x paper

2022

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

In this study, the high temperature resistance of slag based geopolymer mortars was investigated and the effect of silica fume (SF) and waste rubber (WR) on this resistance was determined. In slag based geopolymer mortars activated using 12M NaOH solution, 0, 5 and 10% by weight SF was substituted for slag. 0, 5, 10 and 15% WR by volume was substituted for fine aggregate. After the samples that completed their curing period were exposed to temperatures of 250, 500 and 750 °C for 1 hour, the mechanical (compressive, flexural and splitting tensile strengths and impact resistance), physical (weight change and sorptivity) and microstructure (scanning electron microscopy (SEM)) properties of the samples were examined. As the SF substitution increased, the mechanical and physical properties of the samples increased, while the mechanical and physical properties of the samples decreased with the WR substitution. While the SF substitution had a positive effect on the high temperature resistance of the samples, the WR substitution had negative effect. It is thought that the choice of geopolymer binder as a binder in mortars and the use of waste tires as aggregate contribute to the literature in terms of both preventing environmental pollution and ensuring the recycling of these materials.

Keywords: Slag, geopolymer mortar, high temperature resistance, silica fume, waste rubber

1. GİRİŞ

Beton; elde edinme kolaylığı, uygun fiyatı ve yüksek dayanım ve dayanıklılık özellikleri nedeniyle dünyada en çok üretilen yapı malzemesi ürünlerinin başında gelmektedir. Mekanik ve fiziksel elverişliliğinin yanısıra kolay şekil verilebilir olması ve istenilen sürede sertleşip dayanım kazanması özelliği de betonu en yaygın yapı malzemesi yapmaktadır (İmtiaz vd., 2020).

Ancak geleneksel beton üretiminde kullanılan Portland çimentosunun (PÇ) üretim sürecinde büyük miktarda enerji gereksinimi vardır. Bu işlem sırasında ise atmosfere büyük miktarda karbondioksit (CO₂) salınımı gerçekleşir. Gerçekleşen bu CO₂ salınımı ise hava, toprak ve suda kirliliğe neden olur. Yapılan araştırmalara göre 1 ton çimento üretimi için 1,7 ton ham madde gerekmektedir. Bu üretimin sonunda ise atmosfere 0,8 ton CO₂ salınımı gerçekleşmektedir. Gerçekleşen bu CO₂ salınımı dünya çapında yapılan üretim bazında düşünüldüğünde; dünyadaki toplam CO₂ salınımının %7-8'i çimento üretiminden kaynaklanmaktadır (Manikandan ve Vasugi, 2021; Pacheco-Torgal, 2015).

Dünya üzerinde insan kaynaklı yüksek CO₂ salınımına ek olarak (endüstriyel talep ve üretim dalgalanmalarına bağlı olarak değişmekle birlikte) yıllık 3,5 milyar tonluk çimento üretimi beraberinde getirdiği CO₂ salınımı ile birlikte çevresel olarak tehdit oluşturmaktadır. Geleneksel beton üretiminde kullanılan PÇ'nin yaygınlığı ve yüksek miktarda CO₂ salınımı; dünyanın karşı karşıya kaldığı küresel ısınmayı tetiklemekte ve bu tehlike karşısında bilim insanları alternatif olarak daha güvenilir ve çevre dostu bir bağlayıcı madde kullanımı hakkında araştırmalar yapmaktadır (Doğan vd., 2019).

Yapılan bu araştırmalar sonucu portland çimentosuna bir alternatif olarak geopolimer beton geliştirilmiştir. İnorganik molekül ağları ile karakterize edilen geniş bir malzeme yelpazesinin temsili için; ilk defa 1978 yılında Davidovits tarafından "geopolimer" terimi kullanılmıştır. (Davidovits, 2015). Geopolimerler, bir silisyum (Si) ve Alüminyum (Al) kaynağı sağlamak için metakaolinit gibi termal olarak aktifleştirilmiş doğal malzemelere veya uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC) veya silis dumanı (SD) gibi endüstriyel yan ürünlere ihtiyaç duyarlar. Bağlayıcı malzeme içerisinde bulunan silisyum ve alüminyum, alkali aktivatör çözelti içinde çözülür ve moleküler zincirlere polimerize olarak bağlayıcılık özelliği kazanır. (Aleem ve Arumairaj, 2012)

Geopolimer beton üretiminde kullanılan bağlayıcılardan biri YFC'dir ve çelik sanayisinde üretim esnasında meydana gelen bir atık malzemedir. Çelik üretimi esnasında 1 tonluk üretimde %25 oranında YFC atık üretimi meydana gelir. Ülkemizde sadece Ereğli Demir Çelik fabrikası içerisinde üretilen çelik ile bir yılda ortalama 600.000 ton YFC meydana gelmektedir. Üretilen bu atık malzeme puzolanik özelliğinden dolayı başta inşaat sektörü olmak üzere bir çok sektöre satılmaktadır (Bilgen vd., 2010).

YFC inşaat sektöründe; beton agregasında, briket ve tuğla üretiminde, yalıtım malzemelerinin üretiminde, tarım ve çevre uygulamalarında, blokların ve prefabrik elemanların yapımında veya puzolanik malzeme olarak birçok alanda kullanılır (Erdoğan, 1993).

YFC'nin beton üretimine birçok olumlu etkisi vardır, bunlardan bazılarını sıralayacak olursak:

1. İşlenebilirliğe katkı sağlar.
2. Betonda sertleşme yani priz süresini uzatır.
3. Betonda meydana gelen terlemeleri azaltır.
4. Kimyasal reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan hidrasyon ısısını azaltır.
5. Betondaki su geçirimsizliğini bariz şekilde azaltır.

Sayıdığımız olumlu etkiler göz önüne alınarak yapılan araştırmalar YFC'nin alkali solüsyonlar ile aktifleştirilerek betonda dayanım kazanımını sağladığını ve çimentonun yerine geopolimer beton üretiminde kullanılabileceğini göstermiştir (Erdoğan, 1995).

Geopolimer beton üretiminde YFC'nin yanı sıra kullanılan bir diğer puzolanik malzeme ise SD veya diğer adı ile silika dumanıdır. Ark fırınlarında silisyum veya ferrosilisyum alaşımlarının üretimi sırasında meydana gelen bir atık olan SD çok ince bir malzemedir. SD, geleneksel PC'ye göre 100 kat daha küçük olup ortalama 0,1 ile 0,2 µm parçacık çapına sahiptir. %85 ile %98 arasında değişen Silisyumdioksit (SiO₂) içeriği bakımından da oldukça zengin olan SD; kullanıldığı karışımlarda yüksek mukavemet değerlerine ulaşım olanağı sağlamıştır. Sadece mukavemet artışı değil ayrıca titreşim sönümlenme kapasitesinde, süneklikte, ses emiliminde, aşınma direncinde, hava boşluğu içeriğinde ve aderans değerlerinde, kimyasal saldırı direncinde, çeliğin korozyon direncinde ve işlenebilirliğinde de olumlu katkılar sağlamıştır (D. L. Chung, 2002).

Yapılan deneyler sonucu dayanım kazanmış geopolimer betonların mekanik olarak yüksek dayanım ve dayanıklılık özelliklerine sahip olduğu saptanmıştır. Yüksek sıcaklık dayanımı,

donma ve çözülme direncinin yanı sıra PÇ'ye göre üretiminde altı kat daha az enerji gereksinimi ve dokuz kat daha az CO₂ salınımına sahip olduğu görülmüştür (Luhar vd., 2015).

Dünyada ve ülkemizde ulaşım ihtiyacının artışına bağlı olarak taşıt sayısında da artış meydana gelmiştir. Bu artışa bağlı olarak taşıt tekerleklerinde kullanılan lastik üretiminde de artış meydana gelmiştir. Bu artış yanında lastik atık sorununu doğurmuştur. Lastik atık üretimi sadece ülkemizde değil dünyada da büyük bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Lastik atığı (LA) geri dönüşüm için kullanımında veya depolanmasında büyük zorluklara sebep olmaktadır. (Yeşilata vd., 2008).

Ulaşımında %95 oranında karayolunun kullanıldığı ülkemizde, taşıtlardan elde edilen LA'nın büyük bir kısmı yasadışı yollar ile çöplüklere, denize veya nehirlere atılmaktadır. LA'nın çok az bir kısmı ise çimento üretiminde veya tuğla pişirme işlemlerinde yakıt olarak kullanılmaktadır. Fakat bu uygulamalarda ise açığa çıkan zararlı gazların filtrelenmesi için kullanılan baca sistemleri maliyetleri arttırmakta ve baca filtrelerinin ömrünü kısaltmaktadır. Yakıt olarak kullanımı maliyeti arttırması sebebi ile LA'lar genellikle doğaya atılmakta veya belirlenmiş alanlarda yakılmaktadır ve bu işlemler çevreye ciddi zararlar vermektedir (Ünal, 2006).

LA'nın depolanma maliyetleri veya yakılması sonucu çevreye verdiği zararlar göz önünde bulundurulduğu zaman, yeni kullanım alanları meydana getirme gereği doğmuştur. Bu doğrultuda LA'ların betonda agrega olarak kullanılması fikri ortaya çıkmıştır. Lastik ile betonun; birbirlerinin zayıf yönlerini gidererek mükemmel bir kompozit malzeme oluşturabileceği fikri oluşmuştur. Ayrıca LA ikameli beton fikri, betonda ses yalıtımı ve daha elastik bir beton özelliği kazandırmaya yöneliktir (Hirsch, 1962).

Beton üretiminde agrega yerine kullanılacak olan LA, düşük yoğunluğa sahip olması sayesinde mevcut beton üretiminde elde edilen malzemenin de yoğunluğunu düşürmektedir. Bu sayede meydana gelen yapıda bulunan mevcut ölü yükün azaltılması olanağını sağlamıştır. Ayrıca deprem riskinin bulunduğu bölgelerde inşa edilen yapılarda, yer hareketleri sonucu meydana gelebilecek zararları azaltmakta ve betona süneklik özelliği katmaktadır (Hansen, 1965).

Yapısı itibari ile sünek bir malzeme olan lastiğin beton içerisinde kullanılması ile betona katacağı özellikler hakkında bilim adamları araştırmalar yapmışlardır. Yapılan bu araştırmalar sonucu beton içerisinde kullanılan LA'nın betonun sünekliğine katkı sağladığı ve tokluk değeri yüksek, enerji yutabilme kabiliyeti daha yüksek bir beton elde edildiği görülmüştür. Alınan bu

neticeler sonunda beton içerisinde LA ikamesi son yıllarda yaygınlaşmıştır (Turgut ve Yeşilata, 2009).

Yapılan literatür incelemeleri ve elde edilen bilgiler ışığında bu tez çalışmasında tamamıyla çevre dostu bir beton üretimi hedeflenmiştir. Beton üretiminde ki temel bileşenler; agrega ve bağlayıcı olmak üzere iki grupta özetlenebilir. Çalışma da agrega olarak lastik atıklarına kullanım alanı kazandırmak amacıyla, kısmi lastik agrega ikamesi içeren harç üretimi yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında, harç içerisinde LA kullanımını potansiyeline dikkat çekerek literatüre katkı sağlamak hedeflenmiştir. Ayrıca bağlayıcı olarak YFC ve SD kullanılmıştır. Bu sayede üretilen geopolimer harç, bileşenleri ile tamamen geri dönüştürülmüş, çevreci bir harç olmuştur.

Bu kapsamda, laboratuvar numunelerinde agrega da dere kumu agregasına %0, %5, %10, %15 oranlarında lastik agrega ikamesi yapılmıştır. Bağlayıcı olarak ise üç grup olmak üzere ağırlıkça birinci grupta %100 YFC, ikinci grupta %95 YFC ile %5 SD ve üçüncü grupta ise %90 YFC ile %10 SD kullanılarak üretilmiştir. Agrega ve bağlayıcı değişim oranları kombinasyonu sonucunda 12 grup deney numunesi üretilmiştir. Üretilen bu numunelerde, YFC'nin ve SD'nin aktivasyonunu sağlamak amacıyla alkali çözelti kullanılmıştır. Alkali çözelti, 12 Mol Sodyum Hidroksit (NaOH) çözeltisi kullanılmıştır. Harç karışım oranları bağlayıcı madde:alkali çözeltisi:kum oranları 1:0.45:3 olacak şekilde karışım hazırlanmıştır.

Üretilen bu numunelerin; basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, geri tepme dayanımı (Ribaunt testi) ve kılcal geçirgenliği tespit edilmiştir. Ardından aynı ortam, koşul ve parametrelerde üretilmiş geopolimer harç numuneleri 250 °C, 500 °C ve 750 °C'de yüksek sıcaklık fırınında bir saat boyunca bekletilmiştir. Numuneler oda sıcaklığına ulaştıktan sonra, basınç dayanımı, geri tepme dayanımı (Ribaunt testi) ve kılcal geçirgenliği değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen bu değerler, aynı parametrelerde üretilmiş olan ve oda koşullarında kür yapılan harç numuneler ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce ve yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra kırılan bu harç numunelerinden parçalar alınmış ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü elde edilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Geopolimer

İnşaat sektöründe en çok kullanılan yapı malzemesi betondur. Betonun temel özelliği; bağlayıcısı olan PÇ ile agrega yüzeyleri arasında meydana gelen C-S-H jelleri sayesinde oluşan sıkı kimyasal bağlar ile malzemeye yüksek mukavemet değerleri kazandırmasıdır. Ancak günümüzde geleneksel betona alternatif olarak geopolimer beton kavramı ön plana çıkmıştır. Tarihte ilk defa Fransız Profesör Davidovits tarafından kullanılan geopolimer terimi bilim dünyasında kısa sürede popüler olmuş ve kullanılmaya başlanmıştır. Geopolimer terimi, inorganik moleküler zincirini veya ağlarını karakterize etmek için kullanılmıştır ve geniş bir malzeme yelpazesini temsil etmektedir (Davidovits, 2015).

Geleneksel beton üretiminde temel olarak PÇ bağlayıcı malzemesi vardır ve dolayısıyla PÇ'ye talep çoktur. Ancak PÇ'nin üretimi aşamasında doğal mineral kaynağı olarak kullanılan kömür gerekmektedir. Kömürün yüksek sıcaklıklarda yakılması ile elde edilen enerji kullanılmaktadır ve bu enerji beraberinde yüksek miktarda CO₂ salınımı meydana getirmektedir. PÇ fabrikalarından yayılan CO₂, dünyayı ısıtmakta ve havayı kirletmektedir. Bu bağlamda düşünüldüğünde PÇ kullanımı, üretimi açısından çevreci olmayan bir bağlayıcı malzemedir. Bu konuda çalışmalar yapan araştırmacılar, bilim insanları ve mühendisler; daha çevreci, kullanıcı ve doğa dostu, üretimi daha ekonomik malzemeler aramakta ve alternatifler üretmektedir. Bu noktada geopolimer yapı malzemeleri tüm bu çıkmazlara karşı bir cevap olmaktadır (Thokchom, 2010) .

Geopolimerler, çeşitli alüminosilikat minerallerinin farklı alkali çözeltilerle aktive edilmesiyle yapılan inorganik alüminosilikat polimerleridir. Geopolimer malzemeler amorf bir mikro yapıya ve doğal zeolitik malzemelere benzer kimyasal bileşenlere sahiptir. Alkali çözeltisi ile alüminosilikat içeren kaynak bağlayıcı malzeme arasındaki kimyasal reaksiyona polimerizasyon işlemi denir (Ahmed vd., 2021) . Geopolimer, son zamanlarda ekonomik olarak sürdürülebilir bir özelliğe sahip en modern bağlayıcı olarak ortaya çıkmıştır. Düşük karbon ayak izine sahiptir ve sıradan PÇ'ye göre %60 daha az enerji tüketimine neden olur. Geopolimer üretimi, metakaolin, UK, YFC ve SD vb. içerir (Luhar vd., 2021).

Geopolimer üretimi için olası kaynaklar arasında amorf formda bulunan çoğunlukla silis (Si) ve alüminyum (Al) içeriğine sahip malzemeler başta gelir. Geçmişte bazı sanayi yan ürünleri ve mineral malzemeler araştırılmıştır. Kalsine edilmemiş malzemelere kıyasla YFC ve SD gibi kaynak malzemelerinin daha yüksek basınç dayanımı gösterdikleri belirlenmiştir. Çeşitli yan

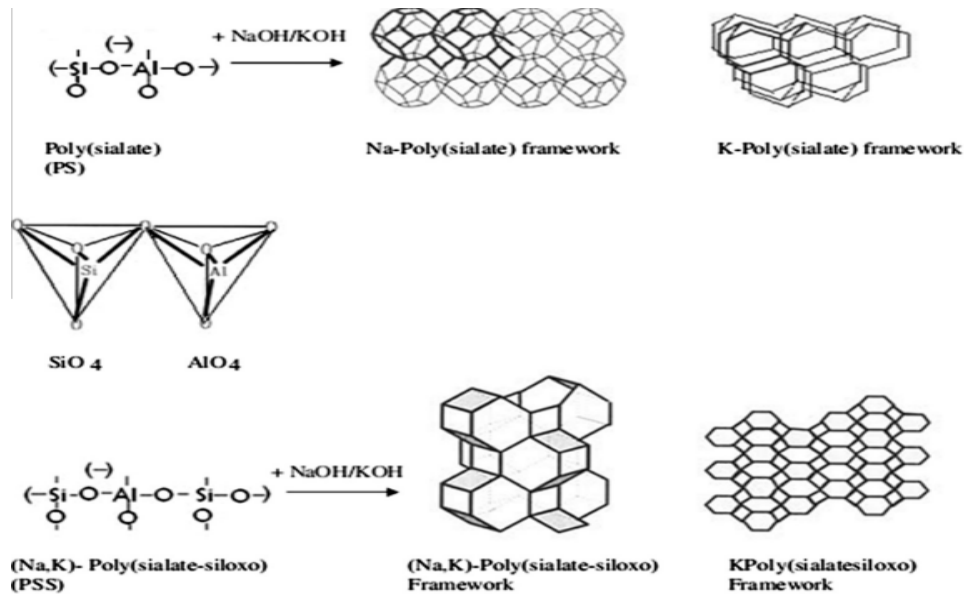
ürünlere kıyasla YFC ve SD, geopolimer betonun geliştirilmesi açısından potansiyeli yüksek malzemeler olduğu kanıtlanmıştır (Xu ve Van Deventer, 2000; Barbosa vd., 2000).

2.1.1. Geopolimer beton

İnşaat sektörü, her ekonominin ayrılmaz parçasıdır ve bizim ülkemizde milli gelire katkı sağlayan önemli bir sektördür. İnşaat sektörünün başlıca yapı malzemesi ise geleneksel portland çimentosudur ve portland çimentosu kullanımı çevreye önemli miktarda sera gazı salınımindan sorumludur (Wilkinson vd., 2016).

Son zamanlarda özellikle gelişmekte olan ülkelerde artan kentleşme, çimento üretiminin çevre üzerindeki zararlı etkisini daha da artırmıştır. Bu nedenle çevrenin sürdürülebilirliğinin sağlanması için inşaat sektöründe yapılarda çimento yerine alternatif ve doğa dostu malzemeler kullanılmalıdır ve bu arayış bilim insanlarını geopolimer beton kullanımına yönlendirmiştir (Alaloul vd., 2020).

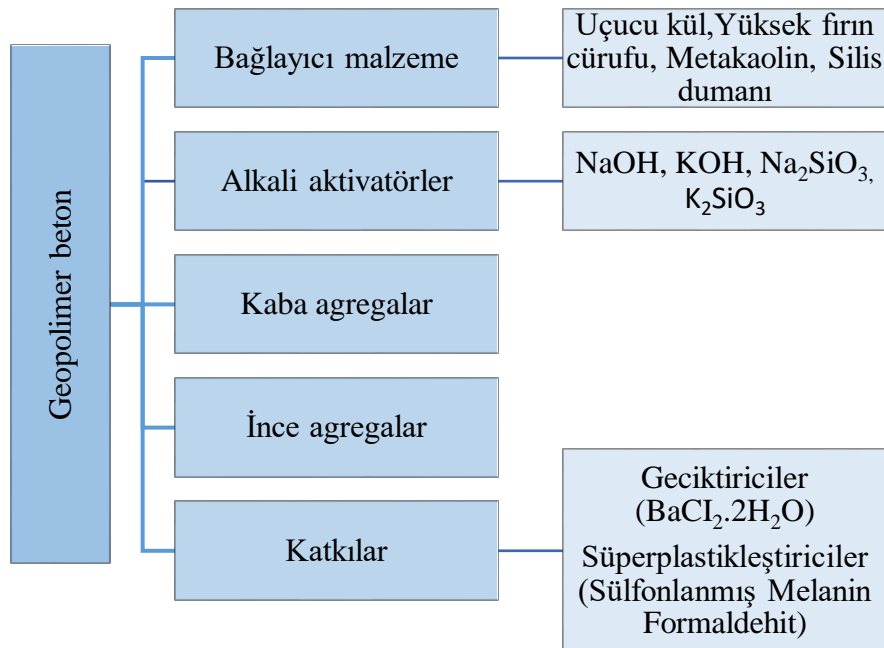
İlk olarak 1978 yılında Joseph Davidovits tarafından kullanılan geopolimer terimi yıllar içerisinde beğenilirliğini artırmıştır. Beton üretiminde çimentonun tamamen ikamesine imkan veren malzeme olarak geopolimer beton umut verici bir alternatif olarak görülmüştür. Geopolimer betonun bağlayıcı bileşimi, alüminosilikat öncülerinden ve alkali aktivatörlerden oluşur (Kaze vd., 2021; Hassan vd., 2019)



Şekil 2.1 : Geopolimer betonun yapısal modelleri (Davidovits, 2011)

Kaolinit, feldispat gibi alüminosilikat malzemelerin varyasyonu ve UK, SD ve YFC gibi endüstriyel katı atıklar geopolimerlerin üretiminde alüminosilikat öncüleri olarak kullanılmıştır. Bu alüminosilikat malzemelerin reaksiyonu incelik, mineroloji vb. kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. Geopolimer sistemlerinde kullanılan geleneksel alkali aktivatörler sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve potasyumsilikat (K_2SiO_3)'tür. Sodyumhidroksit ile karşılaştırıldığında potasyumhidroksit daha yüksek bir alkalilik derecesi sergilemiştir ancak sodyum hidroksitin alüminosilikat öncülerindeki silikat ve alüminat monomerlerini çözmek için daha yüksek verim elde ettiği gözlemlenmiştir. (Duxson vd., 2007)

Alüminosilikat öncüleri geopolimerin kritik bileşenleridir. Alüminosilikatlar ya suyla reaksiyona girmezler ya da bunu çok yavaş yaparlar. Bununla birlikte bu malzemeler alkali bir ortama bırakıldıklarında yüksek bir amorf içeriğe sahip olmaları koşuluyla, yoğunlaşarak yük taşıma kapasitesi geliştirebilen yeni organik polimerler oluşturacaklardır. Böylece öncülerin kimyasal bileşimleri geopolimerizasyonda kritik bir rol oynar. Geopolimerlerde kullanılan öncüler tipik yüksek miktarda silikat ve alüminattan oluşur ve bunlar sertleşen bir jel oluşturmak üzere alkali/asidik bir ortamın mevcudiyetinde çözülür. Monomerlerin (yani silikat ve alüminat) çözünme hızını etkileyeceğinden öncülerin parçacık boyutları da önemlidir. PÇ olmadan güçlü bazlar eklenerek alüminosilikatlar aktive edilebilir (Almutairi vd., 2021). Geopolimer betonun bileşenleri Şekil 2.2'de görülmektedir.



Şekil 2.2 : Geopolimer betonun bileşenleri (Chowdhury vd., 2021)

2.1.2. Geopolimer harç

Geopolimer harçlarda geopolimer betondan farklı olarak Şekil 2.2’de verilen bileşenlerde agrega olarak kaba agregalar kullanılmamaktadır. Agrega olarak sadece ince agregalar kullanılmaktadır. Yapılan literatür araştırmaları sonucu elde edilen geopolimer harç numunelerine ait makaleler aşağıda sıralanmıştır.

Budh ve Warhade (2014) yaptıkları çalışmada geopolimer harç üretimi gerçekleştirmişlerdir. Üretilen geopolimer harçlar UK esaslı olarak ve doğal dere kumu kullanılarak üretilmiştir. Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0,50 olarak alınmıştır. Kum/UK oranı ise 1,0 alınmıştır. NaOH molaritesinin değişiminin, geopolimer harcın basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmak üzere 8, 10, 12 ve 14 mol NaOH kullanılmıştır. Belirlenen parametreler sonucu üretilen geopolimer harç numunelerinin basınç dayanım değerleri tayin edilmiştir. 8 mol NaOH kullanılan grubun basınç dayanım değeri 14,34 MPa iken bu değer 10 mol NaOH için 19,67 Mpa; 12 mol NaOH için 22,00 MPa ve 14 mol NaOH için 24,67 MPa olarak ölçülmüştür. NaOH molaritesi arttıkça üretilen numunelerin basınç dayanımlarında yükselme meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Hadi vd., (2018) yaptıkları çalışmada geopolimer harç üretmişlerdir. Üretilen geopolimer harçlar UK esaslı olarak ve doğal dere kumu kullanılarak üretilmiştir. Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0,4 – 0,5 – 0,6 ve 0,7 oranlarında kullanılmıştır. NaOH ise 12, 14 ve 16 mol olmak üzere üç farklı molaritede kullanılmıştır. Belirlenen parametreler sonucu üretilen geopolimer harç numunelerinin basınç dayanım değerleri tayin edilmiştir. Kullanılan 12 mol NaOH alkali çözeltisi için en düşük basınç dayanım değeri 0,4 alkali aktivatör/bağlayıcı oranına sahip karışımda (11,0 MPa) elde edilirken en yüksek dayanım değeri ise 0,6 alkali aktivatör/bağlayıcı oranına sahip karışımda (32,1 MPa) elde edilmiştir. 14 mol NaOH alkali çözeltisi için en düşük basınç dayanım değeri 0,4 alkali aktivatör/bağlayıcı oranına sahip karışımda (16,0 MPa) elde edilirken en yüksek dayanım değeri ise 0,6 alkali aktivatör/bağlayıcı oranına sahip karışımda (35,2 MPa) elde edilmiştir. 16 mol NaOH alkali çözeltisi için en düşük basınç dayanım değeri 0,4 alkali aktivatör/bağlayıcı oranına sahip karışımda (20,2 MPa) elde edilirken en yüksek dayanım değeri ise 0,6 alkali aktivatör/bağlayıcı oranına sahip karışımda (36,0 MPa) elde edilmiştir. Deneyler sonucunda alkali aktivatör/bağlayıcı oranı arttıkça basınç dayanımında artış gözlenmiştir. Optimum basınç dayanımı değerine ise alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0,6 değerinde ulaşılmıştır. Sonraki artışlarda basınç dayanım değerlerinde azalış gözlemlenmiştir. Ayrıca NaOH molaritesinde artış meydana geldikçe basınç dayanım değerlerinde düzenli artış

gözlemlenmiştir. En yüksek basınç dayanım değeri, en yüksek NaOH molaritesine sahip çözeltide (36,0 MPa) elde edilmiştir. Çalışmalar sonucu optimum alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0,6 olarak belirlenmiş, NaOH molaritesi ise 14 mol olarak belirlenmiştir.

Chithambaram vd., (2019) yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer harç üretmişlerdir. Üretilen geopolimer harç numunelerinde agrega olarak dere kumu kullanılmıştır. UK/agrega oranı 1/3 olarak kullanılmıştır. Üretilen numuneler için bağlayıcı olarak kullanılan UK, %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında granüle YFC ile ikame edilmiştir. NaOH molaritesi ise 8, 10, 12 ve 14 mol olarak kullanılmıştır. Üretilen geopolimer harç numuneleri 35, 60, 70, 80, 90 ve 100 °C'de kür işlemine tâbi tutulmuş ve kür süreleri 3, 7 ve 28 gün olarak belirlenmiştir. Deneyler sonucunda numunelerin basınç dayanım değerleri tayin edilmiştir. Kür işlemleri sonucunda en yüksek basınç dayanım değerlerine 90 °C'de ulaşıldığı gözlemlenmiştir. 90 °C'ye kadar düzenli artan basınç dayanım değerlerinde 100 °C'ye geldiğinde düşüş gözlemlenmiş ve optimum ısı kür derecesi 90 °C olarak belirlenmiştir. 90 °C ısı kür uygulanmış numunelerin 28 günlük basınç dayanım değerleri incelendiği zaman, en yüksek basınç dayanım değeri 51,2 MPa ile 12 mol NaOH alkali aktivatör kullanılarak elde edilmiştir. 12 mol NaOH değerinde en yüksek basınç dayanım değeri elde edilmiş olup; 8, 10 ve 12 mol NaOH değerlerinde basınç dayanım değerleri düzenli olarak artmış ve 14 mol NaOH kullanımı ile basınç dayanım değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Optimum NaOH molaritesi 12 mol olarak belirlenmiştir. 90 °C ısı kür uygulanmış 12 mol NaOH alkali aktivatörü kullanılan numunelerin 28 günlük basınç dayanım değerleri incelendiği zaman; %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında granüle YFC ikamesi ile üretilen numunelerde en yüksek basınç dayanım değerlerine %30 granüle YFC ikamesinde 58,9 MPa değer ile ulaşılmış olup bu değerden sonra basınç dayanım değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda ısı kür için optimum sıcaklık 90 °C, optimum alkali aktivatör molaritesi 12 mol ve optimum granüle YFC ikamesi %30 olarak belirlenmiştir.

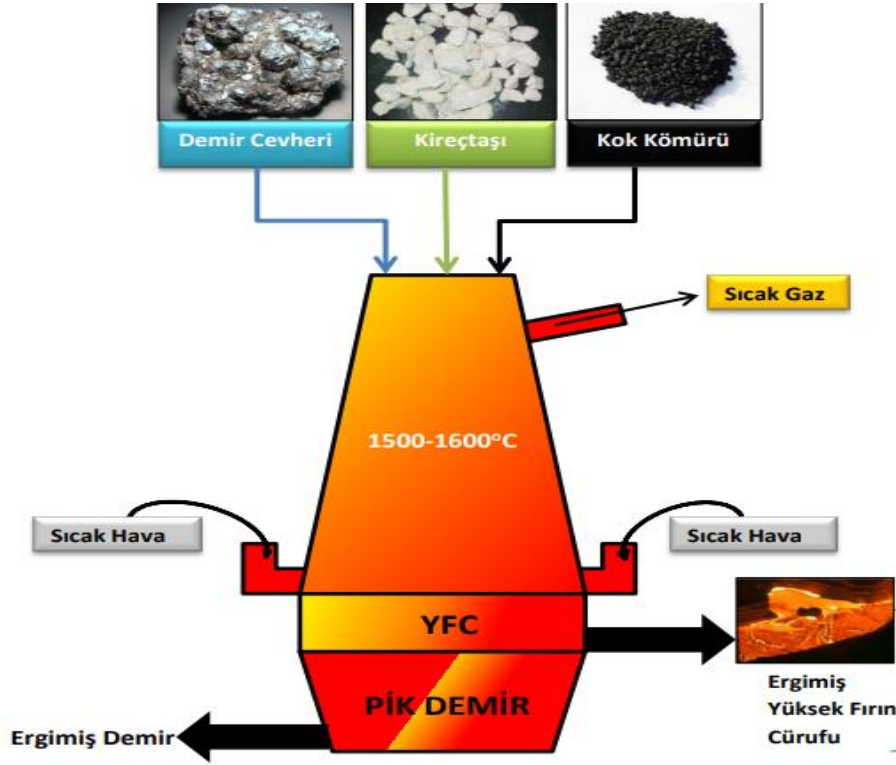
Islam vd., (2014) yaptıkları çalışmada geopolimer harç numuneleri üretmişlerdir. Granüle YFC, UK ve palmye yağı lifi külü olmak üzere üç farklı bağlayıcı malzeme kullanılmıştır. Agrega olarak dere kumu kullanılmıştır. Bağlayıcı/agrega oranı ise 1/4 olarak seçilmiştir. Alkali aktivatör olarak 12 mol NaOH ve Na₂SiO₃ kullanılmıştır. NaOH/Na₂SiO₃ oranı 1/2.5 olarak seçilmiştir. Alkali çözelti/bağlayıcı oranı ise 0,4 olarak belirlenmiştir. Belirlenen parametreler sonucu üretilen geopolimer harç numunesinin basınç dayanım değerleri incelenmiştir. 65 °C'de ısı işlem uygulanarak 28 gün boyunca kür edilen numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde en yüksek basınç dayanım değeri 64,0 MPa ile bağlayıcı olarak %100 YFC

kullanılan numunede elde edilmiştir. Yapılan incelemeler sonucu geopolimer harç numunelerinde bağlayıcı olarak YFC kullanımının daha uygun olduğu tespit edilmiştir.

Narayanan ve Shanmugasundaram (2017), yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer harç üretmişlerdir. Alkali aktivatör olarak 12 mol NaOH kullanılmıştır ve alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0,40 olarak seçilmiştir. Belirlenen parametreler sonucu üretilen numunelerin basınç dayanım değerleri; oda koşullarında, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 ve 900 °C’de yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası ölçülmüştür. Oda koşullarında 28 günlük basınç dayanımı 26,1 MPa olarak ölçülmüşken bu değer 100 °C’de 27,1 MPa, 200 °C’de 27,9 MPa, 300 °C’de 22,3 MPa, 400 °C’de 18,1 MPa, 500 °C’de 17,6 MPa, 600 °C’de 17,3 MPa, 700 °C’de 16,2 MPa, 800 °C’de 15,3 MPa ve 900 °C’de 9,1 MPa olarak ölçülmüştür. Elde edilen veriler incelendiğinde 200 °C’de en yüksek basınç dayanım değerine ulaşılmıştır ve sonrasında ise basınç dayanım değerlerinin sıcaklık arttıkça düştüğü gözlemlenmiştir.

2.2. Yüksek Fırın Cürufu

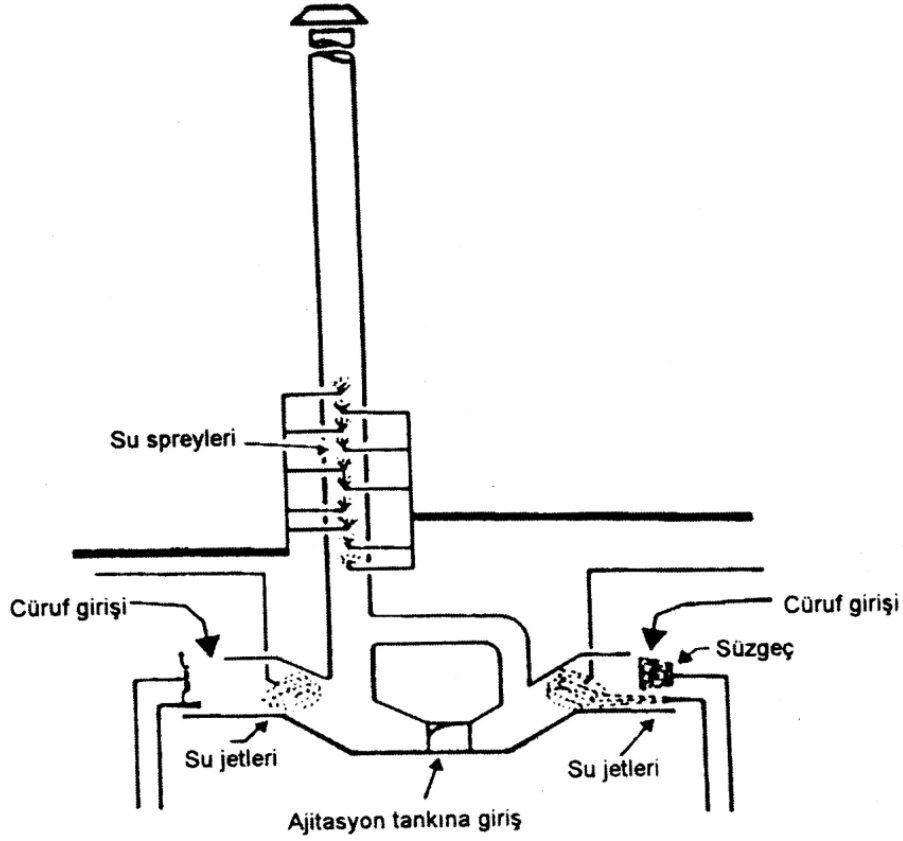
Demir üretimi için demir cevherlerinin çok yüksek sıcaklık değerlerine ulaşabilen fırınlarda ısıtılması gerekmektedir. Bu sayede demir cevheri oksijen vb. yabancı maddelerden arındırılmaktadır. Fırınlarda yakıt olarak ise kok kömürü kullanılmaktadır. Arındırma işlemine yardımcı olması için demir cevherinin yanında kalker taşı da ısıtılmaktadır. Malzemeler 1400°C’lere kadar ısıtılır. Yüksek sıcaklık sonucu demir cevherinde bulunan oksijen ile kok kömürde bulunan karbon birleşerek CO ve CO₂ gazlarını oluşturmaktadır. Oluşan bu gazlar tahliye boruları aracılığı ile ortamı terk etmektedir ve geriye eriyik halde CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, MnO ve S gibi demir dışında yabancı maddeler kalmaktadır. Demir elementi yüksek yoğunluğu sayesinde bu elementlerin bulunduğu ortamda alta çökmekte, geri kalan elementler ise demirin üstünde eriyik halde bulunmaktadır. Çökme sayesinde demir diğer malzemelerden ayrılarak elde edilir geriye kalan malzeme ise YFC (Erdoğan, 1995). Şekil 2.3’te YFC’nin üretim şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Yüksek fırın cürufunun üretim şeması (Engin, 2015)

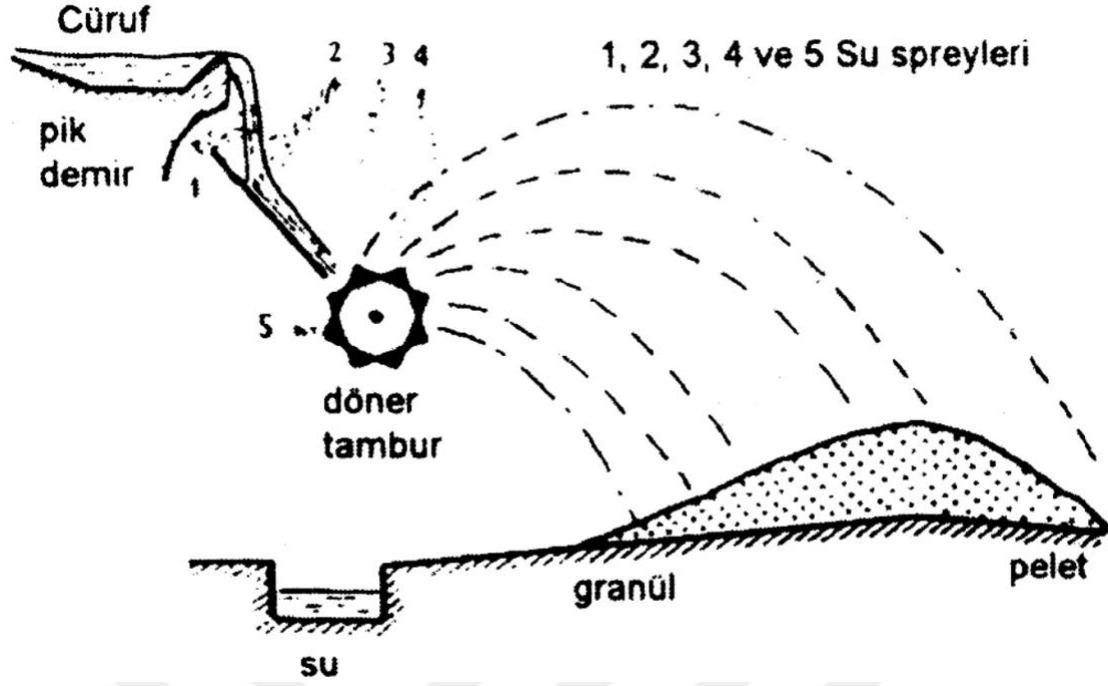
Yapılan işlemler sonucunda YFC yaklaşık 1500 °C sıcaklığa sahiptir. Soğutma işlemi yavaş şekilde olduğu zaman cüruf kristal bir yapıya ulaşır ve agrega olarak kullanıma uygundur. Eğer soğutma işlemi hızlı şekilde yapılır ise işlem sonucu YFC camı yani amorf yapıya sahip olur ve granül YFC elde edilmiş olur (Tokyay ve Erdoğan, 2009).

İlk olarak 1862 yılında Emil Largens tarafından YFC'nin suyla granülasyonu ile üretilen malzemenin kireçle karıştırılması sonucu, oluşan karışımın bağlayıcılık özelliği gösterdiği gözlemlenmiştir. YFC'nin soğutulmasında kullanılan granülasyon yönteminde 1 ton YFC'nin soğutulması işlemi için 100 m³ suya ihtiyaç vardır. Bu işlem sonucu üretilen YFC'nin içerisinde yaklaşık %30 kadar su bulunmaktadır. İçerisinde bulunan bu su filtreli havuzlarda veya kurutucu değirmenlerde cüruf içerisinde uzaklaştırılır. Granülasyon yöntemi ile üretilen YFC özellikleri bakımından en iyi cüruftur. Ancak bu yöntem çok pahalıdır ve kullanımında en büyük kısıtlayıcı etken ekonomik parametrelerdir. Granülasyon yöntemini Şekil 2.4'te gösterilmiştir (Swamy, 1986).



Şekil 2.4 : Granülasyon yönteminin tasviri (Tokyay ve Erdoğan, 2009)

Granülasyon yöntemindeki pahalılık, araştırmacıları bir başka soğutma yöntemine dair arayışlara yönlendirmiştir. Çalışmalar sonucu granülasyon yöntemine alternatif olarak peletleme yöntemi bulunmuştur. Peletleme yönteminin maliyet düşüklüğü ve uygulama kolaylığı, bu yöntemin yaygınlaşmasını sağlamıştır. Bu yöntemde eriyik halde bulunan YFC su ile soğutma işleminin ardından dakikada 300 devir yapabilme kabiliyetine sahip tambur ile havaya fırlatılır. Bu yöntem sonucunda 1 tonluk cürufu soğutmak için 1 m³ suya ihtiyaç duyulur. İşlem sonunda YFC'de %10 oranında su bulunur. Granülasyon yönteminde olduğu gibi peletleme yönteminde de yapılan işlemler sonucu cüruf içerisinde bulunan su filtreli havuzlar veya kurutucu değirmenler aracılığıyla uzaklaştırılır. Fakat peletleme yöntemi sonucunda üretilen YFC farklı boyutlarda olabilir. 4-15 mm dane çapına sahip YFC'ler kristal yapıda oldukları için agrega olarak kullanılabilirken, 4 mm'nin altında kalan dane çapına sahip YFC'ler camsı yapıya sahiptir ve puzolan olarak kullanılabilirler. Peletleme yöntemini Şekil 2.5'te gösterilmiştir (Swamy, 1986).



Şekil 2.5 : Peletleme yönteminin tasviri (Tokyay ve Erdoğan, 2009)

Chithambaram vd., (2019) yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer harç üretmişlerdir. Üretilen geopolimer harçta agrega olarak dere kumu kullanmışlardır. Dere kumu/UK oranı 3 olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmada UK'ye %0, %10, %20, %30, %40 olmak üzere beş farklı oranda granüle YFC ikamesi yapılmıştır. Alkali aktivatör olarak NaOH ve Na_2SiO_3 kullanılmıştır. NaOH/ Na_2SiO_3 oranı 2.5 alınmıştır. NaOH molaritesi ise 8, 10, 12 ve 14 olmak üzere dört farklı parametrede incelenmiştir. Alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0,45 alınmıştır. Belirlenen parametreler sonucunda üretilen geopolimer harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanım değerleri incelenmiştir. UK esaslı YFC ikamesiz geopolimer harç numuneleri incelendiğinde tek değişken parametre NaOH molaritesi olmak üzere; en yüksek basınç dayanım değeri 12 mol NaOH kullanılan karışımda (52,3 MPa) ile elde edilmiştir. En düşük basınç dayanım değeri ise 8 mol NaOH kullanılan karışımda (43,0 MPa) ile elde edilmiştir. UK esaslı geopolimer harç numunelerinde YFC ikamesinin basınç dayanımına etkisinin incelenmesi için 12 mol NaOH alkali çözeltisi kullanılan numunelerin basınç dayanım değerlerini incelediğimiz zaman; en yüksek basınç dayanım değeri ikamesiz numune grubunda 52,3 MPa iken bu değer %10 %20, %30 ve %40 YFC ikamesinde sırasıyla 53,5 MPa, 54,9 MPa, 59,2 MPa ve 56,5 MPa olarak ölçülmüştür. En yüksek basınç dayanım değerine %30 cüruf ikamesinde ulaşılmış olup artan cüruf ikamesi ile basınç dayanım değerinde düşüş gözlemlenmiştir.

Mustafa vd., (2019) yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer harç üretmişlerdir. Üretilen geopolimer harçta agrega olarak dere kumu kullanmışlardır. Dere kumu/ UK oranı 3 olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmada UK'ye %0, %5, %10, %15 olmak üzere dört farklı oranda granüle YFC ikamesi yapılmıştır. Alkali aktivatör olarak NaOH ve Na₂SiO₃ kullanılmıştır. NaOH/Na₂SiO₃ oranı 2.5 alınmıştır. NaOH molaritesi ise 10 mol alınmıştır. Alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0,67 alınmıştır. Belirlenen parametreler sonucunda üretilen geopolimer harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanım değerleri incelenmiştir. İkamesiz geopolimer harç numunesi için basınç dayanımı 18,33 MPa iken bu değer %5, %10 ve %15 YFC ikamesi ile sırasıyla 23,0 MPa, 23,3 MPa ve 23,7 MPa olarak ölçülmüştür. Deneyle sonucunu YFC ikamesinin basınç dayanım değerlerini arttırdığı gözlemlenmiştir.

Beijeljic vd., (2018) yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer harç üretmişlerdir. Üretilen geopolimer harçta agrega olarak dere kumu kullanmışlardır. Dere kumu/ UK oranı 3 olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmada UK'ye %25, %50, %75, %100 olmak üzere dört farklı oranda granüle YFC ikamesi yapılmıştır. Alkali aktivatör olarak NaOH ve Na₂SiO₃ kullanılmıştır. NaOH/Na₂SiO₃ oranı 5 alınmıştır. NaOH molaritesi ise 10 mol alınmıştır. Alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0,45 alınmıştır. Belirlenen parametreler sonucunda üretilen geopolimer harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanım değerleri incelenmiştir. İkamesiz geopolimer harç numunesi için basınç dayanımı 52,0 MPa iken bu değer %25, %50, %75 ve %100 YFC ikamesi ile sırasıyla 49,5 MPa, 41,0 MPa, 41,5 MPa ve 55,0 MPa olarak ölçülmüştür.

Samantasinghar ve Singh, (2019) yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer harç üretmişlerdir. Üretilen geopolimer harçta agrega olarak dere kumu kullanmışlardır. Dere kumu/ UK oranı 3 olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmada UK'ye %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 olmak üzere altı farklı oranda granüle YFC ikamesi yapılmıştır. Alkali aktivatör olarak NaOH kullanılmıştır. NaOH molaritesi ise 2, 4, 8, 12 ve 16 olmak üzere beş farklı parametrede incelenmiştir. Alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0,35 alınmıştır. Belirlenen parametreler sonucunda üretilen geopolimer harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanım değerleri incelenmiştir. En düşük basınç dayanım değeri ise 2 mol NaOH kullanılan karışımda (13,8 MPa) ile elde edilmiştir. UK esaslı geopolimer harç numunelerinde YFC ikamesinin basınç dayanımına etkisinin incelenmesi için 12 mol NaOH alkali çözeltisi kullanılan numunelerin basınç dayanım değerlerini incelediğimiz zaman; en yüksek basınç dayanım değeri %100 YFC ikameli numune grubunda 22,5 MPa iken bu değer %80, %60, %40 ve %20 YFC ikamesinde sırasıyla 16,1 MPa, 16,0 MPa, 12,1 MPa ve 10,0 MPa olarak ölçülmüştür. En yüksek basınç dayanım değerine

%100 cüruf ikamesinde ulaşılmış olup azalan cüruf ikamesi ile basınç dayanım değerinde düşüş gözlemlenmiştir.

Phoo-ngernkham vd., (2015) yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer harç üretmişlerdir. Üretilen geopolimer harçta agrega olarak dere kumu kullanmışlardır. Dere kumu/ UK oranı 3 olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmada UK %0, 50, 100 olmak üzere üç farklı oranda granüle YFC ikamesi yapılmıştır. Alkali aktivatör olarak NaOH ve Na₂SiO₃ kullanılmıştır. NaOH/Na₂SiO₃ oranı 2 alınmıştır. NaOH molaritesi ise 10 mol alınmıştır. Alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0,62 alınmıştır. Belirlenen parametreler sonucunda üretilen geopolimer harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanım değerleri incelenmiştir. İkamesiz geopolimer harç numunesi için basınç dayanımı 42,8 MPa iken bu değer %50 YFC ikamesi ile 114,5 MPa, %100 YFC ikamesi ile 171,7 MPa olarak ölçülmüştür. YFC ikamesi arttıkça geopolimer harç numunelerinin basınç dayanım değerlerinde bariz artışlar meydana gelmiştir.

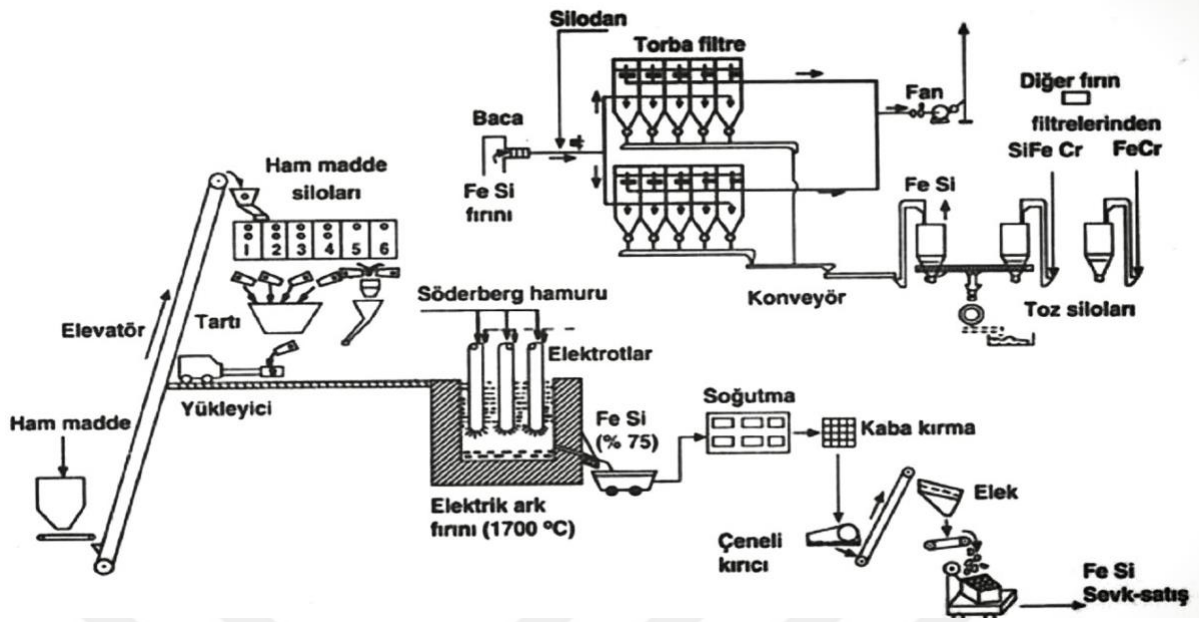
Madhav vd., (2018) yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer harç üretmişlerdir. Üretilen geopolimer harçta agrega olarak dere kumu kullanmışlardır. Dere kumu/ UK oranı 2 olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmada UK'ye %0, %10, %20, %30, %40, %50, %60, %70, %80, %90 ve %100 olmak üzere onbir farklı oranda granüle YFC ikamesi yapılmıştır. Alkali aktivatör olarak NaOH ve Na₂SiO₃ kullanılmıştır. NaOH/Na₂SiO₃ oranı 2 alınmıştır. NaOH molaritesi ise 12 mol olarak belirlenmiştir. Alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0,4 - 0,45 – 0,5 ve 0,55 olmak üzere dört farklı parametrede alınmıştır. Belirlenen parametreler sonucunda üretilen geopolimer harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanım değerleri incelenmiştir. YFC ikameli geopolimer harç numuneleri incelendiğinde tek değişken parametre alkali çözelti/bağlayıcı olmak üzere; en yüksek basınç dayanım değeri 0,55 olan karışımda (30,5 MPa) ile elde edilmiştir. En düşük basınç dayanım değeri ise alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0,4 olan karışımda (16,8 MPa) elde edilmiştir. UK esaslı geopolimer harç numunelerinde YFC ikamesinin basınç dayanımına etkisinin incelenmesi için alkali çözeltisi/bağlayıcı oranı 0,55 olarak kullanılan numunelerin basınç dayanım değerlerini incelediğimiz zaman; en yüksek basınç dayanım değeri %100 YFC ikameli numune grubunda 30,5 MPa iken bu değer %90, %80, %70, %60, %50, %40, %30, %20, %10 ve %0 YFC ikamesinde sırasıyla 26,0 MPa, 20,5 MPa 18,0 MPa, 12,5 MPa, 7,5 MPa, 5,0 MPa, 4,0 MPa, 2,5 MPa, 2,2 MPa ve 0,5 MPa olarak ölçülmüştür. En yüksek basınç dayanım değerine %100 cüruf ikamesinde ulaşılmış olup azalan cüruf ikamesi ile basınç dayanım değerinde düşüş gözlemlenmiştir.

Mallikarjuna ve Gunneswara (2015), yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer harç üretmişlerdir. Üretilen geopolimer harçta agrega olarak dere kumu kullanmışlardır. Dere kumu/

UK oranı 1 olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmada UK'ye %0, %10, %20, %30, %40, %50, %60, %70, %80, %90 ve %100 olmak üzere onbir farklı oranda granüle YFC ikamesi yapılmıştır. Alkali aktivatör olarak NaOH ve Na₂SiO₃ kullanılmıştır. NaOH/Na₂SiO₃ oranı 2,5 alınmıştır. NaOH molaritesi ise 8, 12 ve 16 mol olmak üzere üç farklı parametrede belirlenmiştir. Alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0,45 olarak alınmıştır. Belirlenen parametreler sonucunda üretilen geopolimer harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanım değerleri incelenmiştir. YFC esaslı (%100 YFC ikameli) geopolimer harç numuneleri incelendiğinde tek değişken parametre NaOH molaritesi olmak üzere; en yüksek basınç dayanım değeri NaOH molaritesinin 12 mol olduğu karışımda (78,0 MPa) ile elde edilmiştir. En düşük basınç dayanım değeri ise NaOH molaritesinin 8 mol olduğu karışımda (41,0 MPa) değeri ile elde edilmiştir. UK esaslı geopolimer harç numunelerinde YFC ikamesinin basınç dayanımına etkisinin incelenmesi için NaOH molaritesinin 12 mol olduğu numunelerin basınç dayanım değerlerini incelediğimiz zaman; en yüksek basınç dayanım değeri %100 YFC ikameli numune grubunda 78,0 MPa iken, bu değer %90, %80, %70, %60, %50, %40, %30, %20, %10 ve %0 YFC ikamesinde sırasıyla 72,0 MPa, 65,0 MPa, 62,0 MPa 55,0 MPa, 53,0 MPa, 52,0 MPa, 50,0 MPa, 47,0 MPa, 45,0 MPa ve 44,2 MPa olarak ölçülmüştür. En yüksek basınç dayanım değerine %100 cüruf ikamesinde ulaşılmış olup azalan cüruf ikamesi ile basınç dayanım değerinde düşüş gözlemlenmiştir.

2.3. Silis Dumanı

Silikon ve ferrosilikon eritme işlemide bir yan ürün olarak ortaya çıkan SD ortalama bir çimento parçacığından 100 kat daha küçük olan 0,1 mikron boyutunda dane çapı ile son derece ince bir malzemedir. İçerdiği yüksek miktardaki amorf silika içeriği ile puzolanik aktivitesi yüksek bir malzemedir. Yüksek saflıkta bulunan kuvarzın 2000 °C'ye varan sıcaklıklarda silikona indirgenmesi ile düşük sıcaklık bölgelerinde silikadan oluşup oksitlenen ve yoğunlaşan SiO₂ dumanı üretilir (Imam vd., 2018).



Şekil 2.6 : Silis dumanının üretim şeması

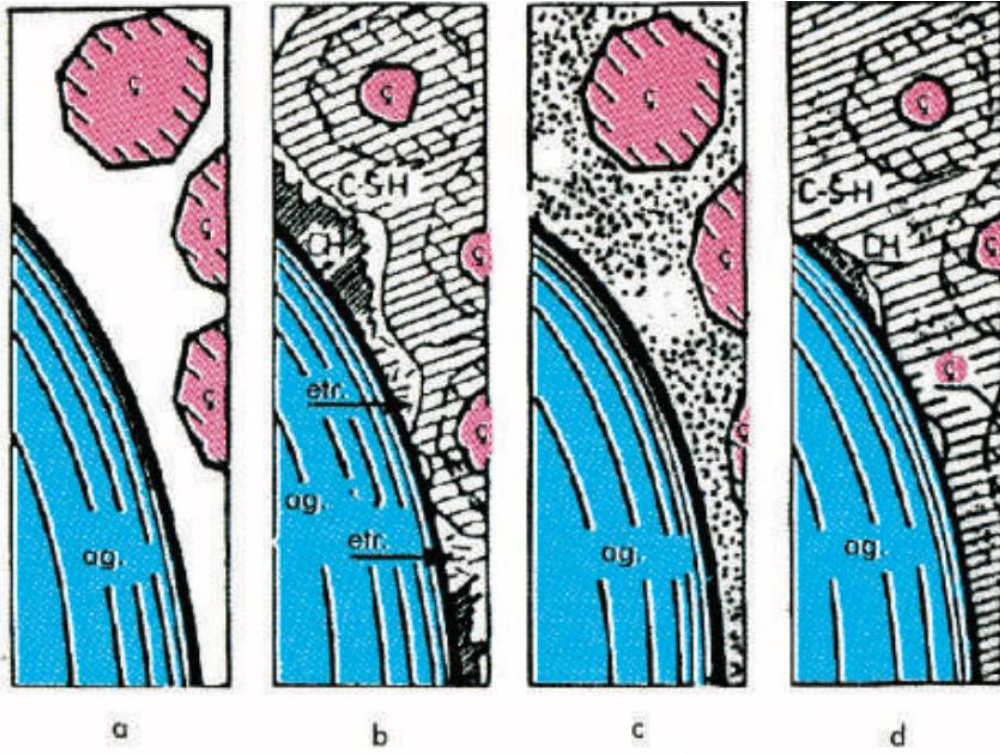
Şekil 2.6’da görüldüğü gibi üretilen SD gri renge sahip olup gri tonu arttıkça SD’nin karbon içeriğinin arttığı söylenmektedir. Özgül ağırlığı 2,1- 2,3 kg/m³ arasında değişmektedir (Thomas, 2013; Tafraoui, 2016; Khan ve Siddique, 2011).

Yüksek miktarda amorf silika (SiO₂) dan oluşan SD’nin silika içeriği %85’den fazladır ve demir (Fe), magnezyum (Mg) ve alkali oksitlerden oluşur. Çizelge 2.1’de SD’nin kimyasal kompozisyonuna dair farklı çalışmalarda gösterilmiş değerlere yer verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Silis dumanının kimyasal kompozisyonu

Kompozisyon, (%)	Lilkov vd. (2014)	Harue- Hansapong vd. (2014)	Mardani- Aghabalou vd. (2014)	Thomas (2013)
SiO ₂	89,50	88,30	87,29	97,00
Al ₂ O ₃	1,13	1,17	0,47	0,52
Fe ₂ O ₃	2,31	4,76	0,63	0,14
CaO	0,98	0,48	0,81	0,58
MgO	1,55	2,14	4,47	0,13
K ₂ O	0,6	-	1,28	0,42
Na ₂ O	0,42	-	1,25	0,04
SO ₃	0,4	1,05	0,22	0,01
Kızdırma Kaybı	2,40	2,10	2,70	1,5

SD kullanım alanları içerisinde yüksek durabilite ve dayanım özellikleri gerektiren betonların kullanıldığı viyadükler, barajlar ve köprülerde ayrıca uzun ömürlü olması gereken tünel kaplamaları gibi yerlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. (Akçaözöğlü, 2007)



Şekil 2.7 : Silis dumanının arayüzeye etkisi (Khayat, 1992)

SD'nın arayüze etkisi Şekil 2.7'de verilmiştir. SD beton içerisinde bulunan boşlukları doldurarak daha yapışkan bir yapı oluşturur ve bu durum betonun işlenebilirliğini azaltmaktadır (Özer, 2012).

SD, son yıllarda geopolimer üretiminde YFC, metakaolin, UK pirinç kabuğu külü gibi endüstriyel atıklarla birlikte kullanılarak geopolimer betonlarda dayanım ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Beton içerisindeki C-S-H jellerini artırarak dayanıma katkı sağlayan SD ayrıca alkali iyonlarla olan reaksiyonlara da katkı sağlamaktadır. Çok ince taneli yapısı sayesinde geçirgenliği azaltarak yapı içerisindeki çeliği korozyondan korur. (Durak vd., 2021; Bajpai vd., 2020; Khater, 2013; Deb vd., 2015)

Jithendra ve Elavenil (2020), yaptıkları çalışmada UK ve YFC esaslı geopolimer harcın SD ikamesi ile değişen basınç dayanım değerlerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada YFC ağırlıkça %30 olarak sabit tutulmuştur. UK'ye SD ikamesi ağırlıkça %0, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında yapılmıştır. Agrega olarak doğal dere kumu kullanılan çalışmada agrega:bağlayıcı oranı 2:5 oranlarında kullanılmıştır. 1 m³ geopolimer harcı için 600 kg/m³

bağlayıcı, 1500 kg/m^3 dere kumu kullanılmıştır. Alkali çözelti olarak Na_2SiO_3 kullanılmıştır ve alkali çözelti 2 mol kullanılmıştır. 28 günlük oda koşullarında küre bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri tayin edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek basınç dayanım değeri %10 SD ikamesi ile 41,4 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer %15, %25 ve %30 SD ikamesinde sırasıyla 40,44 MPa, 40,14 MPa ve 38 MPa olarak ölçülmüştür. Yapılan değerler sonucunda optimum SD ikamesinin ağırlıkça %10 olduğu tespit edilmiştir.

Okoye vd., (2016), yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer betona SD ikamesi ile değişen basınç dayanım değerlerini incelemiştir. Yapılan çalışmada agrega tüm karışımın ağırlıkça %77'sini oluşturmuştur. Bağlayıcı olarak kullanılan UK'ye ise %5, %10, %15, %20, %30 ve %40 oranlarında SD ikamesi yapılmıştır. Alkali çözelti olarak NaOH kullanılmış olup yapılan ön çalışmalar sonucu alkali çözelti molaritesi 14 mol olarak seçilmiştir. Yüksek oranda alkali çözelti/bağlayıcı oranı basınç dayanımını düşürdüğü için ağırlıkça %1 oranında süper akışkanlaştırıcı kullanılmış olup alkali çözelti/ bağlayıcı oranı 0,2 olarak kullanılmıştır. Belirlenen parametreler sonucu üretilen geopolimer betonun basınç dayanım değerleri incelenmiştir. 28 günlük oda koşullarında kür sonrası basınç dayanım değerleri tayin edilen numuneler arasında en yüksek değer %40 SD ikamesi ile elde edilen numune grubunda (73,4 MPa) elde edilmiştir. En düşük basınç dayanım değeri ise %5 SD ikamesi yapılan geopolimer beton numunesinde (43,7 MPa) elde edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, SD ikamesi arttıkça numunelerin basınç dayanım değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Ayrıca yapılan SEM analizleri sonucunda en SD ikamesi arttıkça daha kompakt ve yoğun bir mikroyapı oluştuğu gözlemlenmiştir.

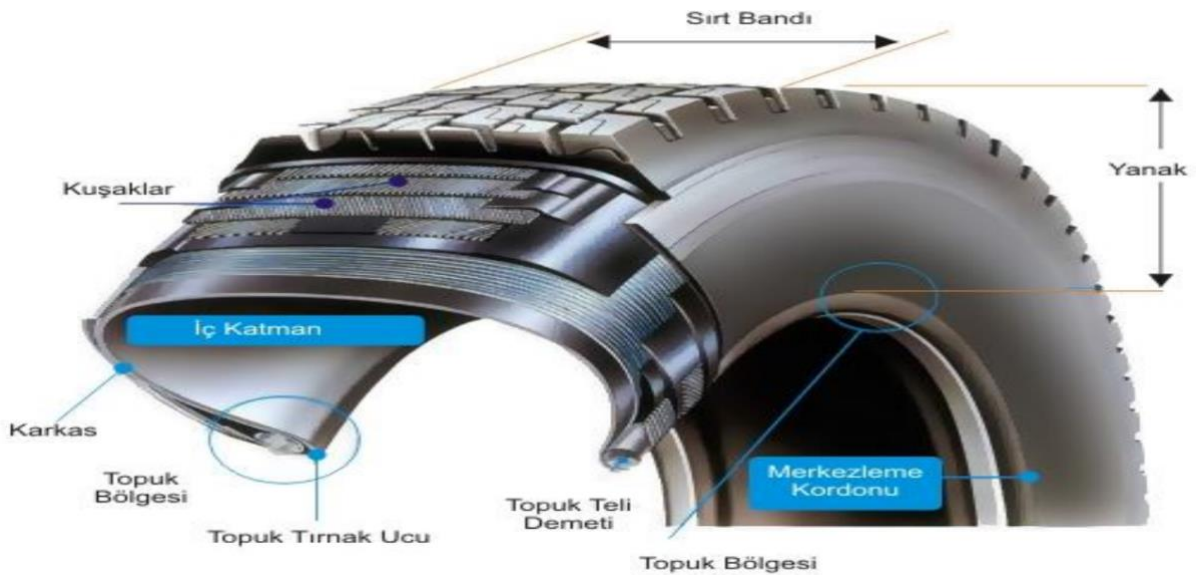
Ramezianpour ve Moeini (2018), yaptıkları çalışmada YFC esaslı geopolimer harç numunelerine SD ikamesinin basınç dayanımına etkilerini incelemiştir. YFC esaslı numuneler için ağırlıkça %0, %5, %7.5 ve %10 oranlarında SD ikamesi yapılmıştır. Alkali çözelti olarak NaOH kullanılmış olup yapılan ön çalışmalar sonucu alkali çözelti molaritesi 6 mol olarak seçilmiştir. Belirlenen parametreler sonucunda geopolimer harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanım değerleri tayin edilmiştir. En yüksek basınç dayanım değeri %5 SD ikamesinin yapıldığı grupta (61,6 MPa) ölçülmüştür. En düşük basınç dayanım değeri ise %10 SD ikamesi yapılan grupta (57 MPa) ölçülmüştür. Yapılan deneyler sonucu optimum SD ikamesi %5 olarak belirlenmiştir.

Elyamany vd. (2021), yaptıkları çalışmada YFC ve UK esaslı geopolimer beton üretmişlerdir. Bağlayıcı olarak kullanılan YFC %70 oranında sabit tutulmuş olup, YFC na ağırlıkça %0, %5 ve %10 oranlarında SD ikame edilmiştir. Alkali çözelti olarak 10 mol NaOH kullanılmıştır.

Oda koşullarında kür sürelerini tamamlayan numunelerin 28 günlük basınç dayanım değerleri tayin edilmiştir. Yapılan deneyler sonucu en yüksek basınç dayanım değerine %10 SD ikamesi olan numune grubunda (65,10 MPa) ulaşılmıştır. SD ikamesi arttıkça numunelerin basınç dayanım değerlerinde artış gözlemlenmiştir ve optimum SD ikamesi %10 olarak belirlenmiştir. Ayrıca SEM analizleri yapılan numunelerin SD ikamesi arttıkça daha kompakt ve yoğun bir mikroyapı oluştuğu gözlemlenmiştir.

2.4. Lastik Atık

Beş bin sene önce Sümerler tarafından lastik icat edilmiştir. Sonrasında ise günümüzde kullandığımız kauçuk keşfedilmiş ve lastik hakkında yapılan araştırmalar sonucunda bu sektör için devamlılık sağlanmıştır. Güney Amerika'ya araştırma yapmak üzere 17. yüzyılda giden Fransız bilim adamı tarafından yerli ismi olan HEVEA ağacından bir sıvı elde edilmiştir. Bölgenin yerlisi olan Amazonlular ise bu ağaçlara Kaa (odun) O-Chu (sızan, ağlayan) demişlerdir. Bu gün kullandığımız kauçuk kelimesinin kökeni de bu ağaçtan türemiştir. Ham kauçuk ; Fieus, Elastiea, Kök sakız, Heevea, Manilot, Guayola ve Ökse otu gibi bitkilerden üretilmektedir. Bu bitkiler arasında kauçuğu elde etmek için en kolay ve ekonomik yolu Amerika'nın Güneyindeki Hevea ağaçlarıdır. 10-20 m boya ve 50-80 cm çapa sahip olabilen bu ağaçlardan günlük yaklaşık olarak 200 gr kauçuk elde edilebilmektedir. Beyaz ve yapışkan bir forma sahip olan aynı zamanda Latex olarak da adlandırılan bu ürün belli işlemlere tâbi tutulduktan sonra kauçuk elde edilmektedir. (Rahim, 2021)



Şekil 2.8 : Araç lastiğinin yapısı (Konlas Otomotiv Lastik Sanayi, 2022)

Şekil 2.8'de araç lastiğinin yapısı incelendiğinde sırt bandı ve yanak kısımlarında kauçuk kullanılmaktadır. Kullanım ömrünü tamamlayan araç lastikleri ise geri dönüşüm maliyeti

yüksek olduğundan dolayı depolanmaktadır ve artan ulaşım araçlarının bir sonucu olarak atık araba lastiklerinin sayısı her geçen gün artmaktadır (Lindenmuth, 2006; Su vd., 2015).

Her yıl yaklaşık olarak Avrupa’da 240 milyon, Japonya’da 100 milyon ve ABD’de 240 milyon adet üzerinde lastik atık birikmektedir. Türkiye’de de araç kullanımının artmasına paralel olarak taşıt lastiği üretimi artmıştır ve bu da beraberinde LA birikimini arttırmıştır. Türkiye’de kullanım ömrünü tamamlamış LA miktarı bir senede 90.000 tonun üzerinde olduğu düşünülmektedir. Çevre Koruma Ajansı, lastik atıkların depolanması için 2 ve 3 milyon kapasiteli lastik depolama alanı oluşturmuştur ancak bu alanlar depolama için yetersiz kalmıştır. 1980’li yıllarda LA’ların depolanması fikrinin yerini yakılıp imha edilmesi fikri almıştır. Ancak bu işlem sonucunda ortaya çıkan duman içinde bulundurduğu zararlı gazlar sebebiyle hava, su ve zemin kirliliğini beraberinde getirmiştir (Lougheed ve Papagiannakis, 1996; Başbakanlık, T. C. 2008; Rahim, 2021).



Şekil 2.9 : Lastik atığının depolanması ve yakılması

Ömrünü tamamlamış LA’ların geri dönüşümü sonucunda elde edilen kauçuk birçok alanda ham madde olarak kullanılabilir. LA’nın düşük birim ağırlığı ve darbe mukavemeti karşısında yüksek direnci gibi özellikleri sayesinde bir çok alanda kullanım imkanı olan bir üründür. Çimento fabrika ve benzeri enerji gereksinimi yüksek olan yerlerde yakıt malzemesi olarak, yeniden kaplama işlemlerinde ve inşaat sektöründe geri dönüşüm amacıyla agrega ikamesi olarak kullanım alanı bulabilmektedir (Tsang, 2013).

Beton üretiminde bir çok ikame ürünleri bulunmaktadır. LA’ları da bu ikame ürünlerine bir örnektir. LA ilavesi betonda tokluğu ve kırılma yüzey enerjisini arttırmaktadır. LA betonda agrega ikamesi olarak kullanma fikri ilk olarak Amerikalı bilim adamı Profesör Rad tarafından

1967 yılında ortaya atılmıştır. Yaptığı deneyler sonucunda LA'nın ikamesi ile beton basınç dayanımında düşüşler tespit etmiştir ve yüksek dayanım gerektirmeyen yerlerde betonda kullanılabileceğini belirtmiştir. (Rad,1967).

Abdelmonim ve Bompa (2021), yaptıkları çalışmada granüle YFC esaslı geopolimer harç üretmişlerdir. Bağlayıcı olarak ağırlıkça %71 granüle YFC, %24 UK ve %5 SD ikamesi kullanılmıştır. Agregası olarak dere kumu kullanılmıştır. Agregası ikamesi olarak hacimce %0, 10, 20 ve 30 oranlarında LA kullanılmıştır. LA (0-0,5 mm), (0-2,5 mm) ve (0-4 mm) olmak üzere üç farklı boyutta kullanılmıştır. Alkali çözelti olarak sodyum silikat kullanılmıştır. Bağlayıcı:agrega oranı 1:4 oranında, çözelti:bağlayıcı oranı ise 0,45 oranında kullanılmıştır. Belirlenen parametreler sonucu üretilen geopolimer harç numunelerinin 28 günlük oda koşullarında kür süresi sonunda basınç dayanım değerleri incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek basınç dayanım değeri LA ikamesi yapılmamış olan grupta (50,6 MPa) olarak ölçülmüştür. (0-0,5 mm) tane çapına sahip LA ikamesi incelendiğinde %10 ikame için basınç dayanım değeri 31,6 MPa olarak ölçülmüştür. Bu değer %20'de 22,1 MPa ve %30'da 22,0 MPa olarak ölçülmüştür. (0-2,5 mm) tane çapına sahip LA ikamesi incelendiğinde %10 ikame için basınç dayanım değeri 34,4 MPa olarak ölçülmüştür. Bu değer %20'de 30,0 MPa ve %30'da 21,0 MPa olarak ölçülmüştür. (0-4 mm) tane çapına sahip LA ikamesi incelendiğinde %10 ikame için basınç dayanım değeri 34,5 MPa olarak ölçülmüştür. Bu değer %20'de 26,9 MPa ve %30'da 26,1 MPa olarak ölçülmüştür. LA ikamesinde kullanılan malzemenin tane çapı arttıkça geopolimer harç numunelerinin basınç dayanım değerlerinde artış görülürken, aynı tane çapına sahip LA ikamesi yapılmış gruplar için LA ikame yüzdesi arttıkça basınç dayanım değerlerinde düşüşler gözlemlenmiştir.

Zaetang vd. (2019) yaptıkları çalışmada geopolimer harç ve geleneksel PÇ'li harç olmak üzere iki farklı grupta numune üretmişlerdir. Geopolimer üretiminde YFC kullanılmıştır. Üretilen iki grup harçta agregası ikamesi olarak %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında LA kullanılmıştır. Elde edilen grupların basınç dayanımları incelenmiştir. 28 günlük kür süresi sonunda geopolimer harçta 37,4 MPa değerinde basınç dayanımı elde ederken PÇ'li harçta ise 46,1 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Geopolimer harç numunelerinde LA ikamesi %0 oranında iken basınç dayanımı 37,4 MPa olarak ölçülmüş olup; %25, %50, %75 ve %100 LA ikamesinde sırasıyla 12,3 MPa, 6,5 MPa, 4,1 MPa ve 2,7 MPa olarak ölçülmüştür. PÇ'li harç numunelerinde ise LA ikamesi %0 oranında iken basınç dayanımı 46,1 MPa olarak ölçülmüş olup; %25, %50, %75 ve %100 LA ikamesinde sırasıyla 20,8 MPa, 7,8 MPa, 4,3 MPa ve 3,3 MPa olarak ölçülmüştür. LA ikamesi arttıkça basınç dayanımında düşüşler meydana gelmiştir.

Süleyman ve Mermerdaş (2022) yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer harç üretmişlerdir. Agregada olarak dere kumu kullanılmıştır. Dere kumuna hacimce %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında 0-4 mm dane çapına sahip LA ikame edilmiştir. Alkali çözelti olarak 12 mol NaOH kullanılmıştır. Belirlenen parametreler sonucu üretilen geopolimer harç numunelerinin birim ağırlığı, basınç dayanımları ve eğilme dayanımları tespit edilmiştir. En yüksek basınç dayanım değerine LA ikamesiz numune grubunda 35,8 MPa ile ulaşılmış olup LA ikamesi arttıkça basınç dayanım değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. En düşük basınç dayanım değeri ise %50 LA ikameli numune grubunda 12,3 MPa olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde eğilme dayanımlarında da LA ikame yüzdesi arttıkça düşüş gözlemlenmiştir. LA ikamesiz numune grubunda eğilme dayanım değeri 5,3 MPa iken bu değer %50 LA ikamesinde 2,3 MPa'ya düşmüştür. LA ikamesi arttıkça birim ağırlıkta düşüş gözlemlenmiştir.

Azmi vd. (2019), yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer beton üretmişlerdir. Agregada olarak dere agregası kullanılmıştır. İnce agregaya hacimce %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında LA ikamesi yapılmıştır. Belirlenen parametreler sonucunda üretilen geopolimer beton numuneleri oda koşullarında 28 gün kür süresince bekletilmiştir. Tamamlanan kür süresinin ardından geopolimer beton numunelerinin basınç dayanım değerleri, su emme kapasiteleri, yoğunlukları ve SEM analizleri yapılmıştır. Yapılan SEM analizleri sonucunda ikame edilen LA'nın geopolimer jel içine kolayca karıştığı gözlemlenmiştir. 28 günlük basınç dayanım değerleri incelendiği zaman, LA ikamesiz geopolimer beton numunelerinin basınç dayanım değeri 67,3 MPa olarak ölçülmüştür. Bu değer %5 LA ikamesinde 33,2 MPa, %10'da 28,2 MPa, %15'te 18,3 MPa ve %20'de 11,2 MPa olarak ölçülmüştür. LA ikamesi arttıkça dayanım değerlerinde düşüşler gözlemlenmiştir. 24 saatlik su emme değerleri incelendiği zaman ikamesiz numune grubunda su emme değeri ağırlıkça %2 iken bu değer %20 LA ikamesinde %15 olmuştur. LA ikamesi betonun su emme değerini yükseltmiştir. Yoğunluk değerlerinde ise LA ikamesine bağlı olarak düşüş gözlemlenmiştir. İkamesiz numune grubu için 7 günlük yoğunluk değeri 1,76 g/mm³ iken bu değer %20 ikamede 1,52 g/mm³ olarak ölçülmüştür.

Azmi vd. (2022), yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer harca LA ikamesinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki etkilerinin incelemişlerdir. Agregada %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında LA ikamesi yapılmıştır. Alkali çözelti olarak sodyumhidroksit (NaOH) kullanılmıştır. 28 gün oda koşullarında kür yapılan numuneler 200, 400, 600 ve 800 °C sıcaklığa 1 saat boyunca maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası numunelerin basınç dayanım değerleri incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda numunelerde LA ikamesi arttıkça basınç dayanım değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca LA ikamesi arttıkça yoğunluk

değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir ve su emme kapasitesinde artış gözlemlenmiştir. Isıl işlem sonrası numunelerin basınç dayanım değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. %5 LA ikamesi yapılan numune grubunda oda koşullarında basınç dayanım değeri 35,0 MPa iken bu değer 800 °C yüksek sıcaklık sonrası 9,9 MPa'a düşmüştür. Yoğunluk değerleri incelendiği zaman %5 LA ikamesi yapılan numune grubunda oda koşullarında yoğunluk değeri 1,6 kg/m³ iken bu değer 800 °C yüksek sıcaklık sonrasında 1,46 kg/m³'e kadar düşmüştür. Ağırlık kaybı değerleri incelendiği zaman %5 LA ikamesi içeren numune grubu için 200 °C'de ağırlık kaybı %5 iken bu değer 800 °C'de %19,2 olarak ölçülmüştür.

Raksuntorn vd. (2021) yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer harç üretmişlerdir. Agregada olarak dere kumu kullanılmıştır ve agregada ağırlıkça %0, %10, %20 ve %30 oranlarında LA ikamesi yapılmıştır. Alkali çözelti olarak sodyumhidroksit ve sodyumsilikat kullanılmıştır. Belirlenen parametreler sonucu üretilen geopolimer harç numunelerinin yoğunluk değerleri, basınç dayanım değerleri ve su emme değerleri tayin edilmiştir. Yoğunluk değerleri incelendiği zaman ikamesiz geopolimer harç numunesinde yoğunluk değeri 2,10 kg/m³ iken bu değer %30 LA ikamesi ile 1,79 kg/m³ olmuştur. Basınç dayanım değerleri incelendiği zaman ikamesiz geopolimer harç numunesinin basınç dayanım değeri 58,7 MPa iken bu değer %30 LA ikamesi ile 13,7 MPa'ya düşmüştür. LA ikamesi arttıkça basınç dayanım değerinde düzenli düşüşler gözlemlenmiştir. Su emme değeri incelendiği zaman ikamesiz geopolimer harç numunesinin su emme değeri ağırlıkça %6,9 iken bu değer %30 LA ikamesinde %9,2 olarak ölçülmüştür. LA ikamesindeki artışa paralel olarak su emme değerinde artış gözlemlenmiştir.

2.5. Yüksek Sıcaklık Etkisi

Yüksek sıcaklık direnci yüksek bir malzeme olarak ön plana çıkan ve inşaat sektörünün ana malzemesi olan beton; yanmaz madde oluşu, yüksek sıcaklık sırasında zehirli gazlar çıkarmaması ve belirli bir süre için önemli dayanım ve dayanıklılık kayıpları sergilememesi açısından ön plana çıkmaktadır. Fakat beton tarafından sergilenen bu yararlı hareketler belirli bir süre ve sıcaklık değerlerine kadar geçerliliğini korumaktadır. Yüksek sıcaklığın betonarme yapılarda meydana getirdiği etkiler üzerine yapılan çalışmalar 1920'li yıllardan itibaren yapılmaktadır (Baradan vd., 2002; Khoury, 2000).

Yüksek sıcaklık etkisi altında beton malzemenin dayanımını etkileyen parametreler; çevresel ve malzeme faktörleri olarak sınıflandırılabilir. Malzeme faktörleri beton malzemenin üretim ve materyal detayları olmakla birlikte çevresel faktörler ise yüksek sıcaklık maruziyeti sırasında ulaşılan en yüksek sıcaklık değeri, bu sıcaklığa ulaşılan süre ve hızı, ulaşılan en yüksek

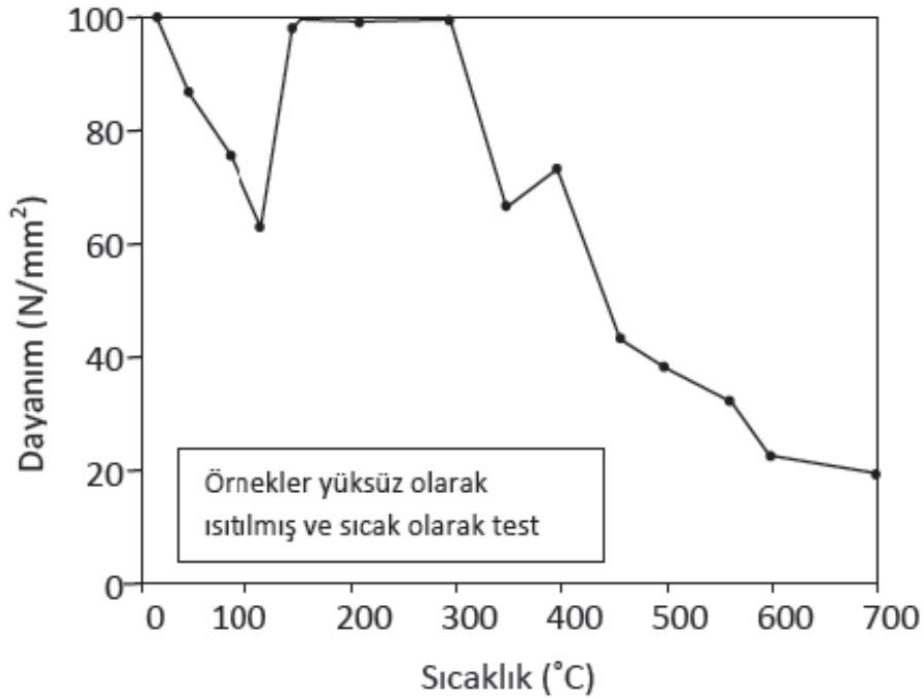
sıcaklık maruziyeti altında geçen süre ile yüksek sıcaklık maruziyeti sonrasındaki soğuma süresi ve şekli olarak sıralanabilir (Sarshar ve Khoury, 1993).

Kompozit bir malzeme özelliği göstermesi sebebiyle betonun yüksek sıcaklık direnci hakkındaki bilgiler karmaşıklaşmaktadır. Bu karmaşıklığın temel sebebi; beton içerisinde kullanılan malzemelerin termal özelliklerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır (Tanyıldızı ve Coşkun, 2008).

Kompozit malzeme oluşu sebebiyle yüksek sıcaklık etkisi altında betonun yapısal özelliklerinin dayanım ve dayanıklılık özellikleri hakkında birçok araştırma yapılmıştır. Betonun basınç dayanımı ile yüksek sıcaklık altındaki dayanıklılığı arasında bir korelasyon olduğu gözlemlenmiştir. Bu bağlamda beton basınç dayanımı ile arasında ilişki bulunan bütün parametreler yüksek sıcaklık etkisi altındaki dayanımı etkilemektedir. Basınç değerleri ile porozitesi yani içerisinde bulunan boşluk miktarı arasında ilişki bulunmaktadır. Beton içerisindeki porozite miktarı arttıkça beton basınç dayanım değerlerinde bariz düşmeler meydana geldiği görülmüştür (Vodak vd., 20004). Betonda poroziteyi meydana getiren etmenler; kalsiyumsilikahidrat (C-S-H) jel boşlukları, hava boşlukları ve kapiler boşluklar olarak sıralanabilir. Sertleşmiş betonda bulunan çimento hamuru 20-200 °C sıcaklık değerleri arasında genişir. Ortam sıcaklığı 200 °C'nin üzerine çıktığında ise malzemelerin farklı yoğunlukları sebebiyle büzülür. Çimento hamurundaki büzülme sırasında ise agregada genişleme meydana gelir. Bütün bu hacim değişiklikleri, bu ortamda bulunan beton yüzeyinde ve içinde kısmi çatlaklar meydana getirir (Alonzo vd., 2003). Ortam sıcaklığı 500 °C'ye ulaştığı zaman ise kapiler boşluklarda ve C-S-H jelleri içerisinde bulunan su ayrılmaya başlar ve toplam hacimde artış meydana gelir. (Haddan ve Shannis, 2004). Ortam sıcaklığı 600 °C'ye ulaştığı zaman ise beton içerisinde bulunan toplam boşluk hacminde artışlar artmaya devam eder. Beklenenden fazla meydana gelen bu artış değerleri ağırlık kaybı meydana getirir. Malzeme yüzeyinde ayrışmalar meydana gelmeye başlar. Ortam 900 °C'ye ulaştığı zaman ise malzeme yüzeyinde sinterleşme meydana gelmeye başlar ve malzeme dayanım ve dayanıklılık değerlerini büyük oranda kaybeder (Alonzo vd., 2003).

Yüksek sıcaklık etkisi, betonda basınç dayanımı, çekme dayanımı ve elastite modülünde kayıplar meydana getirmektedir. Bu kayıpların sebepleri arasında; beton yapısı içerisindeki serbest suyun yer değiştirmesi veya buharlaşması, emilmiş ve bağlanmış suyun kaybedilmesi, kalsiyumhidroksitin 450 °C ve üzerinde ayrışmaya başlaması, 400 ila 600 °C arasında C-S-H jellerinde meydana gelen yapısal bozulmalar gibi değişimler bulunmaktadır (Felicetti ve

Gambarova, 1998). Sıcaklık değişimi ile basınç dayanımı arasındaki ilişki Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10 : Sıcaklık ile basınç dayanımı arasındaki ilişki (Baradan vd., 2002)

Şekil 2.10'da görülen grafik incelendiği zaman; 5-100 °C sıcaklık değerleri arasında basınç dayanım değerlerinde meydana gelen azalma, çimento hamurundaki boşluklarda bulunan suların yer değiştirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. 100 °C'den sonra basınç dayanım değerlerinde meydana gelen artışın sebebi ise termal kurumanın sağladığı olumlu etkiden dolayı gerçekleşmektedir. Bu olumlu etki 300 °C'ye kadar devam eder bu değerden sonra ise bu olumlu etki ortadan kalkmıştır. Bu sıcaklık değerinin üzerinde dayanım değerinde meydana gelen düşüşün sebepleri arasında malzeme içerisinde artan porozite de bulunmaktadır. C-S-H jelleri ile ara yüzeyler arasında mevcut bulunan su sıcaklık 300 °C'ye ulaştığında mikro çatlaklara sebep olmaktadır. Bu mikro çatlaklar ilk olarak kalsiyumhidratın toplandığı kısımlarda ardından henüz hidrate olmayan tanelerin bulunduğu kısımlarda meydana gelmiştir. Ortam sıcaklığı 400 °C ila 600 °C arasında olduğu zaman ise yüksek sıcaklık etkisi ile çimento hamurunda bulunan C-S-H jelleri ayrılmaya başlamıştır. 600 °C'nin üzerine çıkan numunelerin basınç dayanım değerlerinde bariz düşüşler meydana gelmiştir (Baradan vd., 2002; Mehta ve Monteiro, 1997; Lin vd., 1996; Piasta, 1984).

Değirmenci (2018), yaptığı çalışmada YFC ve UK esaslı geopolimer harç üretmiştir. Bağlayıcı olarak %100 YFC, %50-%50 YFC ve UK, %100 UK olmak üzere üç farklı numune grubu

üretmiştir. Agregada olarak dere kumu kullanılmıştır. Alkali çözelti olarak sodyumhidroksit ve sodyumsilikat kullanılmıştır. Belirlenen parametreler sonucu üretilen geopolimer harç numuneleri 300, 600 ve 900 °C yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası ağırlık kaybı, basınç dayanım kaybı ve görsel analizleri yapılmıştır. 300 °C yüksek sıcaklık dayanımı sonrası basınç dayanım değerlerinde %2 ile %10 arasında kayıp meydana gelirken bu değer 600 °C'de %22 ile %63 arasında, 900 °C'de ise %65 ile %78 arasında olmuştur. Ağırlık kaybı değerleri 300 °C'de %1,2 ile %5 arasında iken bu değer 600 °C'de %2,1 ile %6,3, 900 °C'de %3 ile %7 arasında olmuştur. Geopolimer harç numunelerine uygulanan yüksek sıcaklık değerleri arttıkça numunede basınç dayanım değerleri düştüğü gözlemlenmiş olup ağırlık kaybı değerlerinde de sıcaklık değerleri arasında bağlantı olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer harç numunelerinin özellikle 600 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra renklerinde açılma meydana gelmiş olup bu renk değişimi 900 °C'de tamamen sarıya dönmüştür.

Rashad vd. (2016), yaptıkları çalışmada YFC esaslı geopolimer harç numuneleri üretmişlerdir. Agregada olarak doğal dere kumu kullanılmış olup agregaya hacimce %25, %50, %75 ve %100 oranlarında YFC ikame edilmiştir. Alkali çözelti olarak sodyumsilikat kullanılmıştır. Alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0,3 alınmıştır. Belirlenen parametreler sonucunda üretilen geopolimer harç numunelerinin oda koşullarında basınç dayanım değerleri tayin edilmiştir. Numuneler 28 günlük kür süresinin ardından 200, 400, 600 ve 800 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra basınç dayanımları, ağırlık kayıpları ve görsel analizleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucu SEM görüntüleri incelenen numuneler için yüksek sıcaklıktan kaynaklanan mikro çatlakların miktarında, YFC ikamesi arttıkça azalma gözlemlenmiştir. Basınç dayanım değerleri incelendiğinde yüksek sıcaklık maruziyeti arttıkça basınç dayanım değerlerinde düşüş gözlemlenmiş olup, YFC ikamesi arttıkça basınç dayanım değerlerinde iyileşme olduğu gözlemlenmiştir. 600 °C ve üzerinde sıcaklığa maruz kalan numunelerde belirgin renk değişimleri olduğu gözlemlenmiştir.

Guerrieri vd. (2009), yaptıkları çalışmada geleneksel beton ve geopolimer beton üretmişlerdir. Üretilen geleneksel betonda PÇ kullanılmıştır. Geopolimer betonda ise YFC kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak %100 PÇ, %50-%50 YFC ve PÇ, %100 YFC olmak üzere üç farklı numune grubu üretmiştir. 360 kg/m³ bağlayıcı dozajı seçilmiş olup su/bağlayıcı ve alkali çözelti/bağlayıcı oranları 0,50 olarak belirlenmiştir. Parametreler sonucu üretilen geleneksel ve geopolimer beton numuneleri 1 saat boyunca 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100 ve 1200 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası numunelerin basınç dayanım değerleri ve ağırlık kaybı değerleri tayin edilmiştir. Deneyler

sonucu üretilen beton numunelerinde oda koşullarında en yüksek basınç dayanım değerleri %100 yüksek fırın cürufllu numune grubunda 50,1 MPa olarak ölçülmüştür. %100 PÇ'li numune grubunun oda koşullarında basınç dayanım değeri 49,0 MPa iken bu değer %50 PÇ'li %50 yüksek fırın cürufllu numune grubu için 47,0 MPa olarak ölçülmüştür. Yüksek sıcaklık maruziyeti sonucu numunelerin basınç dayanım değerleri incelendiği zaman oda koşullarında yapılan basınç dayanım değerleri ile kıyaslandığı zaman 200 °C'ye kadar numunelerin basınç dayanım değerlerinde değişim gözlemlenmemiştir. 200 °C'nin üzerindeki her artış için basınç dayanım değerlerinde düzenli düşüşler gözlemlenmiştir. 900 °C ve üzerindeki numune grubu için basınç dayanım değeri tayin edilememiştir. Mukavemetteki bu azalmaya görsel olarak gözlemlenen yüzey termal çatlama ve test numunelerinin iç mikro çatlama eşlik etmiştir. Ağırlık kaybı değerleri incelendiği zaman 100 °C'de %1,40 olarak ölçülen ağırlık kaybı yüzdesi her derece artışı için yükselmeye devam etmiştir. En çok ağırlık kaybı 1200 °C'ye maruz bırakılan numune grubunda en çok %8,40 olarak ölçülmüştür.

Topal vd., (2021) yaptıkları çalışmada YFC esaslı geopolimer beton üretmişlerdir. Bağlayıcı dozajı 400 kg/m³ seçilmiş olup alkali çözelti için 10 mol NaOH kullanılmıştır. Agregada doğal dere agregası kullanılmış olup %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında geri dönüştürülmüş agrega kullanılmıştır. Üretilen numuneler 100, 200, 400, 600 ve 800 °C'lik yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Oda sıcaklığında deneylere uygulanan deneyler yüksek sıcaklık sonrasında da uygulanmış ve elde edilen sonuçlar referans değerler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda geri dönüştürülmüş agrega ikamesi arttıkça numunelerin basınç dayanım değerlerinde azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. UPV değerleri ile basınç dayanım değerleri arasında korelasyon olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık sonrası en yüksek basınç dayanım değeri %0 ikame yapılan numune grubunda 100 °C'de gözlemlenirken en düşük basınç dayanım değeri %100 ikame yapılan numune grubunda 800 °C'de gözlemlenmiştir. Sıcaklık yükseldikçe geopolimer numunelerin basınç dayanım değerlerinde düşüş gözlemlenirken kılcal su emme değerlerinde artış meydana gelmiştir. En çok ağırlık kaybı değeri 800 °C sıcaklığa maruz bırakılan numune gruplarında gözlemlenmiştir.

Derinpinar vd., (2022) YFC esaslı geopolimer beton üretmişlerdir. YFC na ikame olarak %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında camtozu katılmıştır. Bağlayıcı dozajı 400 kg/m³ seçilmiştir. Alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0,50 olarak seçilmiş olup alkali aktivatör olarak 12 mol NaOH kullanılmıştır. Üretilen numuneler 150, 300, 450, 600 ve 750 °C'lik yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Numuneler oda koşullarında ve suda soğumaya bırakılmıştır. Oda sıcaklığında deneylere uygulanan deneyler yüksek sıcaklık sonrasında da uygulanmış ve elde edilen

sonuçlar referans değerler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucu belirlenen basınç dayanım değerleri incelendiği zaman; cam tozu ikamesi arttıça basınç dayanım değerlerinde azalma görülmüştür. Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası oda koşullarında soğumaya bırakılan numunelerde en yüksek basınç dayanımı 300  C’de %0 cam tozu ikamesi yapılan numune grubunda, en düşük basınç dayanımı ise 750  C’de %20 cam tozu ikamesi yapılan geopolimer beton numunesi grubunda elde edilmiştir. Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası suda soğumaya bırakılan numunelerde en yüksek basınç dayanımı 150  C’de %0 cam tozu ikamesi yapılan numune grubunda elde edilmiştir. Kılcal geirirnilik katsayısı sıcaklığa bağlı olarak artış gösterirken, deney ölüm süresine bağlı azalış göstermiştir. En az ağırlık kaybı değeri oda koşullarında ve suda soğuyan numuneler için 150  C’de %0 cam tozu ikamesi yapılan deney grubunda elde edilirken, en yüksek ağırlık kaybı değeri oda koşullarında ve suda soğuyan numuneler için 750  C’de %20 cam tozu ikamesi yapılan deney grubunda elde edilmiştir. Yüksek sıcaklık maruziyeti öncesi ve sonrası yapılan görsel inceleme sonuçlarına göre oda koşullarında ve suda soğuyan numuneler için cam tozu ikamesi ve sıcaklık değerlerinde artış meydana geldikçe numune yüzeylerinde ve içerisinde boşluk miktarlarında artış olduğu gözlemlenmiştir.

Shaikh ve Vimonsatit (2015), yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer beton numuneler üretmişlerdir. Bağlayıcı dozajı 400 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Alkali aktivatör olarak 10, 13 ve 16 mol NaOH kullanılmıştır. Alkali zlti/bağlayıcı oranı 0,35 kabul edilmiştir. Belirlenen parametreler sonucu üretilen geopolimer beton numuneleri 200, 400, 600 ve 800  C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık öncesi ve yüksek sıcaklık sonrası numunelerin basınç dayanım değerleri ve görsel analizleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek basınç dayanım değerleri 13 mol NaOH alkali zltisi kullanılan deney gruplarında elde edilmiştir. 200  C’ye kadar basınç dayanımında artış gözlemlenirken, bu değerden sonra basınç dayanım değerlerinde düşüşler gözlemlenmiştir. En yüksek basınç dayanım değeri 100  C’de 13 mol NaOH alkali zltisi kullanılarak üretilen deney grubunda 72,2 MPa olarak llrken bu değer en az 800  C’de 16 mol NaOH alkali zlti kullanılarak üretilen deney grubunda 32,2 MPa olarak llmştr. Görsel analizler sonucunda 600  C ve üzerindeki sıcaklıklar için numune yüzeylerinde sararmalar meydana geldiği, bu renk değişiminin 800  C’ye ulaşıldığı zaman net bir turuncu rengine dönüştüğü gözlemlenmiştir.

Shaikh ve Haque (2018), yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer beton üretmişlerdir. Bağlayıcı olarak kullanılan UK’ye %1, %2 ve %4 oranlarında nano silika ve %5, %10 ve %20 oranlarında ince öğütülmüş silika kumu ikame edilmiştir. Alkali aktivatör olarak 8 mol

sodyumhidroksit kullanılmıştır. Alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0,40 olarak belirlenmiştir. Belirlenen parametreler sonucu üretilen geopolimer numuneler 200, 400, 600 ve 800 °C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yapılan deneyler sonucu en yüksek basınç dayanım değeri %2 nano silika ikamesi yapılan numune grubunda elde edilmiştir. Oda koşullarında 36,2 MPa olarak ölçülen basınç dayanım değeri, 200 °C’de 37,3 MPa olarak ölçülmüştür. 200 °C’de artış gösteren basınç dayanım değeri sıcaklık arttıkça azalmıştır. En düşük basınç dayanım değeri 800 °C’de 15,00 MPa olarak ölçülmüştür. Ağırlık kaybı değerleri incelendiği zaman sıcaklık arttıkça ağırlık kaybı değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası görsel analiz yapılan numunelerde 400 °C’de hafif sarımtırak olan renk değişimi 800 °C’de net bir turuncu rengini almıştır.

Shaikh ve Hossan (2016), yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer beton üretmişlerdir. Referans numunesi olarak PÇ’li geleneksel beton üretilmiştir. Agregaya %0, %5 ve %0,75 oranlarında çelik lif ikamesi yapılmıştır. Geleneksel betonda su/çimento oranı 0,4 olarak alınmıştır. Geopolimer betonda ise alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0,4 olarak kullanılmıştır. Belirlenen parametreler sonucu üretilen numuneler 200, 400, 600 ve 800 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık öncesi ve yüksek sıcaklık sonrası numunelerin basınç dayanım değerleri incelenmiştir. İncelenen basınç dayanım değerlerine göre en yüksek basınç dayanım değeri 200 °C’de 68,9 MPa olarak ölçülmüştür. Oda koşullarında 55,0 MPa olarak ölçülen basınç dayanım değeri 200 °C’de artış göstermiştir. 200 °C’nin üzerindeki sıcaklık etkisinde basınç dayanım değerinde düşüşler gözlemlenmiştir. En düşük basınç dayanım değeri 18,9 MPa ile 800 °C’de ölçülmüştür.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Yüksek fırın cürufu

Geopolimer harç üretiminde ana bağlayıcı olarak kullanılan YFC; Karabük ilinde bulunan Karçimsa firmasından temin edilmiştir. Temin edilen YFC yeterli incelikte olduğu için öğütülme işlemine tâbi tutulmadan doğrudan kullanılmıştır. YFC'nin özgül yüzey alanı 3996 cm²/g'dır. Özgül ağırlığı ise 2,86 g/cm³'tür. YFC'ye ait kimyasal kompozisyon Çizelge 3.1'de, YFC'nin görüntüsü ise Şekil 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu.

Bileşim (%)	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MgO	Mn ₂ O ₃
YFC	32.47	32.45	9.94	9.31	9.31	3.51
Bileşim (%)	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	S ⁻²	Na ₂ O	Cl ⁻
YFC	1.25	1.16	0.85	0.33	0.31	0.015



Şekil 3.1 : Yüksek fırın cürufu

3.1.2. Silis dumanı

Geopolimer harç üretiminde bağlayıcı olarak kullanılan SD; ETİ Elektrometalurji A.Ş.'den temin edilmiştir. Temin edilen SD yeterli incelikte olduğu için öğütülme işlemine tâbi tutulmadan doğrudan kullanılmıştır. SD'nin özgül yüzey alanı 17980 cm²/g'dır. Özgül ağırlığı

ise 2,25 g/cm³'tür. SD'ye ait kimyasal kompozisyon Çizelge 3.2'de, SD'nin görüntüsü ise Şekil 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Silis dumanının kimyasal kompozisyonu

Bileşim (%)	SiO ₂	MgO	K ₂ O	Al ₂ O ₃
YFC	83.40	8.80	1.40	1.20
Bileşim (%)	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO
YFC	1.00	0.60	0.60	0.40



Şekil 3.2 : Silis dumanı

3.1.3. Doğal dere agregası

Geopolimer harç numuneler üretilirken doğal dere kumu kullanılmıştır. Kullanılan dere kumu (0-4 mm) dane çapına sahiptir. Tez çalışmasında kullanılan agregaya dair deneyler ve elde edilen sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma kısmında belirtilmiştir. Geopolimer harç karışımında kullanılan ince agrega Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



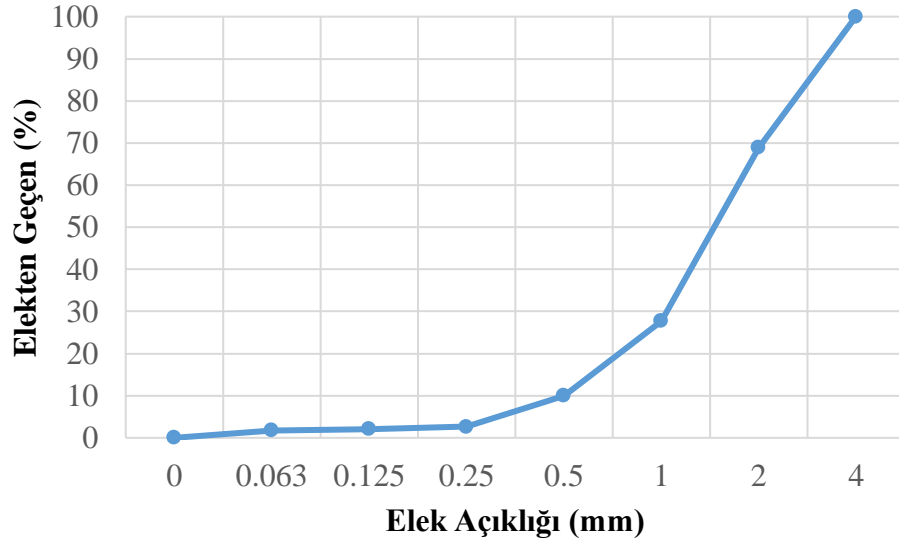
Şekil 3.3: İnce (0-4 mm) agrega

3.1.4. Lastik atık

Geopolimer harç üretiminde agregaya ikame olarak kullanılan lastik atık Malatya ilindeki Ford Trucks Çetinkayalar Otomotiv firmasından temin edilmiştir. LA ikame edilirken 0-4 mm boyutunda kullanılmıştır ve agrega ile ikame edilmiştir. LA'nın yoğunluğu 1.10 g/cm^3 'dir ve yapısı lif şeklindedir. LA Şekil 3.4'de, yapılan deneyler sonucu belirlenen gradasyon eğrisi Şekil 3.5'te ve ortalama bileşimi ise Çizelge 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : İnce (0-4 mm) lastik atık



Şekil 3.5 : İnce (0-4 mm) lastik atık gradasyon eğrisi

Çizelge 3.3 : Lastik atık bileşimi

Bileşen	Kauçuk	Karbon siyahı	Metal	Katkı maddeleri
Kütlece Miktar (%)	47.0	21.5	16.5	7.5
Bileşen	Tekstil elyaf	Çinko oksit	Kükürt	
Kütlece Miktar (%)	5.5	1.0	1.0	

3.1.5. Aktivatör

Yapılan tez çalışmasında geopolimer harçta aktivasyonu sağlamak için NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Deneyler için seçilen 12 mol NaOH konsantrasyonunda çözeltiyi elde edebilmek için musluk suyu tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılan NaOH Şekil 3.6'da, kimyasal özellikleri ise Çizelge 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.6 : Sodyum hidroksit (NaOH)

Çizelge 3.4 : Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri

Özellikler	Sodyum Hidroksit
Molekül formülü	NaOH
Molekül kütlesi (g/mol)	40.00
Renk	Beyaz
pH	13-14
Bağıl yoğunluk (g/cm³)	2.13

3.1.6. Aletler

3.1.6.1.Elekler

Geopolimer harç üretiminde TS 706 EN 12620+A1 (2009)'a uygun olan 4mm göz açıklığına sahip elek kullanılarak agrega elenmiştir. Kullanılan sarsma tablası ve elekler Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : Sarsma tablası ve elekler

3.1.6.2. Beton karışım mikseri

Geopolimer harç üretiminde malzemeleri karıştırmak için çeşitli hızlarda karıştırma özelliğine sahip UTEST marka karışım mikseri kullanılmıştır. Kullanılan karışım mikseri Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 : Beton karışım mikseri

3.1.6.3. Etüv

Tez çalışmasında kullanılan agregaların özgül ağırlık tayini deneylerinde ve geopolimer harç numunelerinde yapılan deneylerde Şekil 3.9’da gösterilen dijital termostatlı etüv cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.9 : Etüv

3.1.6.4. Basınç dayanım cihazı

Üretilen geopolimer harç numunelerin basınç dayanım değerlerinin tayin edilmesi için ELE marka ve 3000 kN yükleme kapasitesine sahip tek eksenli otomatik basınç cihazı kullanılmıştır. Kullanılan basınç dayanım cihazı Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : Basınç dayanım cihazı

3.1.6.5. Kalıplar

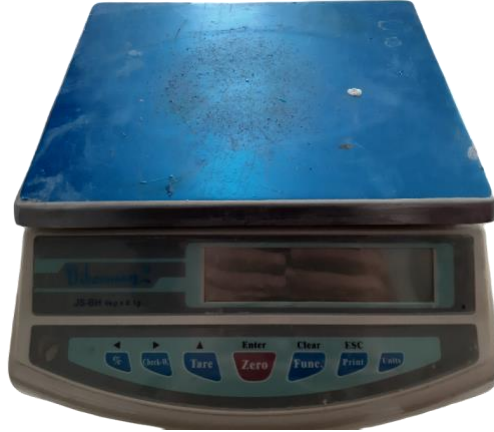
Karışım dizaynına uygun olarak hazırlanan geopolimer harç numuneleri Şekil 3.11'de gösterilen kalıplara yerleştirilmiştir. Basınç dayanımı için 50x50x50 mm, darbe dayanımı için 100x100x100 mm, eğilme dayanımları için 40x40x160 mm ve yarmada çekme dayanımları için $\varnothing 100 \times 200$ mm boyutlarına sahip kalıplar kullanılmıştır.



Şekil 3.11 : Deneylerde kullanılan kalıplar

3.1.6.6.Hassas terazi

Tez çalışması boyunca bütün aşamalarda ağırlık ölçümlerinde Şekil 3.12’de görülen 0.01 g hassasiyete sahip terazi kullanılmıştır.



Şekil 3.12 : Hassas terazi

3.1.6.7.Yüksek sıcaklık fırını

Üretilen geopolimer harç numuneler Şekil 3.13’de gösterilen yüksek sıcaklık fırını kullanılarak, belirlenen test sıcaklıklarına 1 saat boyunca maruz bırakılmıştır.



Şekil 3.13 : Yüksek sıcaklık fırını

3.1.6.8.SEM cihazı

Üretilen geopolimer harç numunelerin iç yapı analizlerini yapmak için Şekil 3.14'te gösterilen LEO EVO 40 markalı elektron tarama mikroskobu kullanılmıştır.



Şekil 3.14 : SEM cihazı

3.2. Yöntem

Bu bölümde agrega deneyleri; geopolimer harcın karışım oranları ve bunların belirlenmesi; belirlenen karışım oranlarına uygun geopolimer harç numunelerinin hazırlanması; kalıplara yerleştirilmesi ve kür edilmesi anlatılmıştır. Ayrıca kür sürelerini tamamlayan numuneler ve

kür süresi sonrasında yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan numunelere uygulanan basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe dayanımı deneyleri ayrıntılı bir biçimde verilmiştir.

3.2.1. Agregalara uygulanan yöntemler

Geopolimer harç numuneleri üretilirken dane çapı 0-4 mm olan doğal dere kumu kullanılmıştır. Dere agregası yığınının numune alınırken TS EN 931-2'de gösterilen çeyrekleme metodu kullanılmıştır. Kullanılan agregalar geopolimer harç kontrol numunelerinin üretiminde TS 802 (2016)'ya uygun biçimde belirlenmiştir.

İnce agregadan alınan numune 24 saat etüvde bekletilmiştir. 24 saatin sonunda tartılan ince agregaların kuru ağırlıkları belirlenmiştir. İnce agregalar tane yapısından dolayı hacim belirlenirken dereceli silindir kap kullanılmıştır. Belirlenen hacim sonrası kuru yüzey özgül ağırlıkları hesaplanmıştır. İnce agregalardan bir miktar daha numune alınmış ve 24 saat su içerisinde bekletilmiştir. Serilerek yüzeyin kurumaması sağlanan agregaların hacimleri belirlenerek doygun kuru yüzey özgül ağırlıkları hesaplanmıştır.

İnce dere agregasına ait deney sonuçlarına Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde yer verilmiştir.

3.2.2. Geopolimer harç karışım oranlarının belirlenmesi

Geopolimer harç üretiminde bağlayıcı olarak YFC ve bağlayıcı katkı malzemesi olarak SD kullanılmıştır. Agregası olarak ise (0-4 mm) dane çapına sahip dere kumu ve ikame olarak LA kullanılmıştır. YFC yerine ağırlıkça %0, %5 ve %10 oranlarında SD kullanılarak 3 grup oluşturulmuştur. Kullanılan ince dere agregasında ise hacimce %0, %5, %10 ve %15 oranlarında dane boyutu (0-4 mm) olan ince LA ikame edilerek 4 grup elde edilmiştir. Bağlayıcı kombinasyonunda gelen 3 grup ve agregası kombinasyonundan gelen 4 grup içlerinde dağıtılarak toplamda 12 adet geopolimer harç numune grubu üretilmiştir. Karışım dizaynı hesaplanırken bağlayıcı:alkali çözültisi:kum oranları 1:0,45:3 olarak kullanılmıştır. İncelenen 12 adet grubun kodları ve içeriği Çizelge 3.5'te belirtilmiştir. İncelenen literatür çalışmaları ve yapılan laboratuvar denemeleri neticesinde çözülti/bağlayıcı oranı 0,45 olarak, NaOH çözültisinin molaritesi ise 12 M olarak belirlenmiştir. Deneyler sonucu belirlenen değerlere göre aktivatör olarak kullanılan NaOH'ın miktarı hesaplanmıştır. Belirlenen oranlara uygun olarak bağlayıcı ve agregasının miktarı ve hacmi hesaplanmıştır. Geopolimer harç üretimi için belirlenen karışım oranları ve miktarları Çizelge 3.6'da detaylıca verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Üretilen geopolimer harç kodları

Karışımlar Kodları	Bağlayıcı (%)		Agrega (%)	
	Yüksek Fırın Cürufu	Silis Dumanı	Dere Agregası 0-4 mm	Lastik Atık
S100-SF0-W0	100	-	100	-
S100-SF0-W5	100	-	95	5
S100-SF0-W10	100	-	90	10
S100-SF0-W15	100	-	85	15
S95-SF5-W0	95	5	100	-
S95-SF5-W5	95	5	95	5
S95-SF5-W10	95	5	90	10
S95-SF5-W15	95	5	85	15
S90-SF10-W0	90	10	100	-
S90-SF10-W5	90	10	95	5
S90-SF10-W10	90	10	90	10
S90-SF10-W15	90	10	85	15

Çizelge 3.6 : Geopolimer harç karışımlarında kullanılan malzeme miktarları (kg/m³)

Karışımlar	Yüksek Fırın Cürufu	Silis Dumanı	12 M NaOH	Dere Kumu (0-4 mm)	Lastik Atık (0-4 mm)
S100-SF0-W0	400	-	180	1200	-
S100-SF0-W5	400	-	180	1140	25,68
S100-SF0-W10	400	-	180	1080	51,36
S100-SF0-W15	400	-	180	1020	77,04
S95-SF5-W0	380	20	180	1200	-
S95-SF5-W5	380	20	180	1140	25,68
S95-SF5-W10	380	20	180	1080	51,36
S95-SF5-W15	380	20	180	1020	77,04
S90-SF10-W0	360	40	180	1200	-
S90-SF10-W5	360	40	180	1140	25,68
S90-SF10-W10	360	40	180	1080	51,36
S90-SF10-W15	360	40	180	1020	77,04

3.2.3. Gopolimer harçların üretimi ve yerleştirilmesi

Geopolimer harç üretiminde kullanılacak olan malzemeler Çizelge 3.6’da verilen ağırlıklara uygun olacak şekilde hassas terazide tartılmış ve karışıma hazır hale getirilmiştir. Karışım

yapılmadan 1 saat önce NaOH çözeltisi hazırlanmış ve soğumaya bırakılmıştır. NaOH çözeltisi bekleme süresinde oluşabilecek çökmeleri önlemek amacı ile tekrar karıştırılmış ve kullanıma hazır hale getirilmiştir. Sonrasında ilk olarak YFC ardından ise SD karıştırılmıştır. Homojenlik sağlandıktan sonra karışıma NaOH çözeltisi eklenmiş ve hamur karıştırılmıştır. Sonrasında hamur karışıma sırası ile ince agrega ve LA katılmıştır ve karışım yeterince karıştırılarak hazır hale getirilmiştir. Hazır hale getirilen geopolimer harç farklı deneylerde kullanılmak üzere uygun kalıplara yerleştirilmiştir. Geopolimer harç numunelerinin kalıp içerisinde düzgün bir şekilde yerleşmesini sağlamak amacı ile ilk olarak şişleme çubuğu yardımı ile şişlenmiş ardından tokmakla kalıp köşelerine vurularak geopolimer harcın kalıp içerisine tamamıyla yerleşmesi sağlanmıştır. Kalıp içerisine yerleşmesi tamamlanan numunelerin kalıp yüzeyleri mala yardımı ile düzlenmiştir. Bütün bu işlemlerin ardından 24 saat boyunca kalıpta priz alması için bekletilmiştir. 24 saatlik beklemenin sonunda priz alarak sertleşen ve kalıbın şeklini alan geopolimer harç numuneleri özenle kalıptan çıkarılarak laboratuvar içerisinde uygun oda koşulları altında bırakılmış ve deney gününe kadar bekletilmiştir. Kalıba yerleştirilen ve ardından çıkarılarak 28 günlük kür süresi boyunca bekletilen numuneler Şekil 3.15’de gösterilmiştir.



Şekil 3.15 : Kalıplara yerleştirilen bir grup geopolimer numune

3.2.4. Sertleşmiş harç deneylerinde uygulanan yöntemler

Bu tez çalışması kapsamında üretilen geopolimer harç numuneler;

- Basınç Dayanımı
- Yarmada Çekme Dayanımı

- Eğilme Dayanımı
- Geri Tepme Dayanımı (Ribaunt Testi)
- Ağırlık Kaybı
- Kılcal Geçirgenlik
- Yüksek Sıcaklık Dayanımı

deneylerine tâbi tutulmuştur.

3.2.4.1. Basınç dayanımı

Yapılan çalışmalar sonucu üretilen geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımları TS EN 12390-3 (2019) standartlarına uygun test metodu kullanılarak belirlenmiştir. Kalıp içerisinde kalan ve pürüzsüz yüzeyleri seçilip temizlendikten sonra yükleme yüzeyi olarak belirlenen numuneler test düzeneklerine yerleştirilmiştir. Cihaz ayarlarından deneye tâbi tutulacak olan numunenin boyutları 50x50x50 mm olarak seçilmiştir. Boyutu seçilen numune için yükleme hızı 1.40 kN/s olarak belirlenmiştir. Ardından yükleme işlemi başlamış ve numunede çatlaklar oluşup cihaz yüklemeyi otomatik olarak durdurana kadar deney devam etmiş ve tamamlanmıştır.

Numunenin basınç dayanım değeri Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Basınç dayanım değerlerini elde etmek için her grubu temsilen üçer adet numune deneylere tâbi tutulmuş ve elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.16'da görülmektedir.

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

F_c : Basınç dayanımı, MPa.

P : Kırılma anındaki en büyük yük, N.

A_c : Numunenin, üzerine basınç yükünün uyguladığı en kesit alanı, mm².



Şekil 3.16 : Deneye tabi tutulan numune ve numunenin kırılma yüzeyleri

3.2.4.2.Eğilme dayanımı

Yapılan çalışmalar sonucu üretilen geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımlarını belirlemek için SHIMADZU marka deney aleti TS EN 12390-5 (2019) standardına uygun olarak kullanılmıştır. Bu deney için her gruptan 40x40x160 mm boyutlarında numune kullanılmıştır. 28 günlük kür süresinin ardından numuneler yükleme tablasında mesnetlere oturtularak deneye tâbi tutulmuştur. Numunelerin eğilme dayanımları Denklem 3.2 kullanılarak elde edilmiştir. Deney düzeneği Şekil 3.17’de görülmektedir.

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

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 3.17 : Eğilme dayanımı deney düzeneği

3.2.4.3. Yarmada çekme dayanımı

Yapılan çalışmalar sonucu üretilen geopolimer harç numunelerin yarmada çekme dayanımlarını belirlemek için TS 12390-6 (2010) standardı kullanılmıştır. Deneye tâbi tutmak için Ø100×200 mm boyutlarında silindir numune kullanılmıştır. Karışım dizaynına uygun olarak üretilen geopolimer harç numuneler 28 günlük kür süresini tamamladıktan sonra deney yapılmıştır. Numunelerin yarmada çekme dayanım değerleri Denklem 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.18’de görülmektedir.

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

σ : Yarmada çekme dayanımı, (MPa).

P: Silindir numuneye uygulanan basınç yükü, (N).

L: Silindir numunenin uzunluğu, (mm).

D: Silindir numunenin çapı, (mm).



Şekil 3.18 : Yarmada çekme deney düzeneği

3.2.4.4. Kılcal geçirimsizlik

Kılcal geçirimsizlik; harç içerisinde bulunan boşluklara tabanda bulunan suyun dolmasının belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucu üretilen geopolimer harç numunelerinin kılcal geçirimsizlik değerlerini belirlemek için ASTM C1585 standardına uygun olarak deney düzeneği oluşturulmuştur ve her deney grubundan üçer adet numune kullanılmıştır. Deney öncesinde numuneler tamamen kuruması amacı ile 24 saat boyunca 105°C sıcaklıkta etüvde bekletilmiştir. 24 saat bekleyen ve tamamen kuruyan numuneler etüvden çıkarılmıştır. Deneye tâbi tutulmadan önce yan yüzeyleri su geçirmez bant ile kapatılmış ve yan yüzeylerden su alması önlenmiştir. Sonrasında numuneler Şekil 3.19’da görüldüğü gibi 5 mm suya batırılacak şekilde yerleştirilmiş ve alt yüzeylerinin su ile teması sağlanmıştır. Numunelerde belirlenen bekleme süreleri 5, 15, 30, 60 ve 1440 dakika olarak belirlenmiştir. Belirlenen sürelerde bekletildikten sonra numuneler su içerisinden çıkartılmış ve suya temas eden yüzeyleri havlu ile kurulanmıştır. Kurulama işleminin ardından numunelerin ağırlıkları ölçülmüş ve not edilmiştir. Geopolimer harç numunelerin belirlenen süreler içerisinde birim alanda kapiler boşlukları içerisine nüfuz eden su miktarından hareketle kılcal geçirimsizlik katsayısı Denklem 3.4 ve Denklem 3.5 kullanılarak hesaplanmıştır. Deney sonucunda elde edilen değerler her gruptan üç numune olacak şekilde not edilmiş ve bu üç numunenin deney sonuçlarının ortalaması alınmıştır.

$$k = \frac{Q}{\sqrt{t}} \quad (3.4)$$

$$Q = \frac{m_t}{A \times d} \quad (3.5)$$

k: Kılcal su emme katsayısı, (cm/s^{0.5}).

Q: Absorbe edilen su miktarı, (cm).

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

A: Su ile temas eden yüzey alanı, (cm²).

t: Zaman, (s).

d: Suyun yoğunluğu, (g/cm³).



Şekil 3.19 : Kılcal geçirimsizlik deneyi sırasında numuneler

3.2.4.5. Ağırlık kaybı

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan geopolimer harç numunelerin bünyesinde meydana gelen deformasyonu incelemek amacıyla ağırlık kaybı değerleri incelenmiştir. Geopolimer harç numunelerin yüksek sıcaklık muruziyeti öncesinde ve sonrasında ağırlıkları hassas terazi yardımıyla tartılmış ve not edilmiştir. Geopolimer harç numunelerinde meydana gelen değişim değerleri Denklem 3.6 yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\text{Ağırlık kaybı (\%)} = \frac{(W - W_0)}{W_0} \times 100 \quad (3.6)$$

W_0 : Numunenin başlangıçtaki ağırlığı, g.

W : Numunenin yüksek sıcaklık sonrası ağırlığı, g.

3.2.4.6. Geri tepme dayanımı (Ribaunt testi)

Abdelmonem vd. (2019), yaptıkları çalışmada numunelerin geri tepme dayanımını belirlemek amacı ile Şekil 3.20'de gösterildiği gibi düzenek kurmuşlardır. Kurulan düzeneğe göre 0,5 kg ağırlığındaki bir adet çelik küre bilye 1 m yükseklikten 100x100x100 mm boyutlarındaki küp numunenin üst yüzeyinin tam merkez noktasına çarpmak üzere serbest bırakılmıştır. Birkaç top düşmesinden sonra numuneler kırılmış ve bu düşme sayısı not edilmiştir. Darbe enerjisi Denklem 3.7 ile hesaplanmıştır. Serbest bırakılan çelik bilye ilk çarpışmanın ardından geri sekmiş ve belirli bir yüksekliğe çıkmıştır. Bu birinci geri tepme yüksekliği not edilmiştir. Çelik bilyenin ilk potansiyel enerjisi Denklem 3.8 ile, birinci çarpışmadan sonraki potansiyel enerjisi ise Denklem 3.9 ile hesaplanmıştır. Çelik bilyenin ilk enerjisi ve ikinci enerjisi arasındaki fark Denklem 3.10 ile hesaplanmıştır ve hesaplanan bu değer; geri tepme dayanım testine tâbi tutulan numunenin enerji emme kapasitesini vermiştir.

$$E_D = N \times m \times g \times h \quad (3.7)$$

$$E_{P1} = m \times g \times h \quad (3.8)$$

$$E_{P2} = m \times g \times h_S \quad (3.9)$$

$$E_P = E_{P1} - E_{P2} \quad (3.10)$$

E_D = Darbe enerjisi

E_{P1} = Çelik bilyenin ilk potansiyel enerjisi

E_{P2} = Çelik bilyenin son potansiyel enerjisi

N = Numune kırılana kadar gerçekleşen düşüş sayısı

m = Çelik bilyenin kütlesi (0,5 kg)

g = Yer çekimi ivmesi (9,81 m/s²)

h = Çelik bilyenin ilk yüksekliği (1 m)

h_S = Çelik bilyenin ilk çarpışma sonrası ulaştığı yükseklik

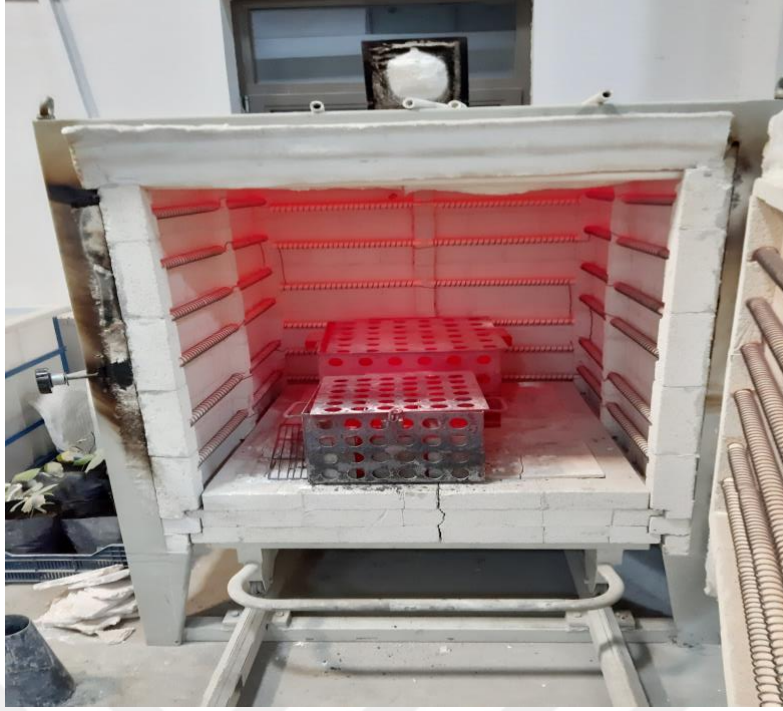
Yapılan deneyler sonucu üretilen 100x100x100 mm boyutundaki numuneler Şekil 3.20’de görülen deney düzeneğine yerleştirilerek geri tepme deneyine tâbi tutulmuştur. Deney sonucu elde edilen verilerden Abdelmonem vd. (2019)’nin yaptığı araştırmalar ışığında elde edilen Denklem 3.9 yardımı ile geri tepme enerjisi hesaplanmıştır. Hesaplanan geri tepme enerjisi sayesinde LA ikamesi ve yüksek sıcaklık maruziyeti durumlarının; üretilen geopolimer harç numuneleri üzerindeki etkisi yorumlanmış ve değiştirilen parametreler sonucunda meydana gelen enerji yutma kapasitelerindeki değişim hesaplanmıştır. Hesaplamaların sonuçlarına ve yorumlara Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde yer verilmiştir.



Şekil 3.20 : Geri tepme dayanımı deneyi düzeneği

3.2.4.7.Yüksek sıcaklık dayanımı

28 gün boyunca laboratuvar koşullarında kür süresini tamamlayan geopolimer harç numunelerin yüksek sıcaklık dayanımlarının belirlenmesi amacı ile 250, 500 ve 750 °C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Numuneler Şekil 3.21’de görüldüğü gibi yüksek sıcaklık fırınına yerleştirildikten sonra istenilen sıcaklığa ulaşmış ve bu sıcaklıkta 1 saat boyunca tutulmuştur. İşlem tamamlandıktan sonra fırından çıkarılan numuneler havada soğumaya bırakılmıştır. Bu numunelerin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ağırlık kaybı, darbe dayanımı ve kılcal geçirimsizlik analizi yapılmıştır. Aynı zamanda yüksek sıcaklık maruziyeti öncesi ve sonrası görsel incelemeler ve mikro yapı analizleri yapılmıştır.



Şekil 3.21 : Yüksek sıcaklık fırınında numuneler

3.2.4.8.SEM görüntü analizi

Yapılan çalışmalar sonucu üretilen geopolimer harç numunelerinden alınan parçaların SEM görüntülerini elde etmek amacı ile numuneler altın paladyum tozları kullanılarak iletken bir kaplama ile kaplanmıştır. Altın paladyum ile kaplama işlemi elektronların bir noktada birikmesini önlemek amacı ile yapılmıştır. Kaplama sonrasında numuneler tablaya sabitlenerek SEM makinasının içerisine yerleştirilmiştir ve görüntüler elde edilmiştir. Mikroyapı analizleri Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır. Görüntü almak için EVO 40 markalı analiz cihazı kullanılmıştır ve Şekil 3.22'de SEM analizinin yapıldığı cihaz görülmektedir.



Şekil 3.22 : SEM görüntü analiz cihazı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Agregada Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma

Yapılan çalışmalarda kullanılan ince doğal dere agregasına ait özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucu elde edilen kuru özgül ağırlık, doymun kuru yüzey özgül ağırlık, görünen özgül ağırlık ve su emme oranları hesaplanmıştır. Elde edilen veriler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Agreganın özgül ağırlık ve su emme değerleri

Özellikler	İnce agregada (0-4 mm)
Kuru özgül ağırlık	2.49
Doymun kuru özgül ağırlık	2.57
Görünen özgül ağırlık	2.62
Su emme oranı (%)	2.00

4.2. Sertleşmiş Harç Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma

Yapılan çalışmalar sonucu hazırlanan geopolimer harç numunelerin Materyal ve Yöntem bölümünde bahsedildiği şekilde üretimi sağlanmıştır. Üretilen geopolimer harç numunelerin yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, geri tepme dayanımı gibi mekanik özellikleri ve kılcal geçirimsizlik, ağırlık kaybı gibi fiziksel özellikleri incelenmiştir.

4.2.1. Geopolimer harç kontrol numuneleri ile ilgili bulgular ve tartışma

Yapılan çalışmalar sonucu üretilen geopolimer harç numunelerinin yüksek sıcaklık öncesi ve yüksek sıcaklık sonrası kıyaslanabilmesi için; oluşturulan 12 grup numunenin yüksek sıcaklık öncesinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, geri tepme dayanımı gibi mekanik özellikleri ve kılcal geçirimsizlik, ağırlık kaybı gibi fiziksel özellikleri incelenmiştir.

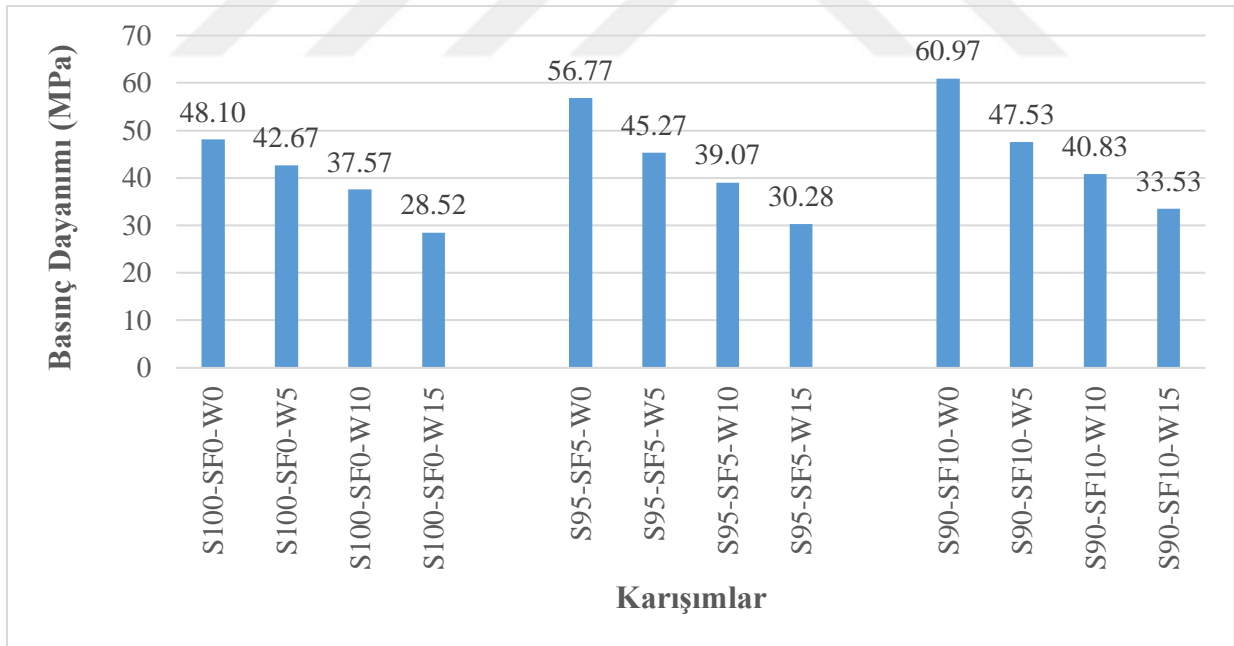
4.2.1.1. Geopolimer harç kontrol numunelerinin basınç dayanımı

YFC oranı %100, YFC oranı %95 ve SD oranı %5, YFC oranı %90 ve SD oranı %10 olmak üzere üç farklı bağlayıcı grubu ile; İnce agregada oranı %100, ince agregada oranı %95 ve LA oranı %5, ince agregada oranı %90 ve LA oranı %10, ince agregada oranı %85 ve LA oranı %15 olmak üzere dört farklı agregada grubunun kombinasyonu sonucu 12 adet grup oluşturulmuştur.

Oluşturulan 12 adet grubun yüksek sıcaklık öncesi 28 günlük basınç dayanım değerleri Çizelge 4.2’de görülmektedir.

Çizelge 4.2 : Geopolimer harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı

Karışımlar	Basınç Dayanımı (MPa)
S100-SF0-W0	48,10
S100-SF0-W5	42,67
S100-SF0-W10	37,57
S100-SF0-W15	28,52
S95-SF5-W0	56,77
S95-SF5-W5	45,27
S95-SF5-W10	39,07
S95-SF5-W15	30,28
S90-SF10-W0	60,97
S90-SF10-W5	47,53
S90-SF10-W10	40,83
S90-SF10-W15	33,53



Şekil 4.1 : Numunelerin 28 günlük basınç dayanımı

Çizelge 4.2 ve Şekil 4.1’de görüldüğü gibi geopolimer harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları incelendiği zaman en yüksek basınç dayanımı (60,97 MPa) S90-SF10-W0 kodlu karışımda elde edilmiştir. En düşük basınç dayanımı ise (28,52 MPa) S100-SF0-W15 kodlu

karışımında elde edilmiştir. SD ikame oranı arttıkça numunelerin basınç dayanımları artarken, LA ikame oranı arttıkça numunelerin basınç dayanımları azalmıştır. SD içermeyen numunelerin basınç dayanımları, SD içeren numunelerin basınç dayanımları ile kıyaslandığı zaman; %5 SD içeren numunelerdeki dayanım artışları %4-18 arasında, %10 SD içeren numunelerdeki dayanım artışları ise %9-27 arasında olmuştur.

Mukavemette meydana gelen bu artışın nedeni, SD'nin spesifik yüzey alanının YFC'nin spesifik yüzey alanından yaklaşık 4,5 kat daha büyük olması ve $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ içeriğinin yaklaşık 2 kat daha yüksek olmasıdır. SD'nin ince yapısı; yoğun partikül dolgusu, gözenek boyutunda incelmeye ve daha iyi harç matrisi ile sonuçlanmıştır. SD'nin eklenmesi, geopolimerizasyon aşaması sırasında silokso köprülerinin (-Si-O-Si-O-) oluşumunu kolaylaştıran aktif Si_2O sağlamıştır. Bu köprü zincirleri, parçacıkların sıkı bir şekilde bağlanmasına neden olarak daha yoğun ve daha kompakt bir matris yapısı ile sonuçlanmıştır. Böylece geopolimer harçların basınç dayanımları artmaktadır.

%5 LA içeren geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımlarında azalmalar %11 ile %22 arasında iken, %10 LA içeren numunelerdeki bu düşüş %22 ile %33 arasında, %15 LA içeren numunelerde ise %41 ile %47 arasında olmuştur. LA oranı arttıkça numunelerin basınç dayanımında meydana gelen düşüşler; lastik atık ile geopolimer harç arasında meydana gelen bağ eksikliğinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca LA parçacıklarının geopolimer harç içerisinde homojen olmayan dağılımından dolayı harç mukavemetinde azalmalar meydana gelmiştir.

Zaetang vd. (2019) yaptıkları çalışmada geopolimer harç ve PÇ'li harç olmak üzere iki farklı grupta numune üretmiştir. Geopolimer üretiminde YFC kullanmıştır. Üretilen iki grup harçta agrega ikamesi olarak %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında LA kullanmıştır. Elde edilen grupların basınç dayanımları incelenmiştir. Geopolimer harç numunelerinde LA ikamesi %0 oranında iken basınç dayanımı 37,4 MPa olarak ölçülmüş olup; %25 LA ikamesinde 12,3 MPa, %50 LA ikamesinde 6,5 MPa, %75 LA ikamesinde 4,1 MPa, %100 LA ikamesinde ise 2,7 MPa olarak ölçülmüştür. PÇ'li harç numunelerinde ise LA ikamesi %0 oranında iken basınç dayanımı 46,1 MPa olarak ölçülmüş olup; %25 LA ikamesinde 20,8 MPa, %50 LA ikamesinde 7,8 MPa, %75 LA ikamesinde 4,3 MPa, %100 LA ikamesinde ise 3,3 MPa olarak ölçülmüştür. LA ikamesi arttıkça basınç dayanım değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir.

Süleyman ve Mermerdaş (2022) yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer harç üretmişlerdir. Agregası olarak dere kumuna hacimce %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında 0-4 mm tane çapına sahip LA ikame edilmiştir. Belirlenen parametreler sonucu üretilen geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımları incelenmiştir. En yüksek basınç dayanım değerine LA

ikamesiz numune grubunda 35,8 MPa ile ulaşılmış olup LA ikamesi arttıkça basınç dayanım değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. En düşük basınç dayanım değeri ise %50 LA ikameli numune grubunda 12,3 MPa olarak ölçülmüştür.

Raksuntorn vd. (2021) yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer harç üretmişlerdir. Agregada dere kumu kullanılmıştır ve agregada ağırlıkça %0, %10, %20 ve %30 oranlarında LA ikamesi yapılmıştır. Belirlenen parametreler sonucu üretilen geopolimer harç numunelerinin basınç dayanım değerleri tayin edilmiştir. Basınç dayanım değerleri incelendiği zaman ikamesiz geopolimer harç numunesinin basınç dayanım değeri 58,7 MPa iken bu değer %30 LA ikamesi ile 13,7 MPa'ya düşmüştür. LA ikamesi arttıkça basınç dayanım değerinde düzenli düşüşler gözlemlenmiştir.

Azmi vd. (2019), yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer beton üretmişlerdir. Agregada dere agregası kullanılmıştır. İnce agregaya hacimce %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında LA ikamesi yapılmıştır. Tamamlanan kür süresinin ardından geopolimer beton numunelerinin basınç dayanım değerleri tayin edilmiştir. Basınç dayanım değerleri incelendiği zaman, LA ikamesiz geopolimer beton numunelerinin basınç dayanım değeri 67,3 MPa olarak ölçülmüştür. Basınç dayanım değeri %5, %10, %15 ve %20 oranlarında LA ikamesine bağlı olarak sırasıyla %50, %58, %72 ve %83 oranlarında azalmıştır. LA ikamesi arttıkça dayanım değerlerinde düşüşler gözlemlenmiştir.

Abdelmonim ve Bompa (2021), yaptıkları çalışmada granüle YFC esaslı, UK ve SD ikameli geopolimer harç üretmişlerdir. Agregada dere kumuna ikame olarak hacimce %0, 10, 20 ve 30 oranlarında LA kullanılmıştır. LA (0-0,5 mm), (0-2,5 mm) ve (0-4 mm) olmak üzere üç farklı boyutta kullanılmıştır. Belirlenen parametreler sonucu üretilen geopolimer harç numunelerinin 28 günlük oda koşullarında kür süresi sonunda basınç dayanım değerleri incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek basınç dayanım değeri LA ikamesi yapılmamış olan grupta (50,6 MPa) olarak ölçülmüştür. Bu değer (0-0,5 mm) tane çapına sahip LA ikamesi incelendiğinde %10, %20 ve %30'da sırasıyla %37, %56 ve %56 oranlarında azalmıştır. (0-2,5 mm) tane çapına sahip LA ikamesi incelendiğinde %10, %20 ve %30'da sırasıyla %32, %40 ve %58 oranlarında azalmıştır. (0-4 mm) tane çapına sahip LA ikamesi incelendiğinde %10, %20 ve %30'da sırasıyla %31, %46 ve %48 oranlarında azalmıştır. LA ikamesinde kullanılan malzemenin tane çapı arttıkça geopolimer harç numunelerinin basınç dayanım değerlerinde artış görülürken, aynı tane çapına sahip LA ikamesi yapılmış gruplar için LA ikame yüzdesi arttıkça basınç dayanım değerlerinde düşüşler gözlemlenmiştir.

Dong vd. (2021) yaptığı çalışmada %80 UK ve %20 YFC kullanarak geopolimer beton üretmiştir. Agregada olarak ağırlıkça %0, %15 ve %30 oranlarında LA kullanmıştır. Kullanılan LA miktarı gruplara göre değişiklik göstermekle birlikte 2-5 mm boyutlarında ince LA ve 5-7 mm boyutlarında iri LA'dan oluşmaktadır. Ağırlıkça farklı oranlarda kullanılan LA ikamesinde, mevcut ikame yüzdesinin içerisinde olmak şartı ile %100 ince LA, %50 ince LA ve %50 iri LA, %100 iri LA olmak üzere üç grupta incelemiştir. Yapılan parametreler sonucu elde edilen 10 adet deney grubu üzerinde basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Numunelerde LA ikamesi arttıkça basınç dayanımlarında azalmalar meydana gelmiştir. Kontrol numunesinin 56 günlük basınç dayanımı 61,4 MPa iken %15 LA ikamesinde basınç dayanımı 20,8 MPa, %30 LA ikamesinde ise basınç dayanımı 7,3 MPa olarak ölçülmüştür.

Luhar vd. (2018) yaptığı çalışmada geopolimer beton üretmiştir. Üretilen geopolimer betonda bağlayıcı olarak %100 UK kullanmıştır. Agregada ise %100 doğal dere agregası ve %75 doğal dere agregası ile %25 LA ikamesi kullanmıştır. Alkali aktivasyonunu sağlamak için 14 mol NaOH kullanmış ve sodyum hidroksit/sodyum silikat oranını 2,5 olarak almıştır. Bağlayıcı/Çözelti oranını 0,4 olarak deney gruplarını oluşturmuştur. Yapılan deneyler sonucunda %100 doğal dere agregası kullanılarak elde edilen deney grubu numunesinin basınç dayanım değeri 54,0 MPa iken %25 LA ikamesi ile oluşturulan deney grubu numunesinin basınç dayanım değeri 47,33 MPa olarak gözlenmiştir. Basınç dayanım değerinde meydana gelen %11,4 oranında azalışın kaynağı olarak LA ikamesi gösterilmiştir.

Aly vd. (2019) yaptığı çalışmada geopolimer beton üretmiştir. Üretilen geopolimer betonda bağlayıcı olarak granüle YFC kullanılmıştır. Karışım dizaynında granüle YFC nun dozajı 500 kg/m³ alınmıştır. Alkali aktivatör olarak NaOH ve sodyum silikat kullanılmıştır. Agregada olarak %65 doğal dere kumu ve %35 kırılmış dolomit kullanılmıştır. Karışım dizaynında agrega ikamesi olarak %0, %10, %20 ve %30 oranlarında LA kullanılmıştır. Elde edilen numune grupları üzerinde basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda 28 günlük kürlenme süresinin ardından LA ikamesi içermeyen kontrol numunesinde basınç dayanım değeri 37,4 MPa iken %10 LA ikamesinde 40 MPa, %20 LA ikamesinde 28,3 MPa, %30 LA ikamesinde ise 24,8 MPa olarak ölçülmüştür. LA ikamesi arttıkça basınç dayanımında düşüşler gözlenmiştir.

Liu vd. (2012) yaptığı çalışmada PÇ içeren geleneksel beton üretmiştir. Karışımında bağlayıcı olarak 42,5 R PÇ kullanılmıştır. Agregada olarak 0-5 mm doğal dere agregası, 5-10 mm doğal kırma taş agregası ve sırasıyla 0,178 mm, 1,1 mm ve 2 mm boyutlarında ufalanmış LA ikamesi kullanmıştır. Agregada hacimce %0, %5, %10, %15 ve %20 LA ikamesi yapılmıştır. Üretilen

geleneksel beton numunelerin 28 günlük basınç dayanımları %0 LA ikamesi içeren betonda 49,7 MPa iken %5 LA ikamesinde 45,7 MPa, %10 LA ikamesinde 40,9 MPa, %15 LA ikamesinde 33,0 MPa ve %20 LA ikamesinde 28,1 MPa olarak ölçülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda mevcut geleneksel beton numunelerinde LA ikamesi arttıkça basınç dayanım değerlerinde düşmeler meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Eldin ve Senouci (1993) yaptıkları çalışmada geleneksel beton üretimi yapmıştır. Üretilen geleneksel beton numunelerinde bağlayıcı olarak PÇ kullanılmıştır. Agrega olarak ise %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında LA ikamesi yapılmıştır. Yapılan parametler sonucu elde edilen beton numune gruplarının basınç dayanım değerleri tayin edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda %0 LA ikamesi içeren betonda 34,3 MPa basınç dayanım değeri elde edilirken bu değer %25 LA ikamesi ile 19,7 MPa, %50 LA ikamesi ile 12,3 MPa, %75 LA ikamesi ile 10,2 MPa ve %100 LA ikamesi ile 9,8 MPa olarak ölçülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda mevcut geleneksel beton numunelerinde LA ikamesi arttıkça basınç dayanım değerlerinde düşmeler meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Khaloo vd. (2008) yaptıkları çalışmada geleneksel beton üretimi yapmıştır. Üretilen geleneksel betonda bağlayıcı olarak PÇ kullanılmış ve dozaj 350 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Karışımda agrega olarak doğal mineral agregası ince daneli (0-4 mm) ve iri daneli (4-8 mm) boyutlarında kullanılmıştır. İlk olarak %100 iri agrega oranı sabit tutulmuş ve ince agregaya %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında hacimce LA ikamesi yapılmıştır. Sonrasında ise %100 ince agrega oranı sabit tutulmuş ve iri agregaya %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında hacimce LA ikamesi yapılmıştır. Bu gruplara ek olarak %25 iri LA ve %25 ince LA ikameli bir grup, %50 iri LA ve %50 ince LA ikameli bir diğer grup olmak üzere toplam 11 adet deney grubuna basınç dayanım deneyi yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda %0 LA ikamesi içeren kontrol numunesinde 30,9 MPa basınç dayanım değerine ulaşılrken; %25 iri LA ikamesinde 6,7 MPa, %25 ince LA ikamesinde 6,3 MPa, %50 iri LA ikamesinde 1,7 MPa, %50 ince LA ikamesinde 1,5 MPa, %75 iri LA ikamesinde 0,9 MPa, %75 ince LA ikamesinde 0,7 MPa, %100 iri LA ikamesinde 0,4 MPa ve %100 ince LA ikamesinde 0,3 MPa basınç dayanım değerlerine ulaşılmıştır. Elde edilen değerler sinucunda LA ikamesi arttıkça basınç dayanımında düşüşler gözlemlenmiştir.

Dong vd. (2021) yaptıkları çalışmada UK ve granüle YFC kullanarak geopolimer beton üretmişlerdir. Ağırlıkça %80 UK ve %20 granüle YFC içeren 400 kg/m^3 dozaja sahip bağlayıcı ile hazırlanan geopolimer betonda alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. İnce (0-4 mm) ve iri (4-8 mm) doğal dere agregasına hacimce %0, %15 ve %30

oranlarında LA ikamesi yapılmıştır. 28 günlük basınç dayanımları incelenmiştir. %0 LA ikamesinde 28 günlük basınç dayanımı 57,9 MPa iken bu değer %15 LA ikamesinde 19,62 MPa ve %30 LA ikamesinde 6,2 MPa olarak ölçülmüştür. Yapılan deneyler sonucu LA ikame oranı arttıkça numunelerin basınç dayanım değerlerinde düşüş gözlenmiştir.

Luhar vd. (2019) yaptıkları çalışmada geopolimer beton ve geleneksel beton olmak üzere iki farklı beton üretimi gerçekleştirmişlerdir. Üretilen geleneksel betonda PÇ kullanılmıştır ve dozaj 450 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Agregada ise doğal dere agregası kullanılmıştır. Üretilen geopolimer betonda ise bağlayıcı olarak UK kullanılmıştır. Çözelti/bağlayıcı oranını 0,4 olarak alınmıştır. Alkali aktivatör olarak kullanılan NaOH 14 mol kullanılmıştır. Üretilen geopolimer ve geleneksel beton numunelerinde agregalarda doğal dere agregasına ikame olarak %0, %10, %20 ve %30 oranlarında LA kullanılmıştır. Belirlenen karışım dizaynına uygun beton üretimi yapılmıştır ve üretilen betonlarda basınç dayanım değerleri incelenmiştir. 28 günlük kür süresinin ardından ölçülen basınç dayanım değerleri geopolimer beton numunelerinde %0 LA ikamesi için 54,00 MPa iken bu değer %10 LA ikamesinde 48,33 MPa, %20 LA ikamesinde 40,00 MPa ve %30 LA ikamesinde 30 MPa olarak ölçülmüştür. Geleneksel betonda numunelerinde 28 günlük kür süresinin ardından basınç dayanım değerleri %0 LA ikamesi için 53,15 MPa iken bu değer %10 LA ikamesinde 42,5 MPa, %20 LA ikamesinde 34,73 MPa ve %30 LA ikamesinde 25,43 MPa olarak ölçülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda LA ikamesi arttıkça basınç dayanım değerlerinde düşme meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Long vd. (2018) yaptıkları çalışmada üretilen geopolimer beton numunelerinde bağlayıcı olarak granüle YFC kullanılmıştır. Çözelti/bağlayıcı oranı 0,44 seçilmiş olup alkali aktivatör olarak NaOH ve sodyum silikat kullanılmıştır. Kullanılan NaOH 7,5 mol seçilmiştir. Agregada olarak doğal dere agregası seçilmiş ve hacimce %0, %20, %40 ve %60 oranlarında LA ikamesi yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu üretilen geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımları ölçülmüştür. %0 LA ikamesi içeren kontrol numunesinde 28 günlük kürleme sonucu ölçülen basınç dayanımı değeri 57,3 MPa iken bu değer %20 LA ikamesi ile 32,4 MPa, %40 LA ikamesi ile 20,8 MPa, %60 LA ikamesi ile 14,3 MPa olarak ölçülmüştür. Geopolimer beton numunelerinde LA ikame oranı arttıkça basınç dayanımında düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

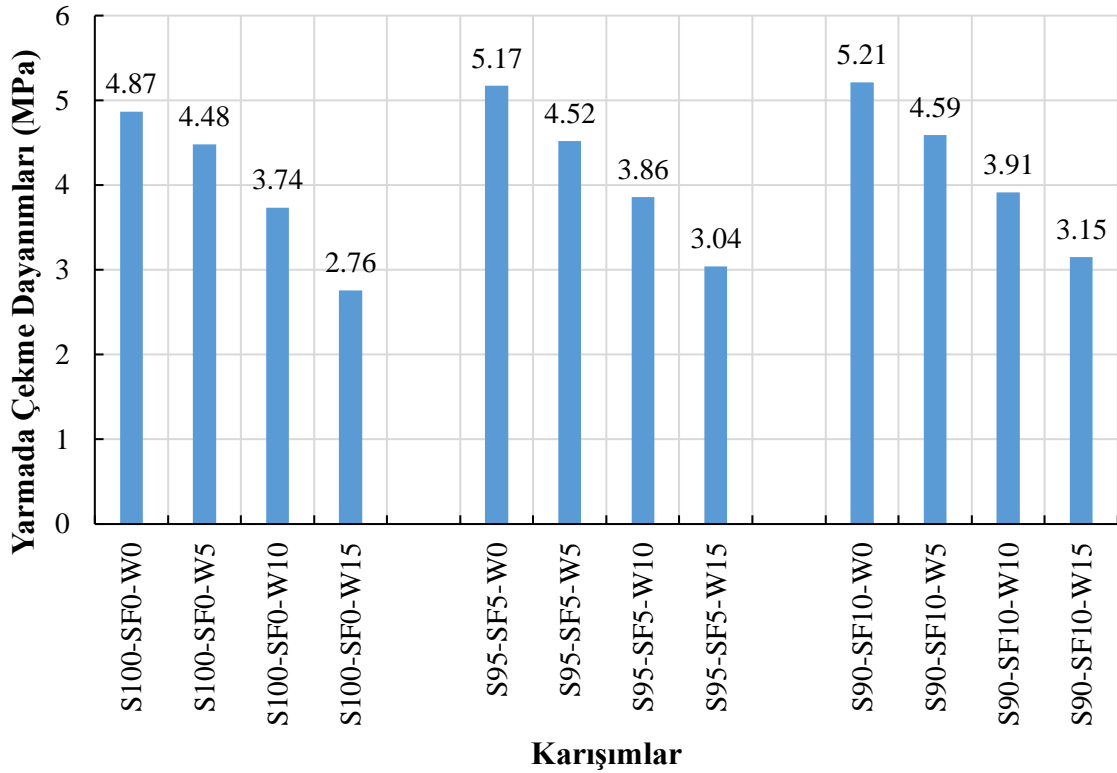
4.2.1.2. Geopolimer harç kontrol numunelerinin yarmada çekme dayanımı

Yapılan çalışmada 12 adet deney grubu 28 günlük kür süresinin ardından Materyal ve Yöntem kısmında belirtilen şekilde yarmada çekme dayanımı testine tâbi tutulmuştur. Yarmada çekme dayanımı değerleri Çizelge 4.3'te ve Şekil 4.2'de verilmiştir. Numunelerin yarmada çekme

mukavemeti SD ikamesi ile %0,8 ile %14,1 arasında artarken, LA ikamesi ile bu değerler %7,9 ile %43,3 arasında azalmıştır.

Çizelge 4.3 : Geopolimer harç numunelerinin yarmada çekme dayanımları

Karışımlar	Yarmada Çekme Dayanımları (MPa)
S100-SF0-W0	4,87
S100-SF0-W5	4,48
S100-SF0-W10	3,74
S100-SF0-W15	2,76
S95-SF5-W0	5,17
S95-SF5-W5	4,52
S95-SF5-W10	3,86
S95-SF5-W15	3,04
S90-SF10-W0	5,21
S90-SF10-W5	4,59
S90-SF10-W10	3,91
S90-SF10-W15	3,15



Şekil 4.2 : Geopolimer numunelerin 28 günlük yarmada çekme dayanımları

Aly vd. (2019) yaptığı çalışmada geopolimer beton üretmiştir. Üretilen geopolimer betonda bağlayıcı olarak granüle YFC kullanılmıştır. Karışım dizaynında granüle YFC nun dozajı 500 kg/m³ alınmıştır. Alkali aktivatör olarak NaOH ve sodyum silikat kullanılmıştır. Agregada olarak %65 doğal dere kumu ve %35 kırılmış dolomit kullanılmıştır. Karışım dizaynında agregada ikamesi olarak %0, %10, %20 ve %30 oranlarında LA kullanılmıştır. Elde edilen numune grupları üzerinde yarmada çekme dayanımı testine tâbi tutmuşlardır. Yapılan deneyler sonucu %0 LA ikamesi içeren grup numunelerinde yarmada çekme dayanımı 3,6 MPa iken bu değer, %10 LA ikamesinde %34,60 azalma ile 2,355 MPa değerine, %20 LA ikamesinde %23,00 azalma ile 2,77 MPa değerine, %30 LA ikamesinde ise %35,50 azalma ile 2,32 MPa değerine düşmüştür. Yapılan deneyler sonucunda LA ikamesi arttıkça numunelerin yarmada çekme dayanım değerlerinde düşüş gözlenmiştir.

Dong vd. (2021) yaptıkları çalışmada UK ve granüle YFC kullanarak geopolimer beton üretmişlerdir. Ağırlıkça %80 UK ve %20 granüle YFC içeren 400 kg/m³ dozaja sahip bağlayıcı ile hazırlanan geopolimer betonda alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. İnce (0-4 mm) ve iri (4-8 mm) doğal dere agregasına hacimce %0, %15 ve %30 oranlarında LA ikamesi yapılmıştır. 28 günlük yarmada çekme dayanımları incelenmiştir. %0 LA ikamesinde 28 günlük yarmada çekme dayanımı 3,5 MPa iken bu değer %15 LA ikamesinde 1,2 MPa ve %30 LA ikamesinde 0,7 MPa olarak ölçülmüştür. Yapılan deneyler sonucu LA ikame oranı arttıkça numunelerin yarmada çekme dayanım değerlerinde düşüş gözlenmiştir.

Luhar vd. (2019) yaptıkları çalışmada geopolimer beton ve geleneksel beton olmak üzere iki farklı beton üretimi gerçekleştirmişlerdir. Üretilen geleneksel betonda PÇ kullanılmıştır ve dozaj 450 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Agregada ise doğal dere agregası kullanılmıştır. Üretilen geopolimer betonda ise bağlayıcı olarak UK kullanılmıştır. Çözelti/bağlayıcı oranını 0,4 olarak alınmıştır. Alkali aktivatör olarak kullanılan NaOH 14 mol kullanılmıştır. Üretilen geopolimer ve geleneksel beton numunelerinde agregalarda doğal dere agregasına ikame olarak %0, %10, %20 ve %30 oranlarında LA kullanılmıştır. Belirlenen karışım dizaynına uygun beton üretimi yapılmıştır ve üretilen betonlarda basınç dayanım değerleri incelenmiştir. 28 günlük kür süresinin ardından ölçülen yarmada çekme dayanım değerleri geopolimer beton numunelerinde %0 LA ikamesi için 5,08 MPa iken bu değer %10 LA ikamesinde 5,13 MPa, %20 LA ikamesinde 5,24 MPa ve %30 LA ikamesinde 5,30 MPa olarak ölçülmüştür. Geleneksel betonda numunelerinde 28 günlük kür süresinin ardından yarmada çekme dayanım değerleri %0 LA ikamesi için 4,00 MPa iken bu değer %10 LA ikamesinde 4,11 MPa, %20 LA ikamesinde 4,2

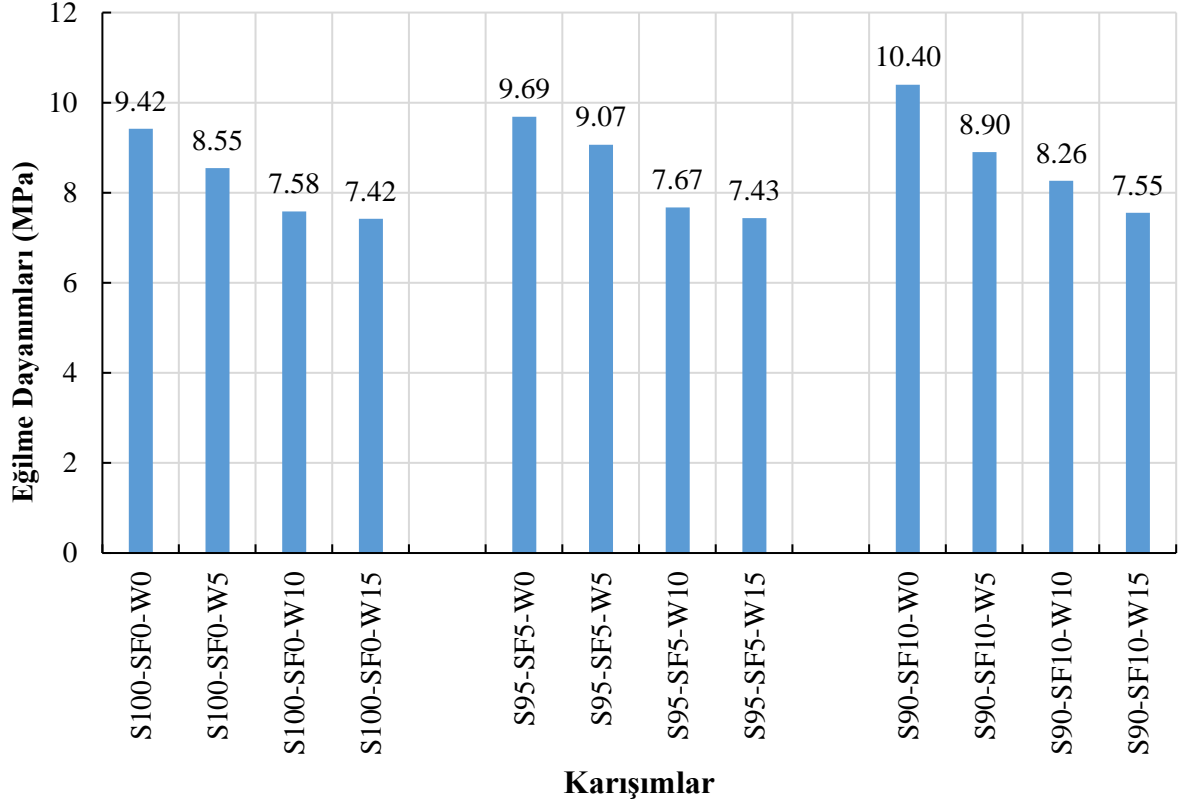
MPave %30 LA ikamesinde 4.27 MPa olarak ölçülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda LA ikamesi arttıkça yarmada çekme dayanım değerlerinde artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.

4.2.1.3. Geopolimer harç kontrol numunelerinin eğilme dayanımı

Yapılan çalışmalar sonucu üretilen geopolimer harç numunelerin 28 günlük kür süresinin ardından ölçülen eğilme dayanım değerleri Çizelge 4.4'te ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Veriler incelendiği zaman LA ikamesi arttıkça numunelerin eğilme mukavemetlerinde azalış meydana geldiği görülmüştür. SD içermeyen numunelerin eğilme mukavemetleri 7,42 ile 9,42 MPa arasında, %5 SD içeren numunelerin eğilme mukavemetleri 7,43 ile 9,69 MPa arasında ve %10 SD içeren numunelerin eğilme mukavemeti 7,55 ile 10,40 MPa arasında olduğu gözlemlenmiştir. SD ikamesi numunelerin eğilme dayanımlarını %0,21 ile %10,40 arasında arttırırken, LA ikamesi ile numunelerin eğilme dayanımları %6,40 ile %27,39 arasında azaltmıştır. LA'nın düşük elastisite modülü ve LA ile geopolimer hamur arasındaki düşük yapışma mukavemeti nedeniyle numunelerin eğilme mukavemetlerinde kayıplar meydana gelmiştir (Ameri vd., 2020).

Çizelge 4.4 : Geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımları

Karışımlar	Eğilme Dayanımları (MPa)
S100-SF0-W0	9,42
S100-SF0-W5	8,55
S100-SF0-W10	7,58
S100-SF0-W15	7,42
S95-SF5-W0	9,69
S95-SF5-W5	9,07
S95-SF5-W10	7,67
S95-SF5-W15	7,43
S90-SF10-W0	10,40
S90-SF10-W5	8,90
S90-SF10-W10	8,26
S90-SF10-W15	7,55



Şekil 4.3 : Geopolimer numunelerin eğilme dayanımları

Long vd. (2018) yaptıkları çalışmada üretilen geopolimer beton numunelerinde bağlayıcı olarak granüle YFC kullanmışlardır. Çözelti/bağlayıcı oranı 0,44 seçilmiş olup alkali aktivatör olarak NaOH ve sodyum silikat kullanılmıştır. Kullanılan NaOH 7,5 mol seçilmiştir. Agrega olarak doğal dere agregası seçilmiş ve hacimce %0, %20, %40 ve %60 oranlarında LA ikamesi yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu üretilen geopolimer beton numunelerinin eğilme dayanımları ölçülmüştür. %0 LA ikamesi içeren kontrol numunesinde 28 günlük küreleme sonucu ölçülen eğilme dayanımı değeri 15,3 MPa iken bu değer %20, %40 ve %60 LA ikamesi ile sırasıyla %10, %33, %45 oranlarında azalmıştır. Geopolimer beton numunelerinde LA ikame oranı arttıkça eğilme dayanımında düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

Süleyman ve Mermerdaş (2022) yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer harç üretmişlerdir. Agrega olarak dere kumuna hacimce %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında 0-4 mm tane çapına sahip LA ikame edilmiştir. Belirlenen parametreler sonucu üretilen geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımları incelenmiştir. Eğilme dayanımlarında LA ikame yüzdesi arttıkça düşüş gözlemlenmiştir. LA ikamesiz numune grubunda eğilme dayanım değeri 5,3 MPa iken bu değer %50 LA ikamesinde 2,3 MPa'ya düşmüştür.

Zaetang vd. (2019) yaptıkları çalışmada geopolimer beton ve geleneksel beton olmak üzere iki farklı grupta beton üretmiştir. Geopolimer üretiminde YFC, geleneksel beton üretiminde ise PÇ kullanmıştır. Üretilen iki grup betonda agrega ikamesi olarak %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında LA kullanmıştır. Elde edilen grupların eğilme dayanımları incelenmiştir. 28 günlük kür süresi sonunda geopolimer betonda 4,4 MPa değerinde eğilme dayanımı elde ederken geleneksel betonda ise 5,6 MPa eğilme dayanımı elde etmiştir. Geopolimer beton numunelerinde LA ikamesi %0 oranında iken eğilme dayanımı 4,4 MPa olarak ölçülmüş olup; bu değer %25, %50, %75 ve %100 LA ikamesinde sırasıyla %52, %61, %70 ve %77 oranlarında azalmıştır. Geleneksel beton numunelerinde ise LA ikamesi %0 oranında iken eğilme dayanımı 5,6 MPa olarak ölçülmüş olup; bu değer %25, %50, %75 ve %100 LA ikamesinde sırasıyla %41, %73, %85 ve %94 oranlarında azalmıştır. Yapılan deneyler sonucunda geopolimer beton ve geleneksel betonda agrega olarak LA ikame oranı arttıkça eğilme dayanımlarında düşüşler olduğu gözlemlenmiştir.

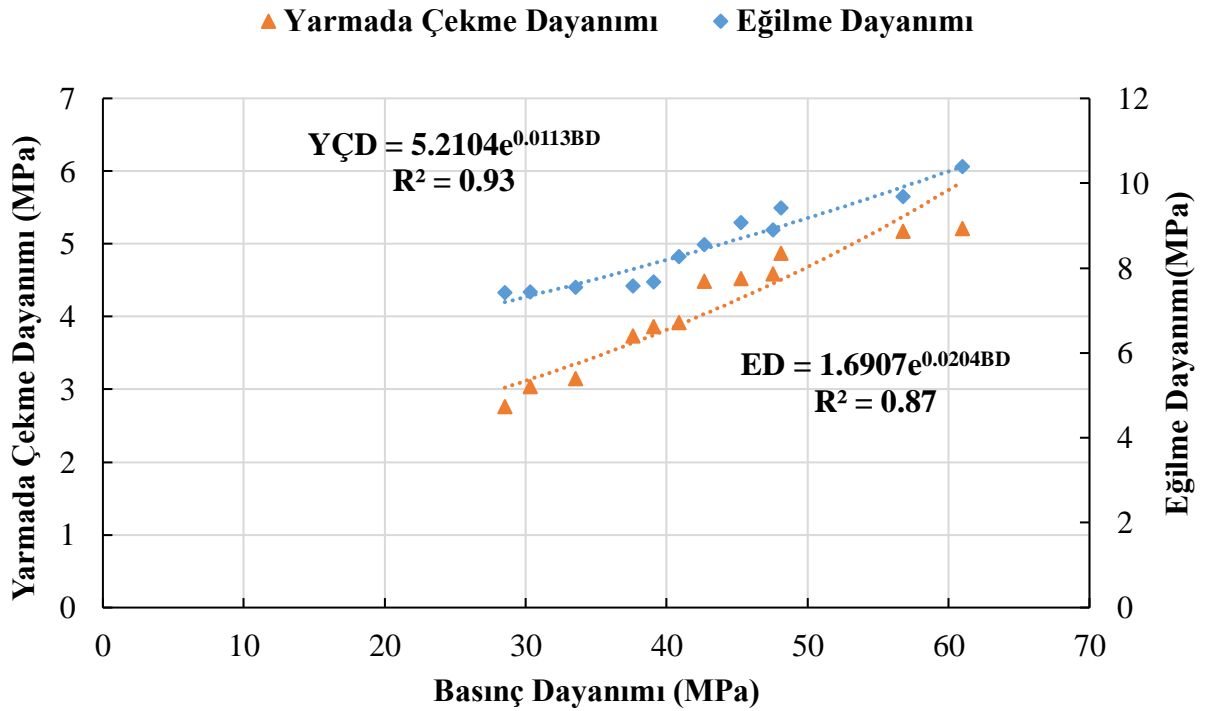
Aly vd. (2019) yaptıkları çalışmada geopolimer beton üretmişlerdir. Üretilen geopolimer betonda bağlayıcı olarak granüle YFC kullanılmıştır. Karışım dizaynında granüle YFC nun dozajı 500 kg/m^3 alınmıştır. Alkali aktivatör olarak NaOH ve sodyum silikat kullanılmıştır. Agrega olarak %65 doğal dere kumu ve %35 kırılmış dolomit kullanılmıştır. Karışım dizaynında agrega ikamesi olarak %0, %10, %20 ve %30 oranlarında LA kullanılmıştır. Elde edilen numune grupları üzerinde eğilme dayanımı deneyi yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda 28 günlük kürleme süresinin ardından LA ikamesi içermeyen kontrol numunesinde eğilme dayanımı değeri 2,5 MPa iken %10 LA ikamesinde bu değer %20 azalarak 2 MPa, %20 LA ikamesinde bu değer %30 azalarak 1,75 MPa, %30 LA ikamesinde ise bu değer %30 azalarak 1,75 MPa olarak ölçülmüştür. LA ikamesi arttıkça eğilme dayanımında düşüşler gözlenmiştir.

Luhar vd. (2019) yaptıkları çalışmada geopolimer beton ve geleneksel beton olmak üzere iki farklı beton üretimi gerçekleştirmişlerdir. Üretilen geleneksel betonda PÇ kullanılmıştır ve dozaj 450 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Agregada ise doğal dere agregası kullanılmıştır. Üretilen geopolimer betonda ise bağlayıcı olarak UK kullanılmıştır. Çözelti/bağlayıcı oranı 0,4 olarak alınmıştır. Alkali aktivatör olarak kullanılan NaOH 14 mol kullanılmıştır. Üretilen geopolimer ve geleneksel beton numunelerinde agregalarda doğal dere agregasına ikame olarak %0, %10, %20 ve %30 oranlarında LA kullanılmıştır. Belirlenen karışım dizaynına uygun beton üretimi yapılmıştır ve üretilen betonlarda eğilme dayanım değerleri incelenmiştir. 28 günlük kür süresinin ardından ölçülen eğilme dayanım değerleri geopolimer beton numunelerinde %0 LA

ikamesi için 6,45 MPa iken bu değer %10 LA ikamesinde 6,52 MPa, %20 LA ikamesinde 6,66 MPa ve %30 LA ikamesinde 6,8 MPa olarak ölçülmüştür. Geleneksel beton numunelerinde 28 günlük kür süresinin ardından eğilme dayanım değerleri %0 LA ikamesi için 5,35 MPa iken bu değer %10 LA ikamesinde 5,38 MPa, %20 LA ikamesinde 5,42 MPa ve %30 LA ikamesinde 5,6 MPa olarak ölçülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda LA ikamesi arttıkça eğilme dayanım değerlerinde artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.

4.2.1.4. Geopolimer harç kontrol numunelerinin basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı arasındaki korelasyon

Basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı değerleri arasındaki korelasyon Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki korelasyon %87 ve basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki korelasyon %93'tür. Bu değerler numunelerin mekanik özelliklerinin tutarlı olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.4 : Basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı arasındaki korelasyon

Bheel vd. (2021) yaptıkları çalışmada metakaolin esaslı kendiliğinden yerleşen betonların basınç ve eğilme dayanımları ile basınç ve yarmada çekme dayanımları arasındaki ilişkinin korelasyon katsayılarının sırasıyla %99,8 ve %99,3 olduğunu bildirmiştir.

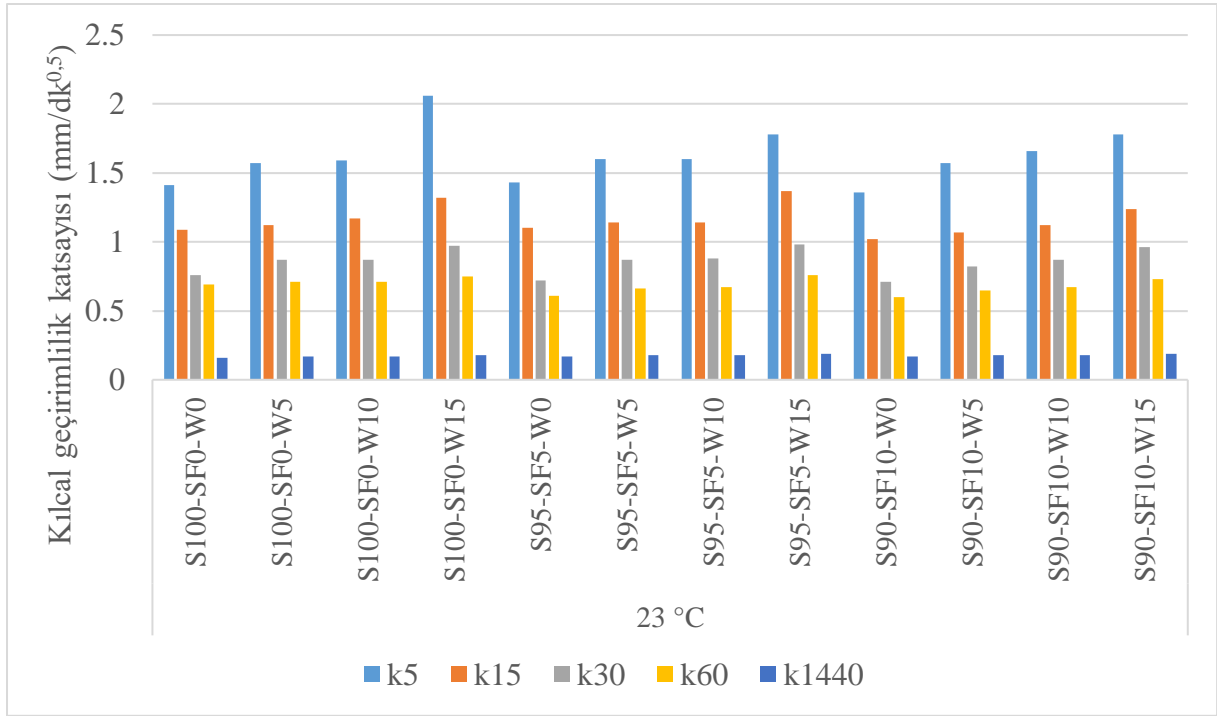
Jindal vd. (2017) yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer betonların basınç dayanımları ile yarmada çekme dayanımları arasındaki ilişkinin korelasyon katsayısının %92 olduğunu bildirmiştir.

4.2.1.5. Geopolimer harç kontrol numunelerinin kılcal geçirimsizliği

Yapılan çalışmalar sonucu kılcal geçirimsizlik deneyine tâbi tutulan geopolimer harç kontrol numunelerinin kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri Çizelge 4.5'te ve Şekil 4.5'te verilmiştir. Numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı SD ikamesi arttıkça azalmıştır, LA ikamesi arttıkça da numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı artmıştır.

Çizelge 4.5 : Geopolimer harç numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı

Karışım adı	Kılcal geçirimsizlik katsayısı, (mm/dk ^(0.5))				
	k ₅	k ₁₅	k ₃₀	k ₆₀	k ₁₄₄₀
S100-SF0-W0	1,41	1,09	0,76	0,69	0,16
S100-SF0-W5	1,57	1,12	0,87	0,71	0,17
S100-SF0-W10	1,59	1,17	0,87	0,71	0,17
S100-SF0-W15	2,06	1,32	0,97	0,75	0,18
S95-SF5-W0	1,43	1,1	0,72	0,61	0,17
S95-SF5-W5	1,6	1,14	0,87	0,66	0,18
S95-SF5-W10	1,6	1,14	0,88	0,67	0,18
S95-SF5-W15	1,78	1,37	0,98	0,76	0,19
S90-SF10-W0	1,36	1,02	0,71	0,6	0,17
S90-SF10-W5	1,57	1,07	0,82	0,65	0,18
S90-SF10-W10	1,66	1,12	0,87	0,67	0,18
S90-SF10-W15	1,78	1,24	0,96	0,73	0,19



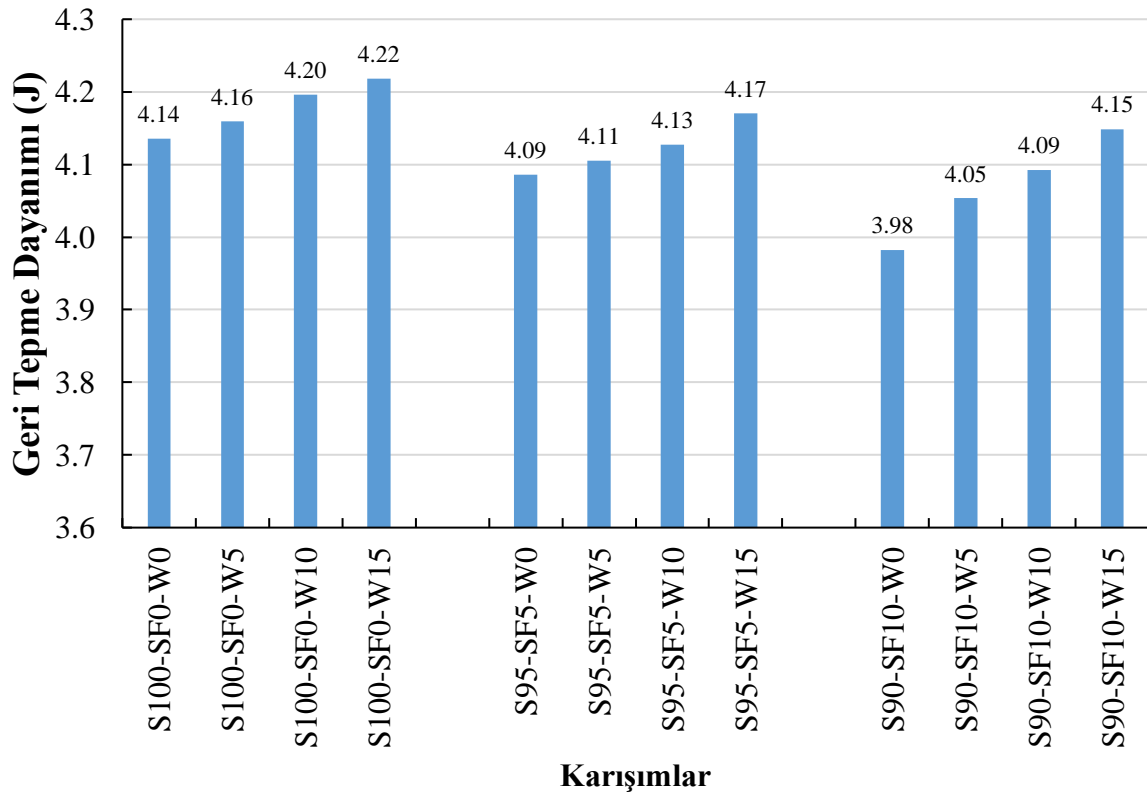
Şekil 4.5 : Numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı

4.2.1.6. Geopolimer harç kontrol numunelerinin geri tepme dayanımı

Yapılan çalışmalar sonucu üretilen geopolimer harç kontrol numunelerinin geri tepme testi ile belirlenen darbe dirençleri Şekil 4.6'da verilmiştir. Kontrol numunelerinin geri tepme ile belirlenen darbe direnç değerleri SD ikamesi arttıkça azalmaktadır, LA ikamesi arttıkça artmaktadır.

Çizelge 4.6 : Geopolimer harç numunelerin geri tepme dayanımı

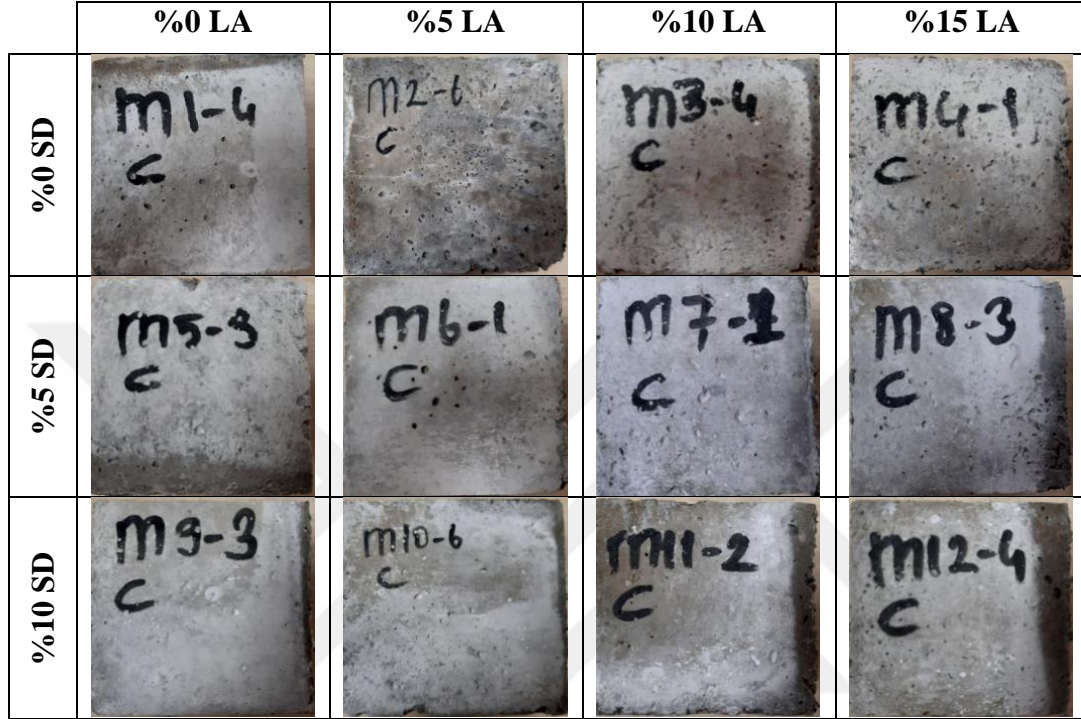
Karışım adı	Geri Tepme Dayanımı (J)
S100-SF0-W0	4,1358
S100-SF0-W5	4,1596
S100-SF0-W10	4,1964
S100-SF0-W15	4,2180
S95-SF5-W0	4,0861
S95-SF5-W5	4,1055
S95-SF5-W10	4,1272
S95-SF5-W15	4,1704
S90-SF10-W0	3,9822
S90-SF10-W5	4,0536
S90-SF10-W10	4,0925
S90-SF10-W15	4,1488



Şekil 4.6 : Numunelerin geri tepme dayanımı

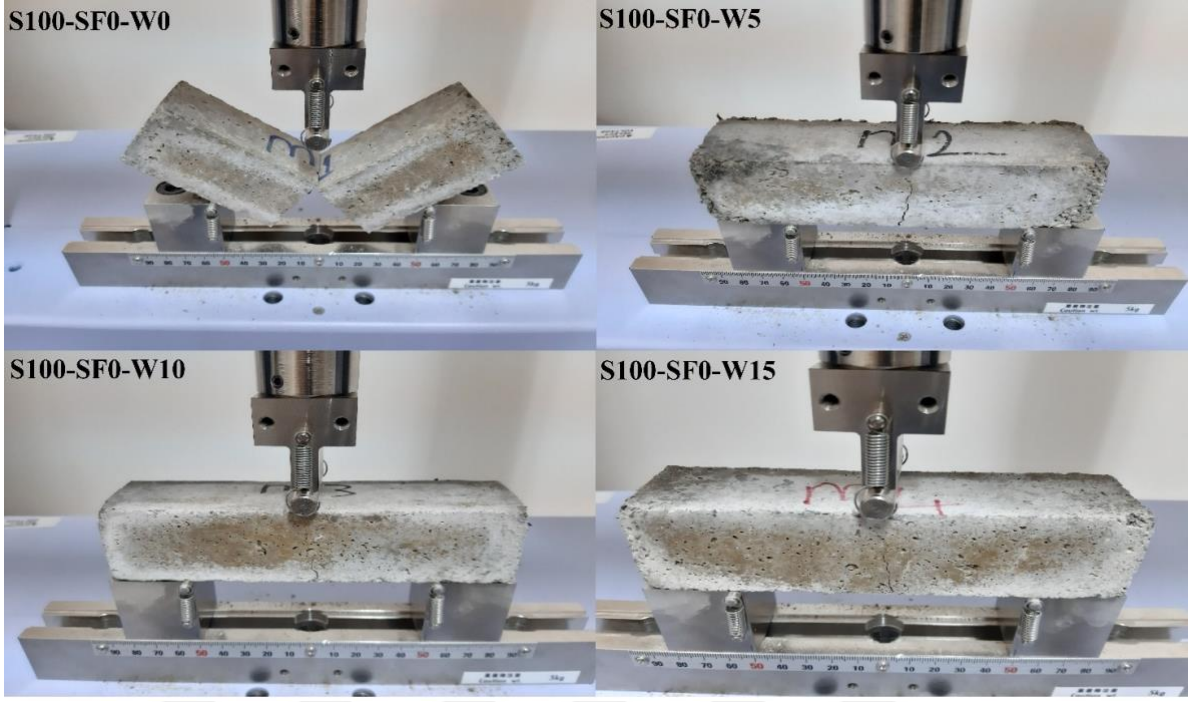
4.2.1.7. Geopolimer harç kontrol numunelerinin görsel incelemeleri

Yapılan deneyler sonucu üretilen geopolimer harç kontrol numunelerinin görüntüleri Şekil 4.7’de verilmiştir. Şekilde verilen harç numunelerin yüzeyleri incelendiğinde harç numunelerde LA ve SD ikamesi yüzeyde herhangi bir değişime neden olmamıştır.



Şekil 4.7 : Kontrol numunelerinin görsel analizi

Şekil 4.8’de görülen eğilme dayanımı testine tâbi tutulan numunelerin kırılma eksenleri incelenmiştir. Şekil 4.8’de görüldüğü gibi numunelerin içerisinde bulunan LA ikame oranı arttıkça numunede meydana gelen yükleme eksenine paralel oluşan kırılma eksenleri boyunca numunelerin gösterdiği kırılma direncinin arttığı görsel olarak tespit edilmiştir. LA ikame miktarı arttıkça incelenen numunelerde kırılma sonrasında numuneler ayrılmamış ve yükleme sonunda meydana gelen ve kırılma sırasında çıkan ses miktarında da düşüş gözlenmiştir. Geopolimer harç agrega içerisinde mevcut bulunan LA ikamesinde 0-4 mm boyutunda bulunan LA parçaları lif görevi görerek malzemenin kırılma direncini arttırmıştır.



Şekil 4.8 : Kontrol numunelerin eğilme dayanımı testi

4.2.2. Yüksek sıcaklık sonrası geopolimer harç numuneleri ile ilgili bulgular ve tartışma

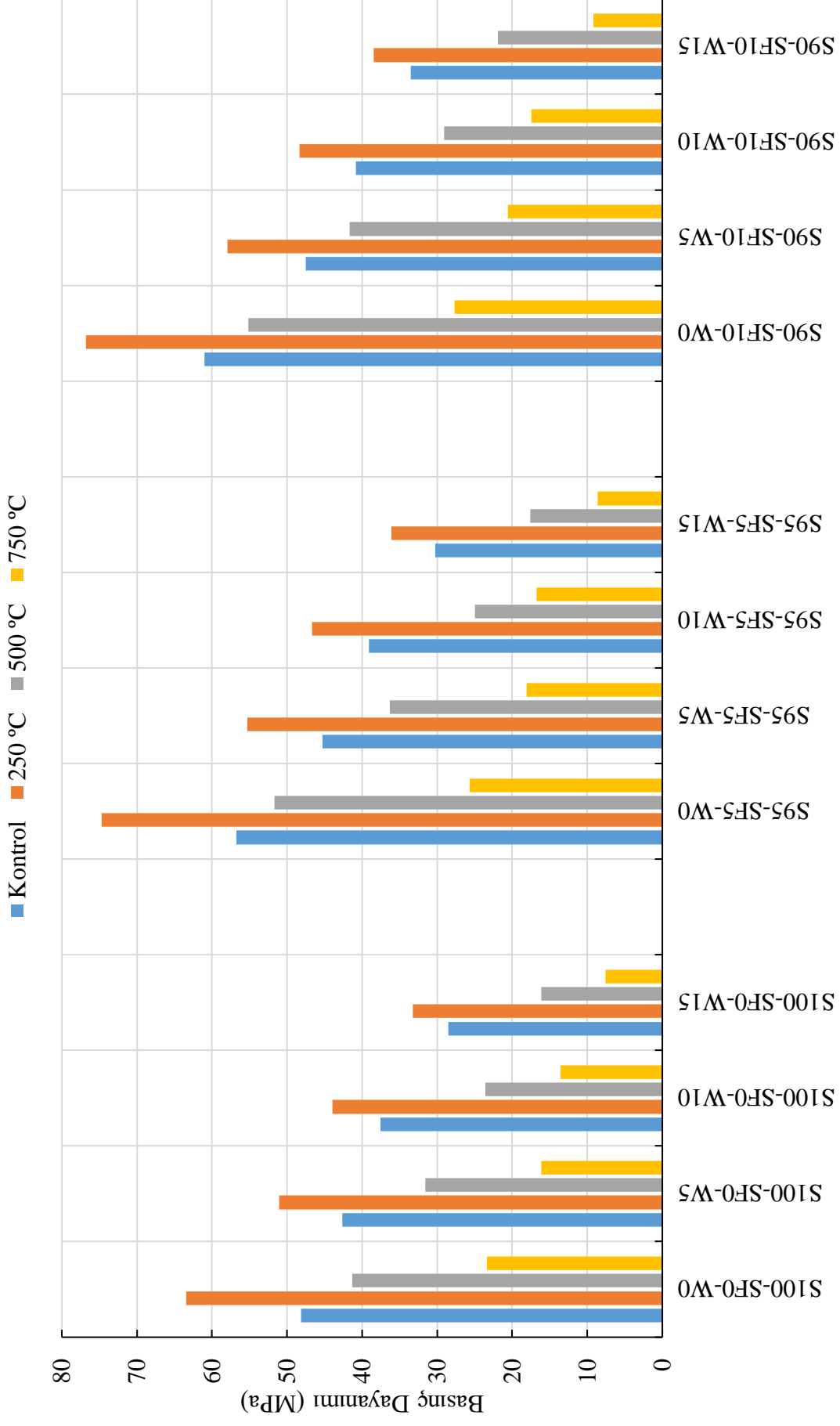
28 günlük kür süresini tamamlayan geopolimer harç numuneler 250, 500 ve 750 °C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık fırınının içerisine yerleştirilen numuneler hedeflenen sıcaklıklara ulaştıktan sonra 1 saat boyunca hedef sıcaklığa maruz bırakılmış ve ardından yüksek sıcaklık fırınının kapağı açılarak numuneler normal oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Numuneler soğumanın ardından basınç dayanımı, kılcal geçirimsizlik, geri tepme dayanımı, SEM analizi ve ağırlık kaybı değerlerinin tayini amacıyla gerekli deneylere tâbi tutulmuştur.

4.2.2.1. Yüksek sıcaklık sonrası geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan geopolimer harç numunelerin basınç dayanımları Çizelge 4.7' ve Şekil 4.9'da verilmiştir. Numunelerin 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı (60,97 MPa) S90-SF10-W0 kodlu karışımda elde edilmiştir. En düşük basınç dayanımı (28,52 MPa) S100-SF0-W15 kodlu karışımda elde edilmiştir. SD ikame oranı arttıkça numunelerin basınç dayanımı artarken, LA ikame oranı arttıkça numunelerin basınç dayanımları azalmıştır. SD içermeyen numunelerin basınç dayanımları, SD içeren numunelerin basınç dayanımları ile karşılaştırıldığında; %5 SD içeren numunelerin basınç dayanım artışları %4-18 arasında, %10 SD içeren numunelerdeki dayanım artışları ise %9-27 arasında olmuştur.

Çizelge 4.7 : Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası numunelerin basınç dayanımı

Karışımlar	Kontrol	250 °C	500 °C	750 °C
S100-SF0-W0	48,10	63,43	41,33	23,33
S100-SF0-W5	42,67	51,03	31,60	16,13
S100-SF0-W10	37,57	43,97	23,57	13,53
S100-SF0-W15	28,52	33,26	16,14	7,57
S95-SF5-W0	56,77	74,73	51,67	25,67
S95-SF5-W5	45,27	55,27	36,33	18,11
S95-SF5-W10	39,07	46,63	25,00	16,76
S95-SF5-W15	30,28	36,10	17,60	8,63
S90-SF10-W0	60,97	76,77	55,13	27,69
S90-SF10-W5	47,53	57,93	41,63	20,58
S90-SF10-W10	40,83	48,37	29,07	17,47
S90-SF10-W15	33,53	38,47	21,90	9,21



Şekil 4.9 : Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası numunelerin basınç dayanımı

Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer harç numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde 250 °C'ye maruz kalan numunelerde dayanım artışının meydana geldiği, 500 ve 750 °C'ye maruz kalan numunelerin dayanımlarında ise azalma olduğu görülmüştür. 250 °C'ye maruz bırakılan numunelerde mukavemet artış oranları %14,7 ile %31,9 arasında olmuştur. Numunelerdeki LA miktarı arttıkça basınç dayanım değerleri azalmıştır. 500 °C'deki numunelerde basınç dayanımındaki düşüş değerleri %8,9 ile %43,4 arasında iken, 750 °C'deki numunelerde basınç dayanımındaki düşüş değerleri %51,5 ile %73,5 arasında olmuştur. Artan LA içeriği ile numunelerdeki dayanım kayıpları artmıştır. Yüksek sıcaklıklarda eriyen ve numune dışına sızan LA, numunede boşluklara neden olarak numunelerin mekanik özelliklerinin olumsuz etkilenmesine neden olmuştur.

Luhar vd. (2018) yaptığı çalışmada geopolimer beton üretmiştir. Üretilen geopolimer betonda bağlayıcı olarak %100 UK kullanmıştır. Agregada ise %100 doğal dere agregası ve %75 doğal dere agregası ile %25 LA ikamesi kullanmıştır. Alkali aktivasyonunu sağlamak için 14 mol NaOH kullanmış ve sodyum hidroksit/sodyum silikat oranını 2,5 olarak almıştır. Bağlayıcı/Çözelti oranını 0,4 alarak deney gruplarını oluşturmuştur. Oluşturulan deney grupları oda koşullarında, 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C'de iki saatlik yüksek sıcaklık maruziyeti etkisinde bırakmıştır. Deney sonucunda numunelerin basınç dayanım değerleri incelenmiştir. Deney sonucunda elde edilen bulgulara göre; oda koşullarında LA ikamesiz numune grubunda basınç dayanımı 54 MPa iken bu değer, 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C yüksek sıcaklık sonrası sırasıyla %27, %37, %45 ve %49 oranlarında azalmıştır. %25 LA ikamesi içeren numune gruplarının basınç dayanım değeri oda koşullarında 47,33 MPa iken bu değer, 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C yüksek sıcaklık sonrası sırasıyla %31, %41, %52 ve %53 oranlarında azalmıştır. Deney sonucu elde edilen veriler incelendiğinde yüksek sıcaklık maruziyeti altında ısıtma işleminin sıcaklığı arttıkça basınç dayanımında azalma gözlemlenmiştir.

Azmi vd. (2022), yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer harca LA ikamesinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki etkilerinin incelemiştir. Agregada %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında LA ikamesi yapılmıştır. Geopolimer harç numuneleri 200, 400, 600 ve 800 °C sıcaklığa 1 saat boyunca maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası numunelerin basınç dayanım değerleri incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda numunelerde LA ikamesi arttıkça basınç dayanım değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. %5 LA ikamesi yapılan numune grubunda oda koşullarında basınç dayanım değeri 35,0 MPa iken bu değer 800 °C yüksek sıcaklık sonrası 9,9 MPa'a düşmüştür.

Değirmenci (2018), yaptığı çalışmada YFC ve UK esaslı geopolimer harç üretmiştir. Bağlayıcı olarak %100 YFC, %50-%50 YFC ve UK, %100 UK olmak üzere üç farklı numune grubu üretmiştir. Agregada olarak dere kumu kullanılmıştır. Belirlenen parametreler sonucu üretilen geopolimer harç numuneleri 300, 600 ve 900 °C yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası basınç dayanım değerleri tayin edilmiştir. 300 °C yüksek sıcaklık dayanımı sonrası basınç dayanım değerlerinde %2 ile %10 arasında kayıp meydana gelirken bu değer 600 °C’de %22 ile %63 arasında, 900 °C’de ise %65 ile %78 arasında olmuştur. Geopolimer harç numunelerine uygulanan yüksek sıcaklık değerleri arttıkça numunede basınç dayanım değerleri düştüğü gözlemlenmiştir.

Guerrieri vd. (2009), yaptıkları çalışmada geleneksel beton ve geopolimer beton üretmişlerdir. Üretilen geleneksel betonda PÇ kullanılmıştır. Geopolimer betonda ise YFC kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak %100 PÇ , %50-%50 YFC ve PÇ, %100 YFC olmak üzere üç farklı numune grubu üretmiştir. Belirlenen parametreler sonucu üretilen geleneksel ve geopolimer beton numuneleri 1 saat boyunca 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100 ve 1200 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası numunelerin basınç dayanım değerleri tayin edilmiştir. Deneyler sonucu üretilen beton numunelerinde oda koşullarında en yüksek basınç dayanım değerleri %100 yüksek fırın cürufllu numune grubunda 50,1 MPa olarak ölçülmüştür. %100 PÇ’li numune grubunun oda koşullarında basınç dayanım değeri 49,0 MPa iken bu değer %50 PÇ’li %50 yüksek fırın cürufllu numune grubu için 47,0 MPa olarak ölçülmüştür. Yüksek sıcaklık maruziyeti sonucu numunelerin basınç dayanım değerleri incelendiği zaman oda koşullarında yapılan basınç dayanım değerleri ile kıyaslandığı zaman 200 °C’ye kadar numunelerin basınç dayanım değerlerinde değişim gözlemlenmemiştir. 200 °C’nin üzerindeki her artış için basınç dayanım değerlerinde düzenli düşüşler gözlemlenmiştir. 900 °C ve üzerindeki numune grubu için basınç dayanım değeri tayin edilememiştir. Mukavemetteki bu azalmaya görsel olarak gözlemlenen yüzey termal çatlama ve test numunelerinin iç mikro çatlama eşlik etmiştir.

Topal vd., (2021) yaptıkları çalışmada YFC esaslı geopolimer beton üretmişlerdir. Agregada doğal dere agregası kullanılmış olup %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında geri dönüştürülmüş agregada kullanılmıştır. Üretilen numuneler 100, 200, 400, 600 ve 800 °C’lik yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Oda sıcaklığında deneylere uygulanan deneyler yüksek sıcaklık sonrasında da uygulanmış ve elde edilen sonuçlar referans değerler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda geri dönüştürülmüş agregada ikamesi arttıkça numunelerin basınç dayanım değerlerinde azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Yüksek

sıcaklık sonrası en yüksek basınç dayanım değeri %0 ikame yapılan numune grubunda 100 °C’de gözlemlenirken en düşük basınç dayanım değeri %100 ikame yapılan numune grubunda 800 °C’de gözlemlenmiştir. Sıcaklık yükseldikçe geopolimer numunelerin basınç dayanım değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir.

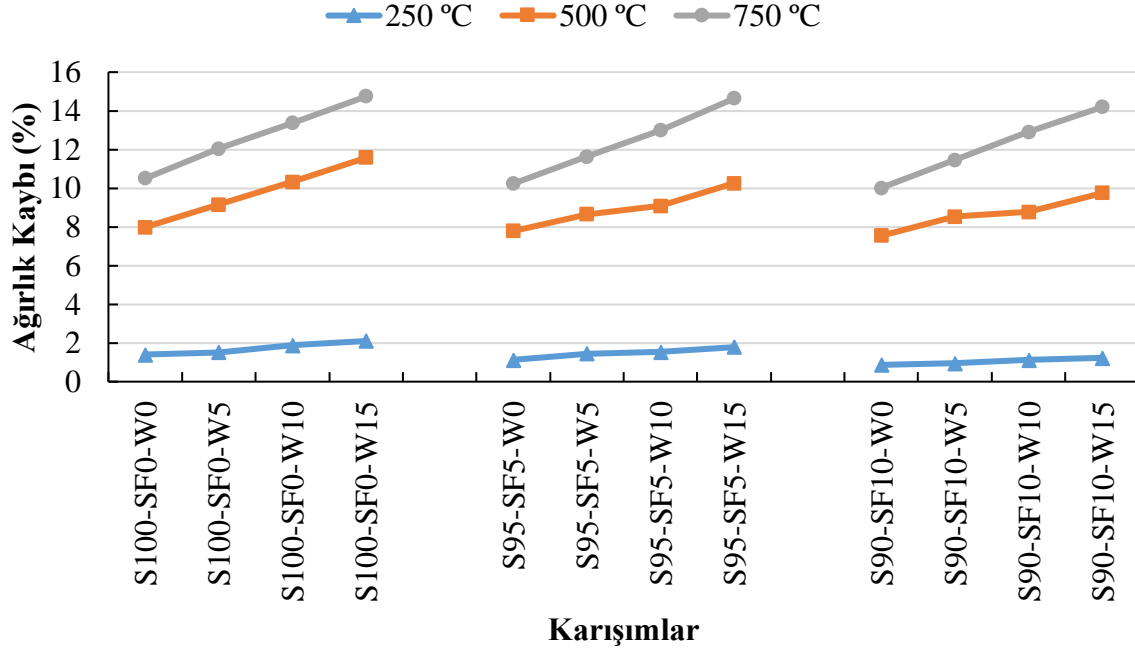
4.2.2.2.Yüksek sıcaklık sonrası geopolimer harç numunelerin ağırlık kaybı

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan geopolimer harçların ağırlıklarındaki değişimler Çizelge 4.8 ve Şekil 4.10’da gösterilmiştir. 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklara maruz kalan geopolimer harç numuneleri incelenmiştir.

SD ikame yüzdesi arttıkça geopolimer harç numunelerin ağırlık kayıpları azalırken, LA ikame yüzdesi arttıkça geopolimer harç numunelerin ağırlık kayıplarında artış gözlemlenmiştir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda eriyen LA numunelerden sızarak numune içerisinde bulunan boşlukların artmasına neden olmuştur. Bu durum numunelerdeki ağırlık kayıplarını arttırmış ve mekanik özellikleri olumsuz etkilemiştir.

Çizelge 4.8 : Yüksek sıcaklık sonrası geopolimer harç numunelerin ağırlık kaybı

Karışımlar	Ağırlık Kaybı (%)		
	250 °C	500 °C	750 °C
S100-SF0-W0	1,39	7,98	10,51
S100-SF0-W5	1,51	9,15	12,05
S100-SF0-W10	1,87	10,32	13,37
S100-SF0-W15	2,10	11,58	14,75
S95-SF5-W0	1,13	7,79	10,24
S95-SF5-W5	1,44	8,65	11,64
S95-SF5-W10	1,54	9,08	13,00
S95-SF5-W15	1,79	10,25	14,66
S90-SF10-W0	0,87	7,54	10,02
S90-SF10-W5	0,95	8,53	11,46
S90-SF10-W10	1,12	8,78	12,91
S90-SF10-W15	1,23	9,75	14,21



Şekil 4.10 : Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin ağırlık kaybı

Luhar vd. (2018) yaptığı çalışmada geopolimer beton üretmişlerdir. Üretilen geopolimer betonda bağlayıcı olarak %100 UK kullanılmıştır. Agregada ise %100 doğal dere agregası ve %75 doğal dere agregası ile %25 LA ikamesi kullanılmıştır. Alkali aktivasyonunu sağlamak için 14 mol NaOH kullanmış ve sodyum hidroksit/sodyum silikat oranını 2,5 olarak almıştır. Bağlayıcı/Çözelti oranını 0,4 alarak deney gruplarını oluşturmuştur. Oluşturulan deney gruplarını oda koşullarında, 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C’de iki saatlik yüksek sıcaklık maruziyeti etkisinde bırakmıştır. Deney sonucunda numunelerin ağırlık kaybı değerlerini incelemiştir. 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C’de ağırlık kaybı değerleri LA ikamesi içermeyen karışımlarda sırasıyla %3, %4, %6 ve %15 iken bu değer %25 LA ikamesi içeren karışımlarda sırasıyla %5, %7, %9 ve %17 olarak ölçülmüştür. Yüksek sıcaklık maruziyetinde sıcaklığın derecesi arttıkça ve LA ikame oranı arttıkça meydana gelen kütle kaybı yüzdesinin arttığı gözlemlenmiştir.

Azmi vd. (2022), yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer harca LA ikamesinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki etkilerinin incelemiştir. Agregada %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında LA ikamesi yapılmıştır. Geopolimer harç numuneler 200, 400, 600 ve 800 °C sıcaklığa 1 saat boyunca maruz bırakılmıştır. Ağırlık kaybı değerleri incelendiği zaman %5 LA ikamesi içeren numune grubu için 200 °C’de ağırlık kaybı %5 iken bu değer 800 °C’de %19,2 olarak ölçülmüştür.

Değirmenci (2018), yaptığı çalışmada YFC ve UK esaslı geopolimer harç üretmiştir. Bağlayıcı olarak %100 YFC, %50-%50 YFC ve UK, %100 UK olmak üzere üç farklı numune grubu üretmiştir. Agregada olarak dere kumu kullanılmıştır. Alkali çözelti olarak sodyumhidroksit ve sodyumsilikat kullanılmıştır. Belirlenen parametreler sonucu üretilen geopolimer harç numuneleri 300, 600 ve 900 °C yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası ağırlık kaybı değerleri incelenmiştir. Ağırlık kaybı değerleri 300 °C’de %1,2 ile %5 arasında iken bu değer 600 °C’de %2,1 ile %6,3, 900 °C’de %3 ile %7 arasında olmuştur. Geopolimer harç numunelerine uygulanan yüksek sıcaklık değerleri arttıkça ağırlık kaybı değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Guerrieri vd. (2009), yaptıkları çalışmada geleneksel beton ve geopolimer beton üretmişlerdir. Üretilen geleneksel betonda PÇ kullanılmıştır. Geopolimer betonda ise YFC kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak %100 PÇ , %50-%50 YFC ve PÇ, %100 YFC olmak üzere üç farklı numune grubu üretmiştir. 360 kg/m³ bağlayıcı dozajı seçilmiş olup su/bağlayıcı ve alkali çözelti/bağlayıcı oranları 0,50 olarak belirlenmiştir. Parametreler sonucu üretilen geleneksel ve geopolimer beton numuneleri 1 saat boyunca 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100 ve 1200 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Numunelerin ağırlık kaybı değerleri tayin edilmiştir. Ağırlık kaybı değerleri incelendiği zaman 100 °C’de %1,40 olarak ölçülen ağırlık kaybı yüzdesi her derece artışı için yükselmeye devam etmiştir. En çok ağırlık kaybı 1200 °C’ye maruz bırakılan numune grubunda en çok %8,40 olarak ölçülmüştür.

4.2.2.3.Yüksek sıcaklık sonrası geopolimer harç numunelerin kılcal geçirimsizliği

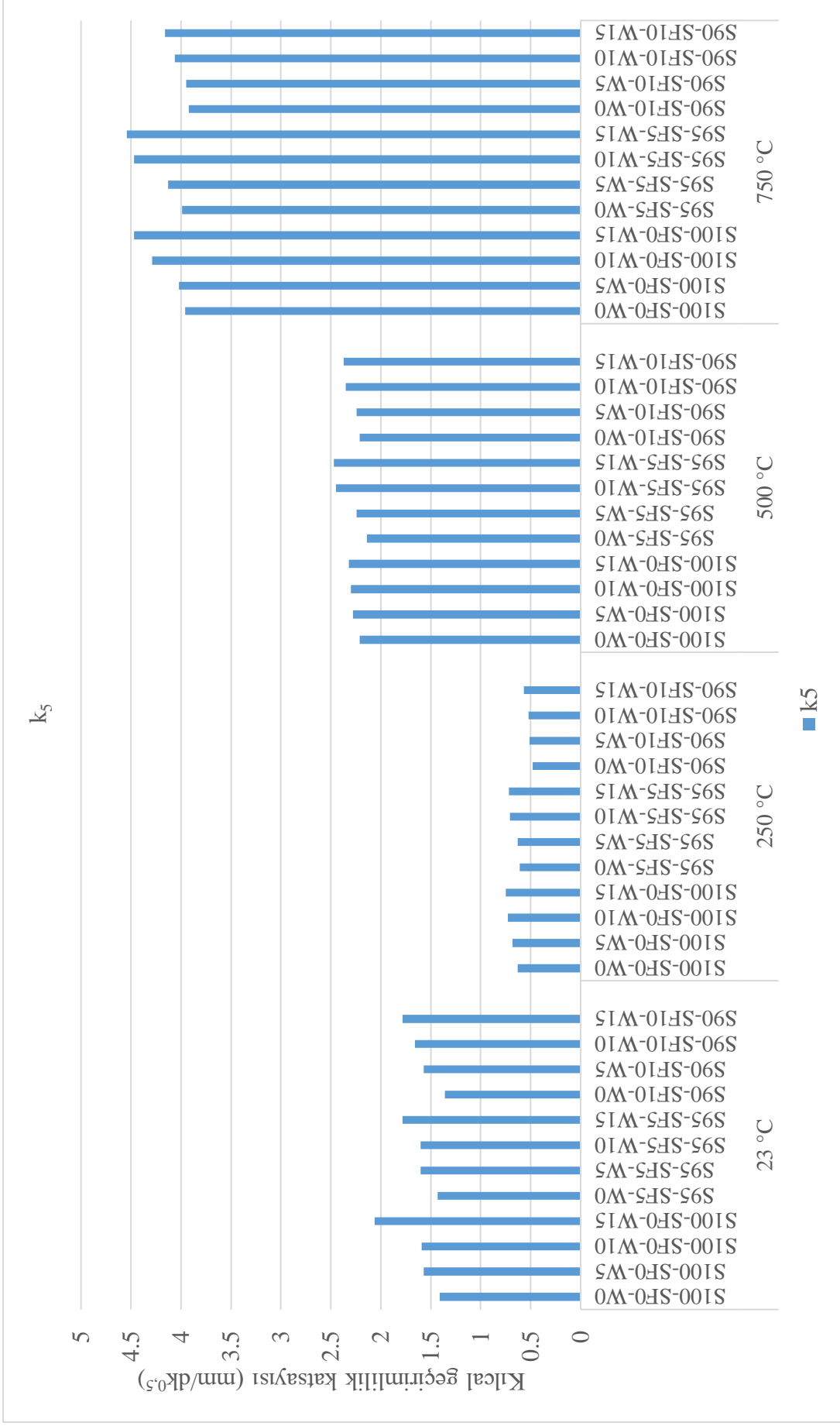
Geopolimer harç numunelerin 250, 500 ve 750 °C’deki kılcal geçirimsizlik katsayıları Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10’da verilmiştir. Kılcal geçirimsizlik katsayısında meydana gelen değişimler Şekil 4.11-15’de grafik şeklinde verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda LA ikamesi ve sıcaklık değerlerinde meydana gelen yükselmeye bağlı olarak geopolimer harç numunelerinin kılcal geçirimsizlik katsayı değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Bu katsayı değerlerinde meydana gelen artış, ölçüm süresinin artması ile azalma göstermiştir.

Çizelge 4.9 : Oda Koşulları ve 250 °C’de geopolimer numunelerin kılcal geçirimliliği

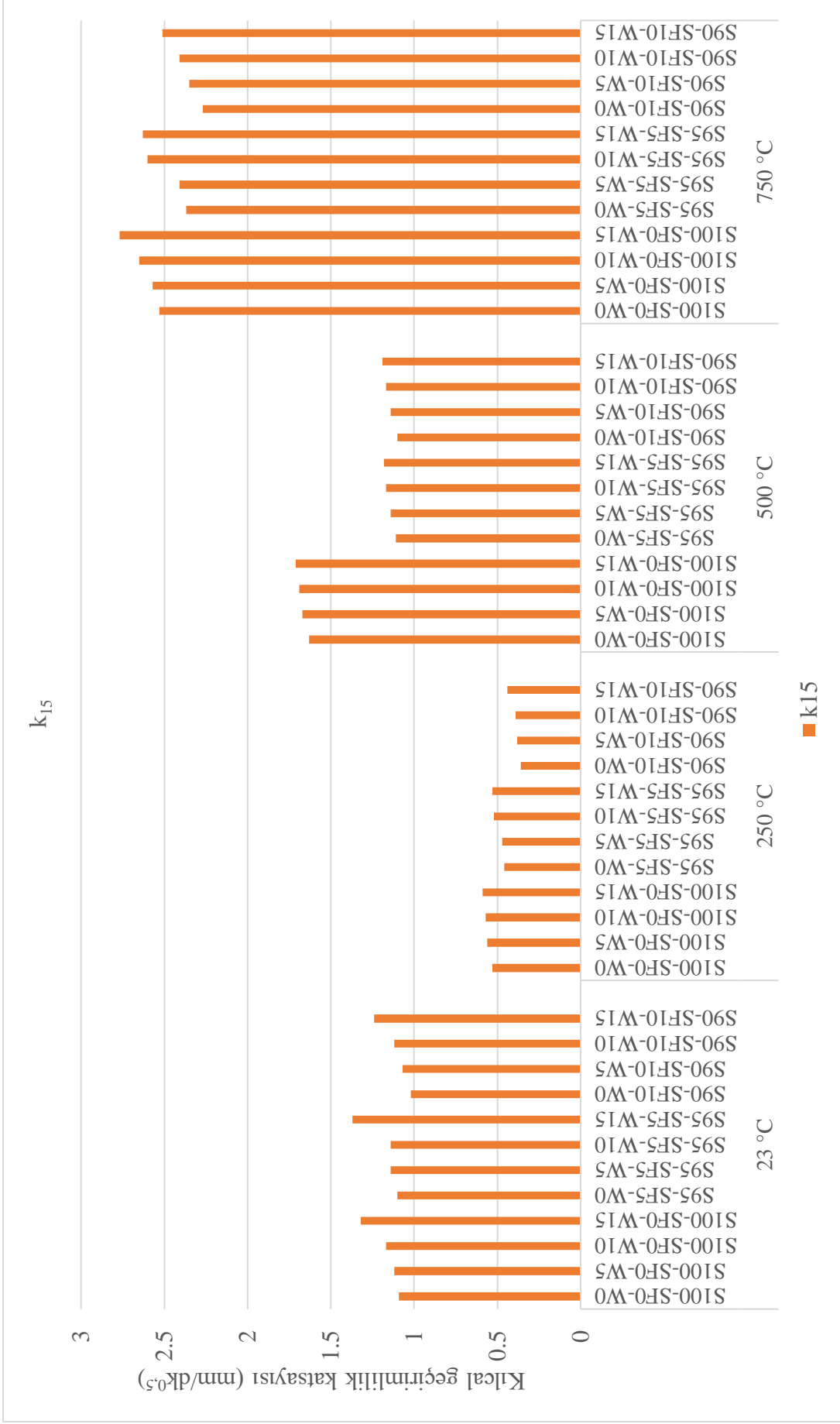
Sıcaklık (°C)	Karışım adı	Kılcal geçirimlilik katsayısı, (mm/dk ^(0.5))				
		k ₅	k ₁₅	k ₃₀	k ₆₀	k ₁₄₄₀
23	S100-SF0-W0	1,41	1,09	0,76	0,69	0,16
	S100-SF0-W5	1,57	1,12	0,87	0,71	0,17
	S100-SF0-W10	1,59	1,17	0,87	0,71	0,17
	S100-SF0-W15	2,06	1,32	0,97	0,75	0,18
	S95-SF5-W0	1,43	1,1	0,72	0,61	0,17
	S95-SF5-W5	1,6	1,14	0,87	0,66	0,18
	S95-SF5-W10	1,6	1,14	0,88	0,67	0,18
	S95-SF5-W15	1,78	1,37	0,98	0,76	0,19
	S90-SF10-W0	1,36	1,02	0,71	0,6	0,17
	S90-SF10-W5	1,57	1,07	0,82	0,65	0,18
	S90-SF10-W10	1,66	1,12	0,87	0,67	0,18
	S90-SF10-W15	1,78	1,24	0,96	0,73	0,19
250	S100-SF0-W0	0,63	0,53	0,38	0,25	0,08
	S100-SF0-W5	0,68	0,56	0,42	0,24	0,08
	S100-SF0-W10	0,73	0,57	0,49	0,28	0,07
	S100-SF0-W15	0,75	0,59	0,51	0,3	0,07
	S95-SF5-W0	0,61	0,46	0,36	0,29	0,08
	S95-SF5-W5	0,63	0,47	0,39	0,29	0,08
	S95-SF5-W10	0,71	0,52	0,39	0,32	0,08
	S95-SF5-W15	0,72	0,53	0,4	0,34	0,08
	S90-SF10-W0	0,48	0,36	0,31	0,23	0,08
	S90-SF10-W5	0,51	0,38	0,33	0,23	0,09
	S90-SF10-W10	0,52	0,39	0,34	0,24	0,1
	S90-SF10-W15	0,57	0,44	0,41	0,31	0,1

Çizelge 4.10 : 500 °C ve 750 °C’de geopolimer numunelerin kılcal geçirimliliği

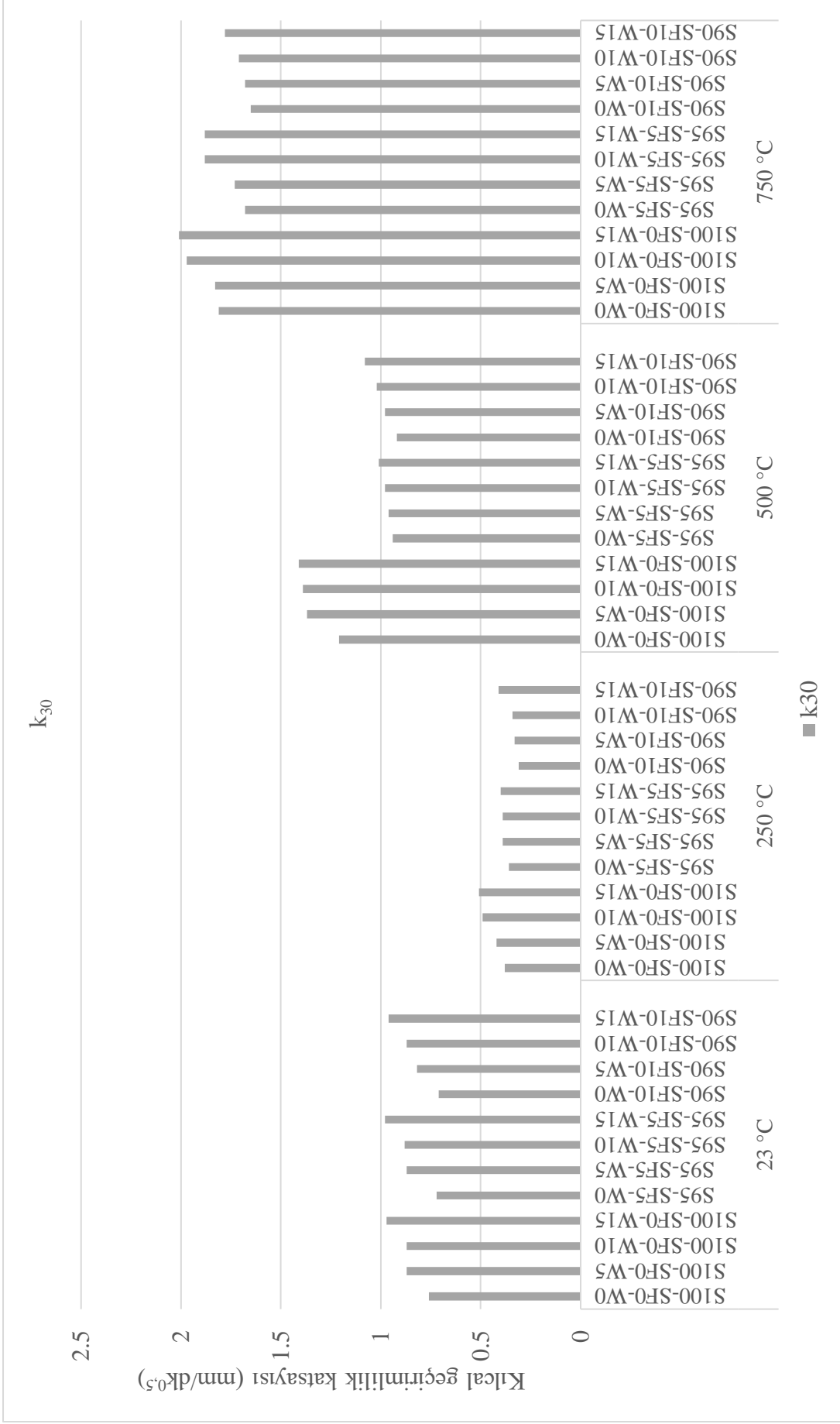
Sıcaklık (°C)	Karışım adı	Kılcal geçirimlilik katsayısı, (mm/dk ^(0.5))				
		k ₅	k ₁₅	k ₃₀	k ₆₀	k ₁₄₄₀
500	S100-SF0-W0	2,21	1,63	1,21	0,88	0,2
	S100-SF0-W5	2,28	1,67	1,37	0,9	0,23
	S100-SF0-W10	2,3	1,69	1,39	0,92	0,25
	S100-SF0-W15	2,32	1,71	1,41	0,94	0,27
	S95-SF5-W0	2,14	1,11	0,94	0,72	0,22
	S95-SF5-W5	2,24	1,14	0,96	0,74	0,22
	S95-SF5-W10	2,45	1,17	0,98	0,79	0,24
	S95-SF5-W15	2,47	1,18	1,01	0,81	0,24
	S90-SF10-W0	2,21	1,1	0,92	0,71	0,11
	S90-SF10-W5	2,24	1,14	0,98	0,74	0,14
	S90-SF10-W10	2,35	1,17	1,02	0,78	0,16
	S90-SF10-W15	2,37	1,19	1,08	0,81	0,19
750	S100-SF0-W0	3,96	2,53	1,81	1,31	0,18
	S100-SF0-W5	4,02	2,57	1,83	1,32	0,19
	S100-SF0-W10	4,29	2,65	1,97	1,38	0,2
	S100-SF0-W15	4,47	2,77	2,01	1,48	0,21
	S95-SF5-W0	3,99	2,37	1,68	1,22	0,26
	S95-SF5-W5	4,13	2,41	1,73	1,24	0,27
	S95-SF5-W10	4,47	2,6	1,88	1,33	0,3
	S95-SF5-W15	4,54	2,63	1,88	1,35	0,3
	S90-SF10-W0	3,92	2,27	1,65	1,18	0,26
	S90-SF10-W5	3,95	2,35	1,68	1,21	0,27
	S90-SF10-W10	4,06	2,41	1,71	1,25	0,28
	S90-SF10-W15	4,16	2,51	1,78	1,35	0,3



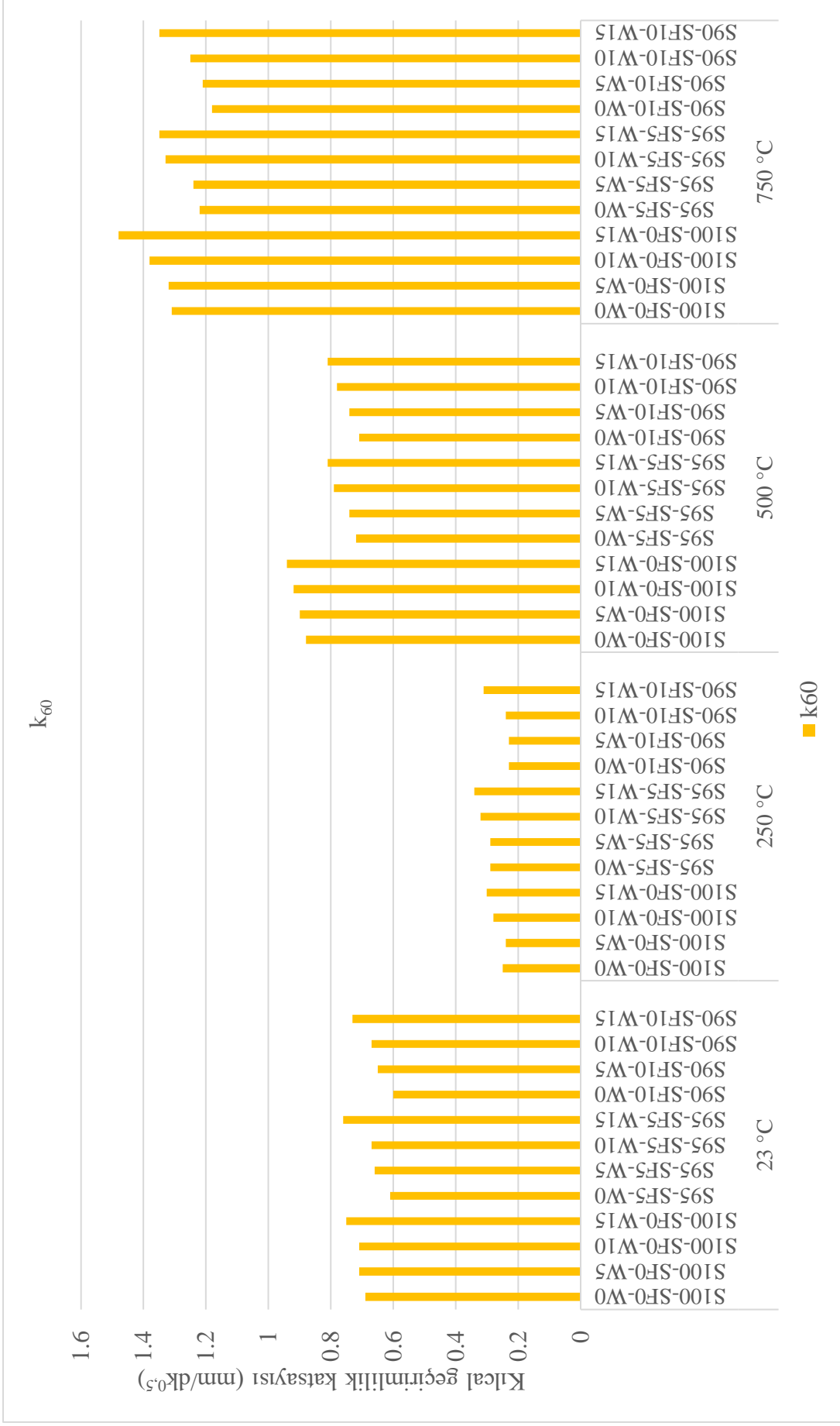
Şekil 4.11 : 5 dakikalık ölçüm için, 12 farklı geopolimer karışım tipinin sıcaklığa bağlı kılcal geçirimsizlik katsayı değişimi



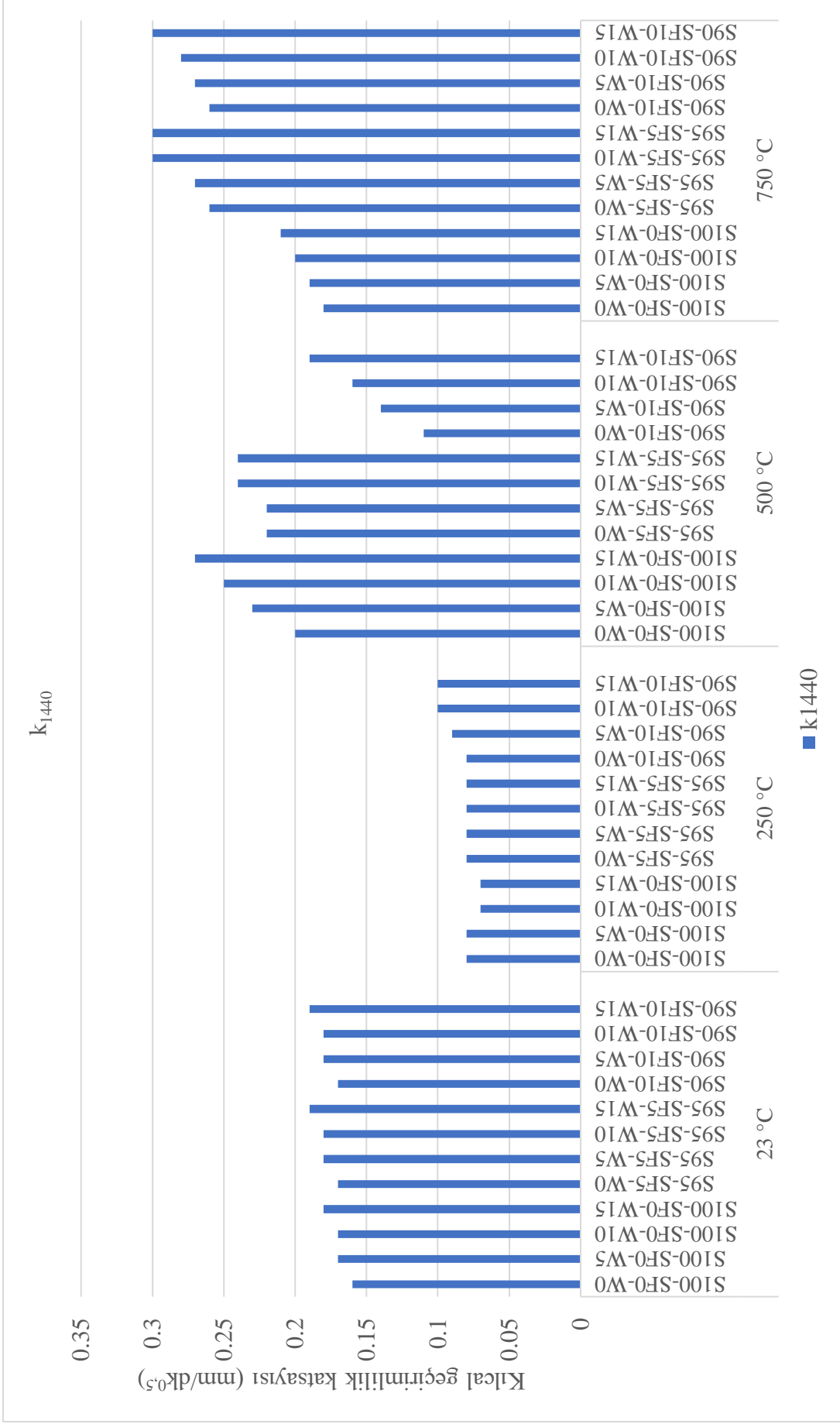
Şekil 4.12 : 15 dakikalık ölçüm için, 12 farklı geopolimer karışım tipinin sıcaklığa bağlı kılcak geçirimsizlik katsayı değişimi



Şekil 4.13 : 30 dakikalık ölçüm için, 12 farklı geopolimer karışım tipinin sıcaklığa bağlı kılcal geçirimsizlik katsayı değişimi



Şekil 4.14 : 60 dakikalık ölçüm için, 12 farklı geopolimer karışım tipinin sıcaklığa bağlı külcül geçirimsizlik katsayı değişimi



Şekil 4.15 : 1440 dakikalık ölçüm için, 12 farklı geopolimer karışım tipinin sıcaklığa bağlı ortalama geçirimsizlik katsayısı değişimi

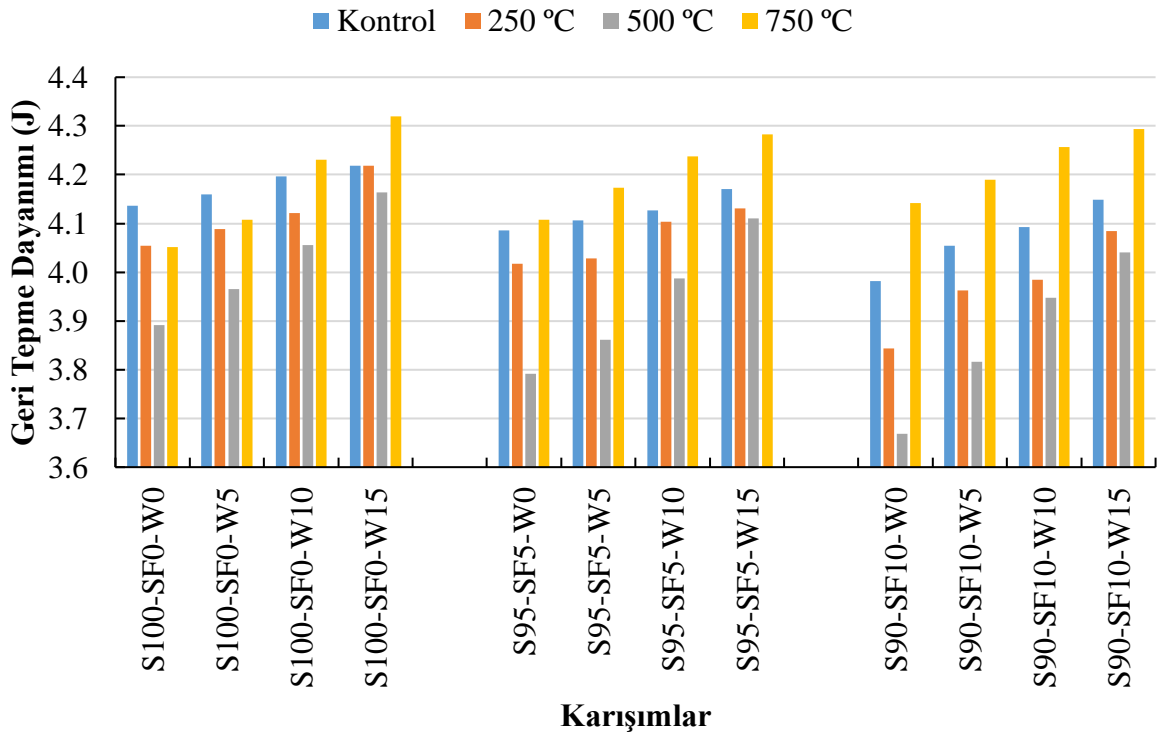
Topal vd., (2021) yaptıkları çalışmada YFC esaslı geopolimer beton üretmişlerdir. Agregada doğal dere agregası kullanılmış olup %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında geri dönüştürülmüş agrega kullanılmıştır. Üretilen numuneler 100, 200, 400, 600 ve 800 °C'lik yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Oda sıcaklığında deneylere uygulanan deneyler yüksek sıcaklık sonrasında da uygulanmış ve elde edilen sonuçlar referans değerler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda geri dönüştürülmüş agrega ikamesi arttıkça numunelerin kılcal su emme değerlerinde artış meydana gelmiştir.

4.2.2.4.Yüksek sıcaklık sonrası geopolimer harç numunelerin geri tepme dayanımı

Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer harç numunelerin geri tepme testi ile belirlenen darbe dirençleri Çizelge 4.11 ve Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Genel olarak geopolimer harcın LA ikamesi arttıkça numunelerin darbe dayanımları da artmıştır. Bu artış kontrol numunelerinde %0,47 ile %4,18 arasında iken yüksek sıcaklıklarda bu değerler %0,27 ile %10,14 arasında tespit edilmiştir. Sıcaklığın 500 °C'ye kadar artması ve numunelerin LA içeriğinin artmasıyla numunelerin darbe dayanımları artmıştır. Ancak 750 °C'de LA içeriğine bağlı olarak darbe dayanımındaki artış hızı azalmıştır. LA, numunelerde çatlak oluşumunu sınırlayarak numunelerin darbe dayanımlarını arttırmıştır. 500 °C'ye kadar numunelerde SD ikamesi ile numunelerin darbe dayanımı artarken (%0,42 ile %5,73 arasında) bu değerler 750 °C'de (%0,15 ile %2,24 arasında) azalmıştır.

Çizelge 4.11 : Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası numunelerinin geri tepme dayanımı

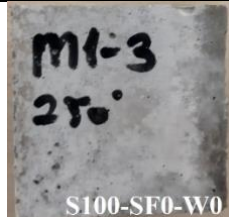

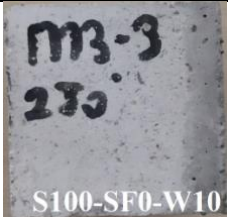
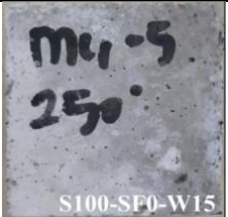
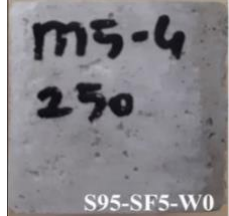
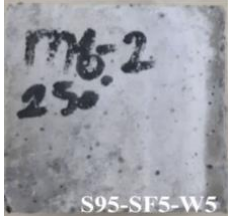
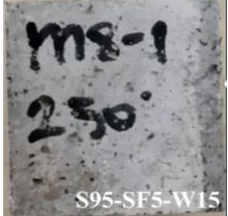
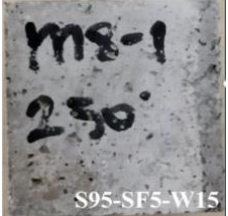


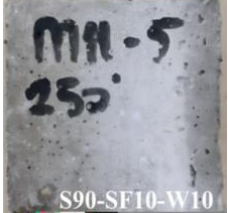
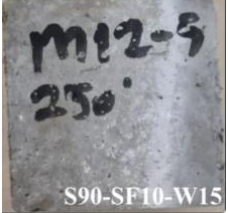
Karışım Adı	Geri Tepme Dayanımı (J)			
	Kontrol	250 °C	500 °C	750 °C
S100-SF0-W0	4,1358	4,0536	3,8914	4,0514
S100-SF0-W5	4,1596	4,0882	3,9649	4,1077
S100-SF0-W10	4,1964	4,1207	4,0558	4,2310
S100-SF0-W15	4,2180	4,2180	4,1639	4,3197
S95-SF5-W0	4,0861	4,0168	3,7919	4,1077
S95-SF5-W5	4,1055	4,0277	3,8611	4,1726
S95-SF5-W10	4,1272	4,1034	3,9866	4,2375
S95-SF5-W15	4,1704	4,1315	4,1098	4,2829
S90-SF10-W0	3,9822	3,8438	3,6686	4,1423
S90-SF10-W5	4,0536	3,9628	3,8157	4,1899
S90-SF10-W10	4,0925	3,9844	3,9476	4,2569
S90-SF10-W15	4,1488	4,0839	4,0406	4,2937



Şekil 4.16 : Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası geopolimer numunelerinin geri tepme dayanımı

4.2.2.5. Yüksek sıcaklık sonrası geopolimer harç numunelerin görsel analizi

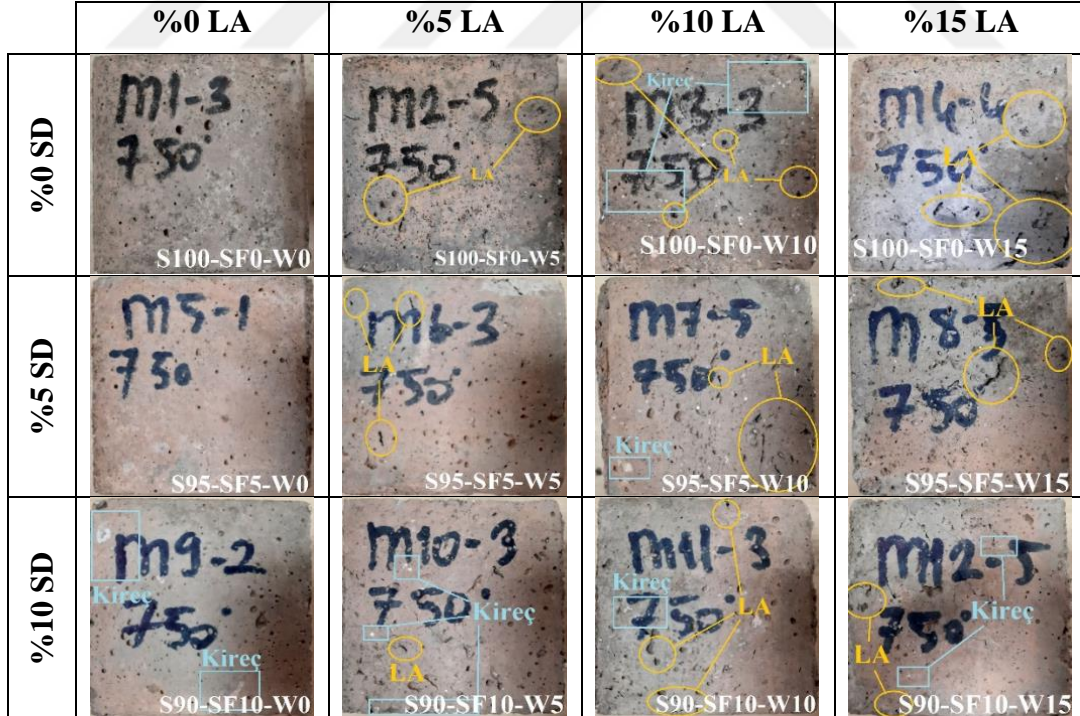
250, 500 ve 750 °C sıcaklığa maruz kalmış geopolimer harç numunelerin görsel analizine dair fotoğraflar Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da verilmiştir. 250 °C’de numunelerin yüzeylerinde çatlak oluşmazken, numune yüzeylerinde beyazlaşma meydana gelmiştir. 500 °C’de numune yüzeylerinde hafif çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Numune renklerinde grileşme meydana gelmiştir. Numune yüzeylerinde kireç birikintileri oluşmuştur. LA içeren numunelerde, numune yüzeylerinde biriken sıcaklığın etkisiyle eriyen LA’lar yüzeyi terkederek yüzeyde boşluklara sebep olmuştur. 750 °C’de numunelerde pembeleşme meydana gelmiştir. Numune yüzeylerinde çatlak oluşumlarının arttığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde numune yüzeyindeki kireç ve LA tortuları da artmıştır. 750 °C’de numunelerde bariz renk değişiklikleri meydana gelmiştir. Zhang vd. (2020) yaptıkları çalışmada belirgin renk değişiminin 600 °C’de başladığını belirtmiştir. Ye vd. (2014), yaptıkları çalışmada boksit ve cüruf esaslı geopolimerlerin maruz kaldığı sıcaklıklar arttıkça numune yüzeylerindeki çatlakların miktarının, genişliğinin ve uzunluğunun da arttığını belirtmişlerdir. Benzer şekilde bu çalışmada da artan sıcaklıkla çatlak sayısı ve genişliği artmıştır. Bu çatlakların, yüksek sıcaklıklara maruz kalan bağlayıcıların dehidrasyonu ve dehidroksilasyonundan kaynaklanan büzülmelemeden kaynaklandığı düşünülmüştür. Bununla birlikte, silisyumdioksitin hacimsel genişlemesi, büyük olasılıkla faz geçişinden dolayı, numunelerin çatlamasına neden olmuştur.

	%0 LA	%5 LA	%10 LA	%15 LA
%0 SD				
%5 SD				
%10 SD				

Şekil 4.17 : 250 °C’ye maruz kalan numunelerin görsel analizi



Şekil 4.18 : 500 °C'ye maruz kalan numunelerin görsel analizi



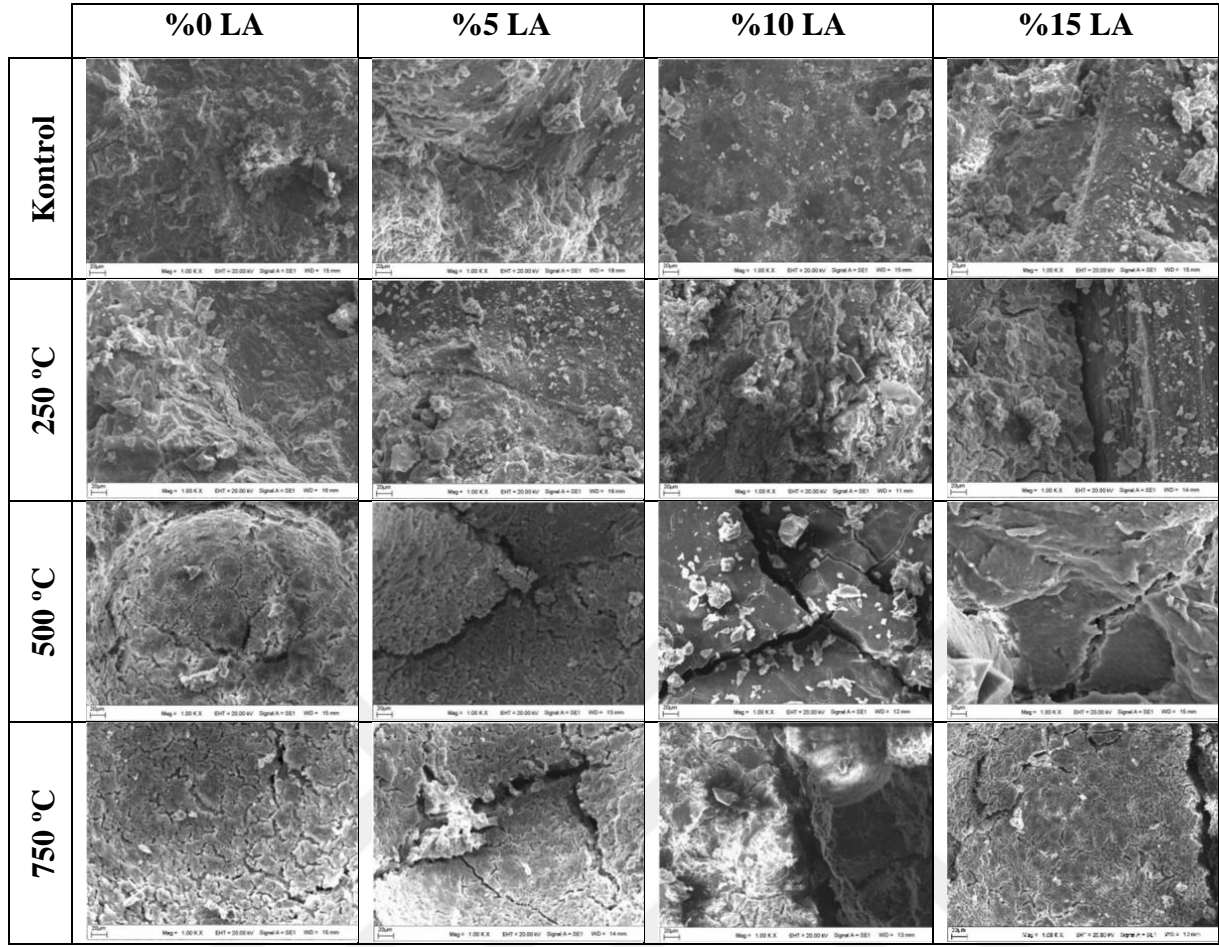
Şekil 4.19 : 750 °C'ye maruz kalan numunelerin görsel analizi

Değirmenci (2018), yaptığı çalışmada YFC ve UK esaslı geopolimer harç üretmiştir. Bağlayıcı olarak %100 YFC, %50-%50 YFC ve UK, %100 UK olmak üzere üç farklı numune grubu üretmiştir. Agrega olarak dere kumu kullanılmıştır. Alkali çözelti olarak sodyumhidroksit ve sodyumsilikat kullanılmıştır. Belirlenen parametreler sonucu üretilen geopolimer harç numuneleri 300, 600 ve 900 °C yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası görsel analiz yapılmıştır. Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer harç numunelerinin özellikle 600 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra renklerinde açılma meydana gelmiş olup bu renk değişimi 900 °C'de tamamen sarıya dönmüştür.

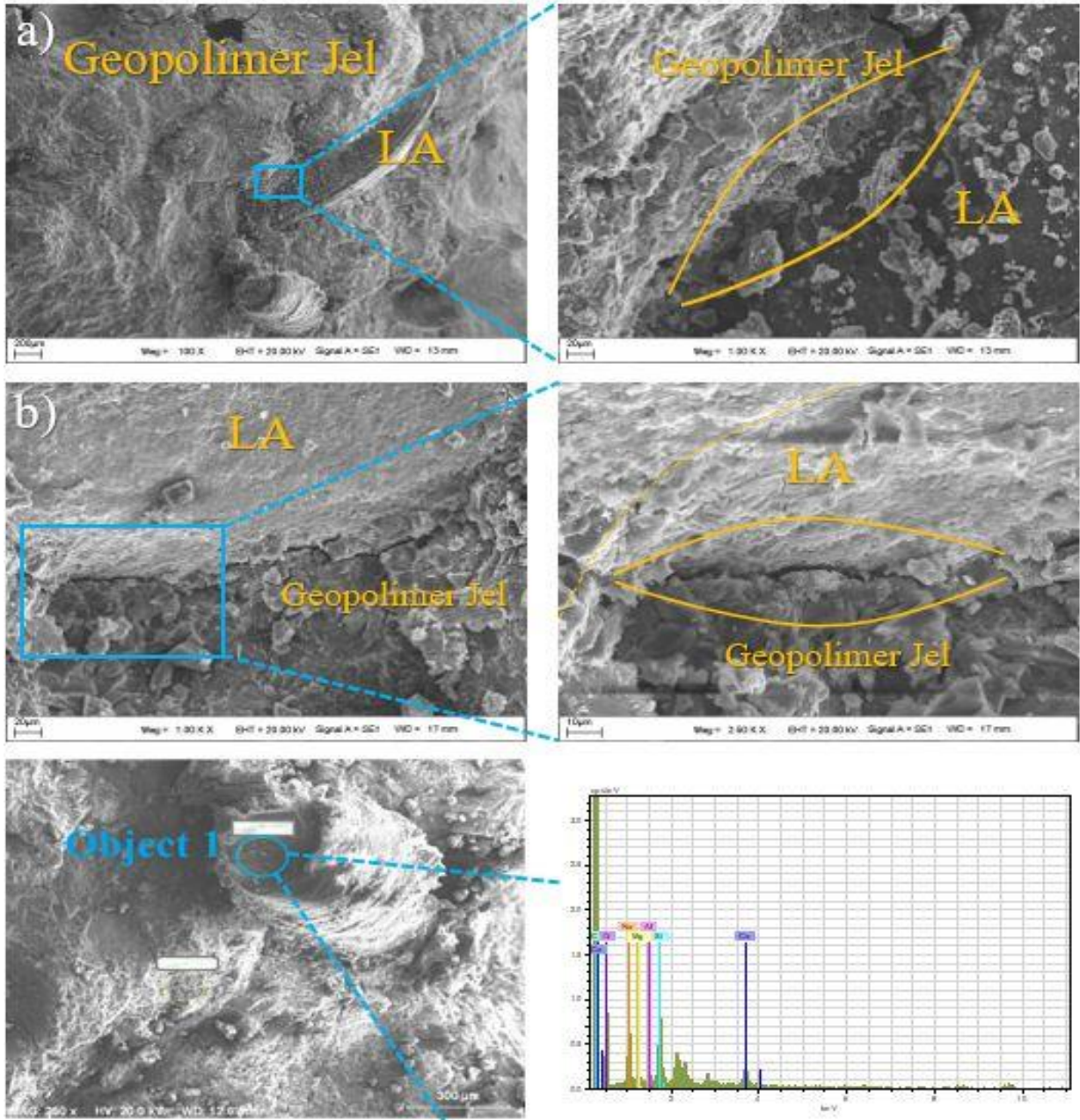
4.2.3. Mikro yapı analizi

S100-SF0-W0, S100-SF0-W15, S90-SF10-W0 ve S90-SF10-W15 kodlu numunelerin kontrol ve yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki SEM görüntüleri Şekil 4.20'de verilmiştir. Kontrol serileri incelendiğinde, SD içeren numunelerin daha yoğun jel yapılarına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni SD'nin YFC'den daha fazla SiO₂ ($83.40/32.47=2.57$) içermesi ve SD'nin YFC'den daha ince olmasıdır. 250 °C'de numunelerin yoğun jel yapılarında herhangi bir bozulma olmamıştır. 500 ve 750 °C'de numune mikroyapılarında çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlaklar, numunelerin mekanik özelliklerindeki kayıpların temelini oluşturmuştur. SD ikamesi ile bu çatlakların sayısı ve genişliği azalmıştır. SD ikamesi, YFC esaslı geopolimer harçların yüksek sıcaklıklara karşı direncini artırmıştır. Yüksek sıcaklıklara maruz kalma sonucu geopolimerde azalan gözenek hacmi ve su kaybı ile buharlaşma ve dehidroksilasyon numunelerde hasara neden olmuştur. Bu hasarlar ayrıca numunelerde mukavemet kaybına neden olmuştur (Aygörmez vd., 2020).

Geopolimer harçta LA'nın görünümü Şekil 4.20'de verilmiştir. Şekil 4.21 (a) ve (b), LA ve geopolimer arasındaki arayüzey geçiş bölgeleri (ITZ) arasındaki yapışmayı göstermektedir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda bu bölgelerin boyutları artmış ve numunelerin mekanik özellikleri olumsuz etkilenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda ergiyen LA'lar numune içinde boşluk oluşumlarına neden olmuş, bu da artan sıcaklıkla numunelerin kılcal geçirgenlik değerlerinin ve ağırlık kayıplarının artmasına neden olmuştur. Şekil 4.21 (c), LA'nın enerji dağılımlı spektroskopisi (EDS) sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 4.20 : Yüksek sıcaklıkta numunelerin SEM görüntüleri



OBJEKT 1

El	AN	unn. [wt.-%]	C norm. [wt.-%]	C Atom. [at.-%]	Error [%]
C	6	60.48	60.48	68.69	19.9
Na	11	3.31	3.31	1.96	0.3
Si	14	2.18	2.18	1.06	0.1
Ca	20	1.01	1.01	0.34	0.1
Mg	12	0.35	0.35	0.20	0.1
Al	13	0.34	0.34	0.17	0.1
Total:		33.25	100.00	100.00	

Şekil 4.21 : a) Geopolimer ile LA arasındaki ara yüzey (S100-SF0-W5)
 b) Geopolimer ile LA arasındaki ara yüzey (S95-SF5-W15)
 c) Örnek mikroyapıdaki LA'nın EDS görüntüsü (S100-SF0-W5)

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, bağlayıcı olarak %0, %5 ve %10 oranlarında SD, YFC yerine ikame edilerek; agrega olarak ise %0, %5, %10 ve %15 oranlarında LA, doğal dere agregası yerine ikame edilerek elde edilen geopolimer harç numunelerin yüksek sıcaklıklarda performansı araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir:

1. Numunelerin 28 günlük basınç dayanımı oda koşullarında 28,52 ile 60,97 MPa arasında iken, numunelerin basınç dayanımı 250 °C'de %31,87 ile %14,73 arasında artmıştır. 500 °C'de basınç dayanımı %8,97 ile %43,41 arasında azalmıştır. 750 °C'de ise basınç dayanım kayıpları %51.49 ile %73.46 arasında olmuştur.
2. En yüksek eğilme ve yarma çekme mukavemetleri (10.40 ve 5.21 MPa) S90-SF10-W0 kodlu numunede elde edilirken, en düşük eğilme ve yarma çekme mukavemetleri (7.42 ve 2.76 MPa) S100-SF0-W10 kodlu numunede elde edilmiştir. Numunelerin basınç dayanımları ile eğilme ve yarma çekme dayanımları arasında üstel bir ilişki belirlenmiştir. Bu ilişkilerin korelasyon katsayıları sırasıyla 0.87 ve 0.93'tür.
3. Yüksek sıcaklıklarda numunelerin ağırlık kayıpları; 250 °C için %0,87-2,10; 500 °C için %7,54-11,58; 750 °C için %10,02-14,75 arasındadır.
4. Örneklerin kılcal geçirimsizlik değerleri; SD ikamesi arttıkça azalmıştır, LA ikamesi ve sıcaklık yükseldikçe artmıştır.
5. YFC yerine SD ikamesi numunelerin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahipken, nehir agregası yerine LA ikamesi numunelerin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde olumsuz bir etki yapmıştır.
6. Genel olarak numunelerdeki SD içeriği arttıkça numunelerin darbe direnci azalırken, LA içeriği arttıkça numunelerin darbe direnci artmıştır.
7. 250 °C'ye maruz kalan numunelerin dış yüzeyleri bozulmazken, 500 °C ve üzeri sıcaklıklarda numune yüzeylerinde çatlaklar meydana gelmiş, numune yüzeylerinde kireç ve LA tortuları oluşmuştur. Özellikle 750 °C'de örneklerin renklerinde önemli bir değişiklik olmuştur.
8. Numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde, artan SD içeriği ile daha yoğun bir jel yapısının elde edildiği görülmüştür. Numunelerin maruz kaldığı sıcaklıklar arttıkça geopolimer jel yapısında bozulmalar ve çatlaklar meydana gelmiştir.

Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar neticesinde, bundan sonraki benzer çalışmalarda farklı alkali aktivatör oranları, farklı katkı maddeleri ve farklı bağlayıcı türleri ve miktarları,

kullanılarak geopolimer harç ve beton numuneleri üretilebilir. Üretilen farklı karışımlar için çeşitli durabilite deneyleri yapılabilir. Üretilen geopolimer numunelere LA ikamesinin dayanım ve dayanıklılık özellikleri incelenebilir ve geliştirilebilir. Çalışma sonucunda üretilen geopolimer harç numuneleri yüksek dayanım gerektirmeyen yerlerde kullanılabilir. Bunun yanı sıra geopolimer numunelerin farklı oranlarda LA ikamesi ve SD ikamesinin dayanım ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkileri incelenebilir.



6. KAYNAKLAR

- Abdelmonem, A., El-Feky, MS, Nasr, ESA, & 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>
- Ahmed, HU, Mohammed, AA, Rafiq, S., Mohammed, AS, Mosavi, A., Sor, NH, Qaidi, SMA (2021).** Compressive strength of sustainable geopolymer concrete composites: a state-of-the-art review. *Sustainability*, 13, 13502. <https://doi.org/10.3390/su132413502>
- Akçaözöglü, K. (2007).** Silis dumanı içeren yüksek dayanımlı harçlarda numune boy değişiminin basınç dayanımı ve birim kısalma üzerindeki etkisi. Doktora Tezi. Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Alaloul, W. S., Musarat, M. A., Tayeh, B. A., Sivalingam, S., Rosli, M. F. B., Haruna, S., & Khan, M. I. (2020).** Mechanical and deformation properties of rubberized engineered cementitious composite (ECC). *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00385.
- Aleem, M. A., & Arumairaj, P. D. (2012).** Geopolymer concrete—a review. *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, 1(2), 118-122.
- Alehyen, S., Zerzouri, M., ELalouani, M., El Achouri, M., & Taibi, M. (2017).** Porosity and fire resistance of fly ash based geopolymer. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 9, 3676-3689.
- Almutairi, A. L., Tayeh, B. A., Adesina, A., Isleem, H. F., & Zeyad, A. M. (2021).** Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00733.
- Alonzo, C., Andrade, C., & Khoury, G. A. (2003).** Relating microstructure to properties, course on effect of heat on concrete. International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Italy.
- Aly, AM, El-Feky, MS, Kohail, M., Nasr, EAR (2019).** Performance of geopolymer concrete containing recycled rubber. *Construction and Building Materials*, 207, 136-144. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.121>
- Amari T., J. T. Nicolas, and K. W. Iddo, (1999)** “Resource Recovery From Rubber Tires”, *Resources Policy*, 25:179-188
- Ameri, F., Shoaie, P., Musaei, HR, Zareei, SA, Ban, CC (2020).** Partial replacement of copper slag with treated crumb rubber aggregates in alkali-activated slag mortar. *Construction and Building Materials*, 256, 119468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119468>

- Aygörmez, Y., Canpolat, O., Al-mashhadani, M.M., Uysal, M. (2020).** Elevated temperature, freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolymer composites, *Construction and Building Materials*, 235, 117502. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117502>
- Azmi, A. A., Abdullah, M. M. A. B., Ghazali, C. M. R., Ahmad, R., Musa, L., & Rou, L. S. (2019, August).** The effect of different crumb rubber loading on the properties of fly ash-based geopolymer concrete. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 551, No. 1, p. 012079). IOP Publishing.
- Azmi, A. A., Al Bakri Abdullah, M. M., Ghazali, C. M. R., Ahmad, R., Jaya, R. P., Abd Rahim, S. Z., ... & Sandu, A. V. (2022).** Crumb rubber geopolymer mortar at elevated temperature exposure. *Archives of Civil Engineering*, 97-105.
- B. Yeşilata, P. Turgut, F. Demir, (2008)** “Atık Taşıt Lastikleri ile Potansiyel Uygulamalar ve Beton İçerisinde Kullanımı”, *Çimento ve Beton Dünyası* 71: 65-74.
- Bajpai, R., Choudhary, K., Srivastava, A., Sangwan, K. S., & Singh, M. (2020).** Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120147.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H. (2002).** Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite). *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları*, İzmir, 282 s.
- Barbosa, V. F., MacKenzie, K. J., & Thaumaturgo, C. (2000).** Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. *International journal of inorganic materials*, 2(4), 309-317.
- Bheel, N., Awoyer, P., Shar, IA, Abbasi, SA, Khahro, SH, A, KP (2021).** Synergic effect of millet husk ash and wheat straw ash on the fresh and hardened properties of Metakaolin-based self-compacting geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00729. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00729>
- Bijeljić, J., Ristić, N., Grdić, Z., Ćurčić, G. T., Grdić, D., & Krstić, D. (2018).** Effects of ground granulated blast furnace slag on physical-mechanical characteristics of geopolymer mortars based on fly ash. *Planning, design, constr. and renewal in the civil engineering*, iNDis, 2018, 1231-1240.
- Bilgen, G., Kavak, A., Yıldırım, S.T., ve Çapar, Ö.F. (2010).** Yüksek Fırın Cürufunun İnşaat Sektöründeki Yeri ve Önemi, 2. Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi Bildirileri, 1, 506-513.
- Budh, C. D., & Warhade, N. R. (2014).** Effect of molarity on compressive strength of geopolymer mortar. *International Journal of Civil Engineering Research*, 5(1), 83-86.
- Chithambaram, S. J., Kumar, S., & Prasad, M. M. (2019).** Thermo-mechanical characteristics of geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 213, 100-108.

- Chowdhury, S., Mohapatra, S., Gaur, A., Dwivedi, G., ve Soni, A. (2021).** Study of various properties of geopolymer concrete–A review. *Materials Today: Proceedings*, 46, 5687-5695.
- D. D. L. Chung, (2002),** “Review improving cement-based materials by using silica fume,” *Journal of Materials Science*, c. 37, sayı 4, ss. 673–682, 2002.
- Davidovits, J. (2011).** Calcium based geopolymer. *Geopolymer Chemistry and Applications*, 3rd ed., Geopolymer Institute, Saint Quentin, France, 201-244.
- Davidovits, J., (2015)** *Geopolymer Chemistry & Applications*, Geopolymer Chemistry and Applications 4th edition.
- Deb, P. S., Sarker, P. K., & Barbhuiya, S. (2015).** Effects of nano-silica on the strength development of geopolymer cured at room temperature. *Construction and Building Materials*, 101, 675-683.
- Derinpinar, A. N., Karakoç, M. B., & Özcan, A. (2022).** Performance of glass powder substituted slag based geopolymer concretes under high temperature. *Construction and Building Materials*, 331, 127318.
- Doğan-Sağlamtimur, N., Oznuroz, H., Bilgil, A., Vural, T., & Süzgeç, E. (2019).** The Effect of Alkali Activation Solutions with Different Water Glass/NaOH Solution Ratios on Geopolymer Composite Materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 660(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/660/1/012003>
- Dong, M., Elchalakani, M., Karrech, A., & Yang, B. (2021).** Strength and durability of geopolymer concrete with high volume rubber replacement. *Construction and Building Materials*, 274, 121783.
- Durak, U., Karahan, O., Uzal, B., İlkentapar, S., & Atiş, C. D. (2021).** Influence of nano SiO₂ and nano CaCO₃ particles on strength, workability, and microstructural properties of fly ash-based geopolymer. *Structural Concrete*, 22, E352-E367.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. (2007).** Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917-2933.
- Eldin, N. N., & Senouci, A. B. (1993).** Rubber-tire particles as concrete aggregate. *Journal of materials in civil engineering*, 5(4), 478-496.
- Elifcan Y. (2019).** Ömrünü Tamamlamış Atık Lastiklerin Yeni Kullanım Alanlarının Araştırılması (Yüksek Lisans Tezi). Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Engin, Y. (2015).** Yüksek Fırın Cürufu & Yüksek Fırın Cürufu Çimento Üretimi Özellikleri Etkileri, 1-20. <https://www.betonvecimento.com>

- Erdoğan, T. Y. (1993).** Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara İMO, 1-8.
- Erdoğan, T. Y. (1995).** Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve kullanımı. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Bildiriler Kitabı, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, 1-13.
- Guerrieri, M., Sanjayan, J., & Collins, F. (2009).** Residual compressive behavior of alkali-activated concrete exposed to elevated temperatures. *Fire and Materials: An International Journal*, 33(1), 51-62.
- Haddad R.H. and Shannis L., (2004).** Post-fire behavior of bond between high strength pozzolanic concrete and reinforcing steel, *Construction and Building Materials*, No 18, 425-435.
- Hadi, M. N., Al-Azzawi, M., & Yu, T. (2018).** Effects of fly ash characteristics and alkaline activator components on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 175, 41-54.
- Hansen, T.C., (1965),** Influence of Aggregate and Voids on the Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar and Paste, *ACI Journal, Proceedings*, 6, 2, 193 – 216.
- Haruehansapong, S., Pulngern, T., & Chucheepsakul, S. (2014).** Effect of the particle size of nanosilica on the compressive strength and the optimum replacement content of cement mortar containing nano-SiO₂. *Construction and Building Materials*, 50, 471-477.
- Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2019).** Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment—A review of mechanical properties and microstructure. *Journal of cleaner production*, 223, 704-728.
- Hirsch, J.T., (1962),** Modulus of Elasticity of Concrete Affected by Elastic Moduli of Cement Paste Matrix and Aggregate, *Proceedings*.
- Imam, A., Kumar, V., & Srivastava, V. (2018).** Review study towards effect of Silica Fume on the fresh and hardened properties of concrete. *Advances in Concrete Construction*, 6(2), 145–157. <https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.2.145>
- Imtiaz, L., Rehman, S.K.U., Memon, S.A., Khan, M.K., Javed, M.F. (2020).** A review of recent developments and advances in eco-friendly geopolymer concrete, *Applied Science*, 10 (21), 7838. <https://doi.org/10.3390/app10217838>
- Islam, A., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., & Bashar, I. I. (2014).** The development of compressive strength of ground granulated blast furnace slag-palm oil fuel ash-fly ash based geopolymer mortar. *Materials & Design (1980-2015)*, 56, 833-841.
- Jaydeep, S. & Chakravarthy, B. J., (2013)** ‘Study On Fly Ash Based Geo-Polymer Concrete Using Admixtures’, *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 4(10), pp. 4614–4617. Available at: <http://www.ijettjournal.org>.

- Jindal, BB, Parveen, Singhal, D., Goyal, A. (2017).** Predicting relationship between mechanical properties of low calcium fly ash-based geopolymer concrete. Transactions of the Indian Ceramic Society, 76 (4), 258-265. <https://doi.org/10.1080/0371750X.2017.1412837>
- Jithendra, C., & Elavenil, S. (2020).** Effects of silica fume on workability and compressive strength properties of aluminosilicate based flowable geopolymer mortar under ambient curing. Silicon, 12(8), 1965-1974.
- Kaze, C. R., Adesina, A., Lecomte-Nana, G. L., Metekong, J. V. S., Samen, L. V. E. K., Kamseu, E., & Melo, U. C. (2021).** Synergetic effect of rice husk ash and quartz sand on microstructural and physical properties of laterite clay based geopolymer. Journal of Building Engineering, 43, 103229.
- Khater, H. M. (2013).** Effect of silica fume on the characterization of the geopolymer materials. International Journal of Advanced Structural Engineering, 5(1), 1-10.
- Khayat, K. H. (1992).** Silica Fume in Concrete--An Overview. Special Publication, 132, 835-872.
- Khoury, G. A. (2000).** Effect of fire on concrete and concrete structures. Progress in structural engineering and materials, 2(4), 429-447.
- Kong, D. L., & Sanjayan, J. G. (2010).** Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. Cement and concrete research, 40(2), 334-339.
- Konlas Otomotiv Lastik Sanayi. (2022.11.07),** Lastik Bilgileri, Konlas Otomotiv Lastik Sanayi Şirketi. <https://www.konlas.com.tr/LastikBilgileri.aspx?WheelPageId=27>
- Lilkov, V., Rostovsky, I., Petrov, O., Tzvetanova, Y., & Savov, P. (2014).** Long term study of hardened cement pastes containing silica fume and fly ash. Construction and Building Materials, 60, 48-56.
- Lin, W. M., Lin, T. D., & Powers-Couche, L. J. (1996).** Microstructures of fire-damaged concrete. Materials Journal, 93(3), 199-205.
- Lindenmuth, B. E. (2006).** An overview of tire technology. The pneumatic tire, 1, 13136.
- Liu, F., Chen, G., Li, L., & Guo, Y. (2012).** Study of impact performance of rubber reinforced concrete. Construction and building materials, 36, 604-616.
- Long, W. J., Li, H. D., Wei, J. J., Xing, F., & Han, N. (2018).** Sustainable use of recycled crumb rubbers in eco-friendly alkali activated slag mortar: Dynamic mechanical properties. Journal of cleaner production, 204, 1004-1015.
- Lougheed, T. J., & Papagiannakis, A. T. (1996).** Viscosity characteristics of rubber-modified asphalts. Journal of materials in civil engineering, 8(3), 153-156.
- Luhar, S., Chaudhary, S., & Luhar, I. (2018).** Thermal resistance of fly ash based rubberized geopolymer concrete. Journal of Building Engineering, 19, 420-428.

- Luhar, S., Chaudhary, S., & Luhar, I. (2019).** Development of rubberized geopolymer concrete: Strength and durability studies. *Construction and Building Materials*, 204, 740-753.
- Luhar, S., Nicolaidis, D., Luhar, I. (2021).** Fire resistance behaviour of geopolymer concrete: an overview. *Buildings*, 11(3), 82. <https://doi.org/10.3390/buildings11030082>
- Luhar, Salmabanu & Khandelwal, U., (2015)** ‘Compressive Strength of Translucent Concrete’, *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, 8(2), pp. 52–54. Available at: <http://www.ijeset.com/media/3N23-IJES0802105-V8-I2-PP52-54.pdf>.
- Madhav, T. V., Reddy, I. R., Ghorpade, V. G., & Jyothirmai, S. (2018).** Compressivestrength study of geopolymer mortar using quarry rock dust. *Materials Letters*, 231, 105-108.
- Mallikarjuna Rao, G., & Gunneswara Rao, T. D. (2015).** Final setting time and compressive strength of fly ash and GGBS-based geopolymer paste and mortar. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(11), 3067-3074.
- Manikandan, P., Vasugi, V. (2021).** Sürdürülebilir jeopolimer beton üretimi için bir alüminosilikat kaynak malzemesi olarak atık cam tozunun eleştirel incelemesi, *Silicon*, 13, 3649-3663. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00929-w>
- Mardani-Aghabaglou, A., Sezer, G. İ., & Ramyar, K. (2014).** Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. *Construction and Building Materials*, 70, 17-25.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M., & Concrete, M. (1997).** *Properties and Materials*, 154-159.
- Mustafa, R., Shivaprasad, K. N., & Das, B. B. (2019).** Effect of various additives on the properties of fly ash based geopolymer mortar. In *Sustainable Construction and Building Materials* (pp. 707-715). Springer, Singapore.
- Narayanan, A., & Shanmugasundaram, P. (2017).** An experimental investigation on flyash-based geopolymer mortar under different curing regime for thermal analysis. *Energy and Buildings*, 138, 539-545.
- Okoye, F. N., Durgaprasad, J., & Singh, N. B. (2016).** Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete. *Ceramics International*, 42(2), 3000-3006.
- Özer, Y. F. (2012).** Bazı endüstriyel atıkların betonun mekanik özelliklerine etkisi (Doctoral dissertation, Karadeniz Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Pacheco-Torgal, F. (2015).** Introduction to handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes. In *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes* (pp. 1-16). Woodhead Publishing.

- Phoo-ngernkham, T., Maegawa, A., Mishima, N., Hatanaka, S., & Chindapasirt, P. (2015).** Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA–GBFS geopolymer. *Construction and Building Materials*, 91, 1-8.
- Piasta, J. (1984).** Heat deformations of cement paste phases and the microstructure of cement paste. *Materials and Structures*, 17(6), 415-420.
- Rad, F. (1967).** *Rubberized Concrete, New Horizons in Construction Materials.* Envo Publishing Company.
- Rahim G. R. (2021).** Atık Lastik ile Üretilmiş Çevre Dostu Betonlarda Agregat Granülometrisinin Dayanım Özellikleri Üzerine Etkisi (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Ramezaniapour, A. A., & Moeini, M. A. (2018).** Mechanical and durability properties of alkali activated slag coating mortars containing nanosilica and silica fume. *Construction and Building Materials*, 163, 611-621.
- Rashad, A. M., Sadek, D. M., & Hassan, H. A. (2016).** An investigation on blast-furnace slag as fine aggregate in alkali-activated slag mortars subjected to elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 112, 1086-1096.
- Samantasinghar, S., & Singh, S. P. (2019).** Synthesis of fly ash-GGBS-blended geopolymer composites. In *Geotechnical Characterisation and Geoenvironmental Engineering* (pp. 83-91). Springer, Singapore.
- Sarshar, R., & Khoury, G. A. (1993).** Material and environmental factors influencing the compressive strength of unsealed cement paste and concrete at high temperatures. *Magazine of Concrete Research*, 45(162), 51-61.
- Shaikh, F. U. A., & Hosan, A. (2016).** Mechanical properties of steel fibre reinforced geopolymer concretes at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 114, 15-28.
- Shaikh, F. U. A., & Vimonsatit, V. (2015).** Compressive strength of fly ash based geopolymer concrete at elevated temperatures. *Fire and materials*, 39(2), 174-188.
- Shaikh, F., & Haque, S. (2018).** Effect of nano silica and fine silica sand on compressive strength of sodium and potassium activators synthesised fly ash geopolymer at elevated temperatures. *Fire and Materials*, 42(3), 324-335.
- Su, H., Yang, J., Ling, T. C., Ghataora, G. S., & Dirar, S. (2015).** Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. *Journal of Cleaner Production*, 91, 288-296.
- Süleyman, İ. P. E. K., & Mermerdaş, K. (2022).** Engineering properties and SEM analysis of eco-friendly geopolymer mortar produced with crumb rubber. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 7(2), 95-107.

- Tafraoui, A., Escadeillas, G., & Vidal, T. (2016).** Durability of the ultra high performances concrete containing metakaolin. *Construction and Building Materials*, 112, 980-987.
- Tanyildizi, H., & Coskun, A. (2008).** The effect of high temperature on compressive strength and splitting tensile strength of structural lightweight concrete containing fly ash. *Construction and building materials*, 22(11), 2269-2275.
- Thokchom, S., Ghosh, P. & Ghosh, S., (2010)** ‘Performance of fly ash based geopolymer mortars in sulphate solution’, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 3(1), pp. 36–40. doi: 10.25103/jestr.031.07.
- Tokyay, M., Erdoğan, K., (2009).** Cürüfler ve Cürüflü Çimentolar. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB)
- Topal, Ö., Karakoç, M. B., & 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.
- Tsang, H. H. (2013).** Uses of scrap rubber tires. *Rubber: Types, Properties and Uses*; Nova Science Publisher: New York, NY, USA, 477-491.
- Turgut, P., & Yeşilata, B. (2009).** Atık Lastik Katkılı Harç Plak ve Briketlerin Termo-Mekanik Davranışlarının Araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(4), 651–658.
- Vodák, F., Trtík, K., Kapičková, O., Hošková, Š., & Demo, P. (2004).** The effect of temperature on strength–porosity relationship for concrete. *Construction and Building Materials*, 18(7), 529-534.

- Wilkinson, A., Magee, B., Woodward, D., & Tretsiakova-McNally, S. (2016).** Development of resilient and environmentally responsible highway infrastructure solutions using geopolymer cement concrete. In Unknown Host Publication Civil Engineering Research Association of Ireland. https://ceri2016.exordo.com/files/papers/229/final_draft/229.pdf
- Xu, H., & Van Deventer, J. S. J. (2000).** The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 247-266.
- Zaetang, Y., Wongs, A., Chindaprasirt, P., & Sata, V. (2019).** Utilization of crumb rubber As aggregate in high calcium fly ash geopolymer mortars. *GEOMATE Journal*, 17(64), 158-165.
- Zhang, H., Li, L., Yuan, C., Wang, Q., Sarker, PK, Shi, X. (2020).** Deterioration of ambient-cured and heat-cured fly ash geopolymer concrete by high temperature exposure and prediction of its residual compressive strength, *Construction and Building Materials*, 262, 120924. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120924>

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mehmet Akif SAĞIR

ÖĞRENİM DURUMU:

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

Yayın Listesi:

- **Yolcu, A., Karakoç, M. B., Ekinci, E., Özcan, A., & 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.

