

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

**CAM TOZU KATKILI VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI
GEOPOLİMER BETONLARIN YANGIN DAYANIMININ ARAŞTIRILMASI**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aslıhan Nida DERİNPINAR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

AĞUSTOS 2021

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

**CAM TOZU KATKILI VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI
GEOPOLİMER BETONLARIN YANGIN DAYANIMININ ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Aslıhan Nida DERİNPINAR
36183621028**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

AĞUSTOS 2021

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

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

Çalışmalarında ayrıca yardımcı olan Sayın Arş. Gör. Ahmet ÖZCAN, Arş. Gör. Enes EKİNCİ, Sayın İnş. Müh. Mehmet Akif SAĞIR ve İnş. Müh. Abdurrahman YOLCU 'ya,

Ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmalarım süresince de benden her türlü desteklerini esirgemeyen aileme

teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Cam Tozu Katkılı ve Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Geopolimer Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Aslıhan Nida DERİNPINAR



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1 Geopolimer	3
2.2 Geopolimer Beton.....	4
2.2.1 Geopolimer betonun avantajları	7
2.2.2 Geopolimer betonun sınırlamaları.....	9
2.3 Cam Tozu.....	10
2.3.1 Camın tanımı ve tarihi.....	10
2.3.2 Camın üretilmesi	11
2.3.3 Camın özellikleri.....	11
2.3.4 Cam çeşitleri.....	12
2.3.5 Cam tozunun geri dönüşümü	13
2.3.6 Cam tozunun betonda kullanım avantajları.....	14
2.3.7 Camın kullanım alanları	15
2.3.8 Cam tozunun inşaat mühendisliğinde kullanım alanları	16
2.3.9 Türkiye’de cam sanayisi	16
2.3.10 Cam tozu ile ilgili yapılan çalışmalar.....	16
2.4 Yüksek Fırın Cürufu	21
2.5 Yüksek Sıcaklık Etkisi.....	26
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	31
3.1 Materyal	31
3.1.1 Yüksek fırın cürufu	31
3.1.2 Cam tozu	32
3.1.3 Agregası	33
3.1.4 Aktivatör	34
3.1.5 Aletler.....	34
3.1.5.1 Elekler	34
3.1.5.2 Çelik kalıplar	35
3.1.5.3 Beton karışım mikseri	35
3.1.5.4 Hassas terazi.....	35
3.1.5.5 Etüv	35
3.1.5.6 Basınç dayanım cihazı.....	36
3.1.5.7 Yüksek sıcaklık fırını	37
3.1.5.8 SEM-EDX cihazı	37
3.2 Yöntem.....	37
3.2.1 Agregası deneylerinde uygulanan yöntemler.....	37
3.2.2 Geopolimer beton karışım oranlarının belirlenmesi	38
3.2.3 Geopolimer beton üretimi, numunelerin yerine konması ve kür edilmesi.....	39
3.2.4 Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler.....	40
3.2.4.1 Basınç dayanımı	41
3.2.4.2 Ağırlık kaybı	41
3.2.4.3 Kılcal geçirimsizlik deneyi.....	41

3.2.4.4 Yangın dayanımı deneyi	43
3.2.4.5 Yarmada çekme dayanımı deneyi	44
3.2.4.6 SEM-EDX analizi	45
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	46
4.1 Agrega Deneyleri İle İlgili Bulgular ve Tartışma	46
4.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri İle İlgili Bulgular ve Tartışma	46
4.2.1 Kontrol numuneleri ile ilgili bulgular ve tartışma	48
4.2.1.1 Kontrol numunelerin basınç dayanımı	48
4.2.1.2 Kontrol numunelerin kılcal geçirimliliği	51
4.2.1.3 Kontrol numunelerin yarmada çekme dayanımı	52
4.2.1.4 Kontrol numunelerin görsel incelemeleri	54
4.2.2 Yangın sonrası geopolimer beton numuneleri ile ilgili bulgular ve tartışma	54
4.2.2.1 Yangın sonrası numunelerin basınç dayanımı	54
4.2.2.2 Yangın sonrası numunelerin kılcal geçirimliliği	58
4.2.2.3 Yangın sonrası numunelerin ağırlık kaybı	63
4.2.2.4 Yangın sonrası numunelerin görsel incelemeleri	66
4.2.3 Mikroyapı analizi	68
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	74
KAYNAKLAR	76
ÖZGEÇMİŞ	82

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 : Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi.	31
Çizelge 3.2 : Cam tozunun kimyasal bileşimi.	32
Çizelge 3.3 : Cam tozunun kimyasal ve fiziksel özellikleri.	32
Çizelge 3.4 : Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri.	34
Çizelge 3.5 : Geopolimer beton kodları.	39
Çizelge 3.6 : Geopolimer karışımlarda kullanılan malzeme miktarları (1 m ³ için).	39
Çizelge 4.1 : Agreganın özgül ağırlık ve su emme oranı.	46
Çizelge 4.2 : Geopolimer beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri.	47
Çizelge 4.3 : Geopolimer beton kontrol numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısı değerleri.	51
Çizelge 4.4 : Geopolimer beton numunelerin 28 günlük yarmada çekme dayanım değerleri.	52
Çizelge 4.5 : Yangın sonrası havada soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri.	55
Çizelge 4.6 : Yangın sonrası suda soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri.	56
Çizelge 4.7 : Geopolimer beton numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısı değerleri.	59
Çizelge 4.8 : Yangın sonrası havada soğuyan numunelerin ağırlık kaybı.	63
Çizelge 4.9 : Yangın sonrası suda soğuyan numunelerin ağırlık kaybı.	64

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 : Geopolimerizasyon süreci (Zhang ve diğ., 2020).....	4
Şekil 2.2 : Geopolimer betonun bileşenleri (Chowdhury ve diğ., 2021).	5
Şekil 2.3 : OPC ile GPC arasında performans karşılaştırması (Hassan ve diğ., 2019).....	8
Şekil 2.4 : Sürdürülebilir yapıda geopolimer betonun sistematik kullanımı (Hassan ve diğ., 2019).....	9
Şekil 2.5 : (a) bir kristalde düzenli iç yapı (SiO_4 dört yüzlü), (b) bir camda düzensiz iç yapı (Kavas ve diğ., 2004).	10
Şekil 2.6 : Atık camın tipik geri dönüşüm süreci (Kazmi ve diğ., 2020).....	14
Şekil 3.1 : Yüksek fırın cürufu.	31
Şekil 3.2 : Cam tozu.	33
Şekil 3.3 : Cam tozunun SEM görüntüsü.	33
Şekil 3.4 : İnce ve iri agrega.	34
Şekil 3.5 : Çelik kalıplar.	35
Şekil 3.6 : Hassas terazi.	35
Şekil 3.7 : Etüv.	36
Şekil 3.8 : Basınç dayanımı cihazı.	36
Şekil 3.9 : Yüksek sıcaklık fırını.	37
Şekil 3.10 : Kalıplara yerleştirilmiş geopolimer beton numuneler.	40
Şekil 3.11 : Geopolimer beton numunelerinin kür edilmesi.	40
Şekil 3.12 : Kılcal geçirimlilik deneyi için etüvde bekletilen geopolimer beton numuneler.	42
Şekil 3.13 : Kılcal geçirimlilik deneyi düzeneğindeki geopolimer beton numuneler.	43
Şekil 3.14 : Havada soğumaya bırakılan numuneler.	43
Şekil 3.15 : Suda soğumaya bırakılan numuneler.	44
Şekil 3.16 : Yarmada çekme dayanımı deneyi uygulanan geopolimer beton numune.	44
Şekil 4.1 : Geopolimer beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri.	47
Şekil 4.2 : Geopolimer beton kontrol numunelerin zamana bağlı kılcal geçirimlilik katsayı değerleri.	52
Şekil 4.3 : Geopolimer beton numunelerin yarmada çekme dayanım değerleri.	53
Şekil 4.4 : Kür süresini tamamlayan kontrol numunelerin görünümleri.	54
Şekil 4.5 : Yangın sonrası havada soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri.	55
Şekil 4.6 : Yangın sonrası havada soğuyan numunelerin basınç dayanımı deneyi sonrası görselleri.	55
Şekil 4.7 : Yangın sonrası suda soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri.	56
Şekil 4.8 : 750°C yangın sonrası suda soğutulan numuneye uygulanan basınç dayanımı deneyi sonrası görülen dağılma.	57
Şekil 4.9 : 5 dakikalık ölçüm için geopolimer beton numunelerin sıcaklığa bağlı olarak kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.	60
Şekil 4.10 : 15 dakikalık ölçüm için geopolimer beton numunelerin sıcaklığa bağlı olarak kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.	60
Şekil 4.11 : 30 dakikalık ölçüm için geopolimer beton numunelerin sıcaklığa bağlı olarak kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.	61
Şekil 4.12 : 60 dakikalık ölçüm için geopolimer beton numunelerin sıcaklığa bağlı olarak kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.	61

Şekil 4.13 : 1440 dakikalık ölçüm için geopolimer beton numunelerin sıcaklığa bağlı olarak kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.....	62
Şekil 4.14 : Yangın sonrası havada soğuyan numunelerin ağırlık kaybı.	64
Şekil 4.15 : Yangın sonrası suda soğuyan numunelerin ağırlık kaybı.	65
Şekil 4.16 : Yangın sonrası havada soğuyan numunelerin görsel incelemeleri.	66
Şekil 4.17 : Yangın sonrası suda soğuyan numunelerin görsel incelemeleri.....	67
Şekil 4.18 : 23°C’de bekletilen geopolimer beton numunelerin EDX analizi.	68
Şekil 4.19 : 150°C sıcaklıktaki geopolimer beton numunelerin EDX analizi.	68
Şekil 4.20 : 300°C sıcaklıktaki geopolimer beton numunelerin EDX analizi.	69
Şekil 4.21 : 450°C sıcaklıktaki geopolimer beton numunelerin EDX analizi.	69
Şekil 4.22 : 600°C sıcaklıktaki geopolimer beton numunelerin EDX analizi.	69
Şekil 4.23 : 750°C sıcaklıktaki geopolimer beton numunelerin EDX analizi.	70
Şekil 4.24 : 23°C’de bekletilen geopolimer beton numunelerin SEM analizi.	70
Şekil 4.25 : 150°C sıcaklıktaki geopolimer beton numunelerin SEM analizi.	71
Şekil 4.26 : 300°C sıcaklıktaki geopolimer beton numunelerin SEM analizi.	71
Şekil 4.27 : 450°C sıcaklıktaki geopolimer beton numunelerin SEM analizi.	72
Şekil 4.28 : 600°C sıcaklıktaki geopolimer beton numunelerin SEM analizi.	72
Şekil 4.29 : 750°C sıcaklıktaki geopolimer beton numunelerin SEM analizi.	73

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CaO	: Kalsiyum Oksit
CH	: Kalsiyum Hidroksit
CSH	: Kalsiyum-Silikat-Hidrat
ETC	: Yüksek Sıcaklıkta Kürleme
GC	: Geopolimer Çimento
GGBFS	: Granüle Yüksek Fırın Cürufu
GP	: Cam Tozu
K₂O	: Potasyum Oksit
K₂O₃Si	: Potasyum Silikat
KOH	: Potasyum Hidroksit
Li₂O	: Lityum Oksit
MgO	: Magnezyum Oksit
Na₂O	: Sodyum Oksit
Na₂SiO₃	: Sodyum Silikat
NaOH	: Sodyum Hidroksit
OPC	: Sıradan Portland Çimentosu
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SiO₂	: Silisyum Dioksit
TS	: Türk Standartları

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

CAM TOZU KATKILI VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI GEOPOLİMER BETONLARIN YANGIN DAYANIMININ ARAŞTIRILMASI

Aslıhan Nida DERİNPINAR

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

82+x sayfa

2021

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

Bu çalışmanın amacı yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonun yangın dayanımına cam tozunun etkisini araştırmaktır. %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında cam tozu, yüksek fırın cürufu (YFC) yerine kullanılarak ve NaOH ile aktive edilerek 5 grup geopolimer beton üretilmiştir. Kontrol numunelerine basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve kılcal geçirimlilik deneyleri yapılmıştır. 28 günlük kür süresinden sonra 150, 300, 450, 600 ve 750°C sıcaklığa maruz kalan numunelere havada ve suda soğutma işlemi uygulanmıştır. Daha sonra bu numunelere basınç dayanımı, yangın dayanımı, kılcal geçirimlilik ve ağırlık kaybı deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına bakıldığında oda sıcaklığında geopolimer beton numunelere cam tozu eklenmesi basınç dayanımını azaltmıştır. Yüksek sıcaklık sonrasında havada soğuyan numunelerden suda soğuyan numunelere göre daha yüksek dayanım elde edilmiştir. Kılcal geçirimlilik katsayısı ve ağırlık kaybı sıcaklığın artmasıyla artmıştır. Görsel inceleme sonucunda yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerde cam tozunun artmasıyla boşluk miktarının arttığı gözlenmiştir. Elde edilen veriler mikroyapı analizi ile desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer beton, yüksek fırın cürufu, cam tozu, yangın dayanımı.

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF FIRE RESISTANCE OF GLASS POWDER DOPED AND BLAST FURNACE SLAG BASED GEOPOLYMER CONCRETE

Aslıhan Nida DERİNPINAR

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

82+x sayfa

2021

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

The aim of this study is to investigate the effect of glass powder on the fire resistance of blast furnace slag based geopolymer concrete. 5 groups of geopolymer concrete were produced by using 0%, 5%, 10%, 15% and 20% glass powder instead of blast furnace slag (GGBFS) and activated with NaOH. Compressive strength, splitting tensile strength and capillary permeability tests were performed on the control samples. After a 28-day curing period, air and water cooling was applied to samples exposed to temperatures of 150, 300, 450, 600 and 750°C. Then, compressive strength, fire resistance, capillary permeability and weight loss tests were performed on these samples. Considering the test results, the addition of glass powder to geopolymer concrete samples at room temperature decreased the compressive strength. Higher strength was obtained from the samples cooled in air after high temperature compared to the samples cooled in water. The capillary permeability coefficient and weight loss increased with increasing temperature. As a result of visual inspection, it was observed that the amount of voids increased with the increase of glass powder in the samples exposed to high temperature. The obtained data were supported by microstructural analysis.

Keywords: Geopolymer concrete, blast furnace slag, glass powder, fire resistance.

1. GİRİŞ

Beton dünyada sudan sonra en çok kullanılan ikinci malzemedir. Beton üretiminde kullanılan ana malzeme olan Portland çimentosu küresel CO₂ emisyonunun yaklaşık olarak %10'unu oluşturduğu bilinmektedir. Portland çimentosuna olan bağlılık atmosfere salınan CO₂ miktarını artırmaya devam etmektedir. Bu sebeple beton üretiminde alternatif bir bağlayıcı bulma çalışmaları önem kazanmıştır (Zakka ve diğ., 2020).

Dünyada cam sektörü yılda yaklaşık %4 büyümekte olup, cam üretim kapasitesinin yaklaşık olarak 180 milyon ton olduğu düşünülmektedir. Camın üretim bölgelerine göre dağılımı %34 Asya, %30 Avrupa, %29 ABD ve %7 diğer bölgelerden oluşmaktadır. Ülkemizde cam sektörü ise 3.5 milyon ton/yıl yurt içi üretim kapasitesi ile dünyada önemli bir yere sahiptir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ve TÜBİTAK-MAM, 2019).

Cam, günlük yaşantımızın birçok alanında kullanılan bir malzemedir. Yiyecek ve içecek şişelerinde, kavanozlarda, pencere ve otomotiv endüstrisinde, kozmetikte, cihazlarda, elektronik cihazlarda ve diğer ürünlerde bulunabilir. İdeal olarak, atık cam yeni cam ürünler oluşturabilmek için yeniden kullanılmalı veya yeniden üretilmelidir (Nahi ve diğ., 2020).

Cam üretiminde silikanın yüksek sıcaklıkta eritilmesi için onlarca saat gerektiğinden, cam üretimde çok fazla enerji tüketir. Avrupa'da cam üretimi için yıllık enerji tüketimi, toplam endüstriyel enerji tüketiminin yaklaşık %20'sinden fazladır. 2018 yılında dünya genelinde yaklaşık 130 milyon ton cam üretilirken, camın yalnızca %2'si geri dönüştürülmüştür. Bu geri dönüştürme oranını artırmak için atık cam beton üretiminde çimento, ince ve iri agrega olarak kullanılabilir. Betonda kullanılan camın eritilmesine gerek olmadığı için enerji tüketimi azalır ve atık camın işlenmesi büyük ölçüde basitleştirilir (Guo ve diğ., 2020).

2006'nın sonunda ülkemiz 23 milyon ton çelik üretimi ile dünyada 11. sırada yer almaktadır. Dünyadaki demir çelik üretiminin %1.87'si Türkiye'de gerçekleşmektedir. 2014 yılının ilk 10 ayında 34 milyon ton demir çelik üretimi ile ülkemiz dünyada 8. sıradadır (Özcan, 2018). Dünya, çelik endüstrisinde yaklaşık 780 milyon ton ham çelik ve aynı anda yaklaşık 300 milyon ton katı atık üretmektedir. Bu nedenle ton ham çelik başına ortalama yaklaşık 200 ile 400 kg katı yan ürün üretilir (Nadeem ve Pophale, 2013). Atık ve

kirliliği azaltmak ve olabildiğince geri dönüştürmek hedeflenmektedir. Dolayısıyla beton endüstrisi bu hedeflere ulaşmak için birçok yöntem benimsemeye başlamıştır. İnaaat faaliyetlerinde hammaddelere kısmi ilave olarak endüstriyel katı atığın kullanılması sadece depolama alanından tasarruf sağlamakla kalmaz, aynı zamanda doğal hammaddelerin çıkarılması talebini de azaltır (Jahangiri ve diğ., 2017).

Bu çalışmanın amacı, cam tozu ile beraber YFC kullanarak geopolimer betonretmek veretilen betonun dayanım, geçirimsizlik ve yangına dayanıklılıkzelliklerini belirlemektir. Çalışmada bağlayıcı olarak YFC ve katkı olarak cam tozu, aktivatör olarak sodyum hidroksit, agrega olarak dere agregası kullanılmıştır. Bağlayıcı dozajı 400 kg/m^3 , optimum silis modülü 1.5, çözelti/bağlayıcı oranı 0.50 ve çözelti molaritesi 12 M olarak belirlenmiştir. Cam tozu ağırlıkça %0, %5, %10, %15 ve %20 oranında YFC yerine ikame edilerek 5 grup geopolimer beton hazırlanmıştır. Hazırlanan beton karışımları $50 \times 50 \times 50$ mm boyutlarındaki elik kalıplara yerleştirilmiş ve 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmıştır. Basınç dayanımı belirlenecek olan numuneler 7, 28 ve 90 gün laboratuvar ortamında $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 'de kr edilmiştir. Ayrıca 28 gün kr olan numunelerden yarmada çekme dayanımı ve kılcal geçirgenlik katsayı değerleri de elde edilmiştir. 28 gün kür süresinin ardından yüksek sıcaklıklara (150, 300, 450, 600 ve 750°C) maruz bırakılan numunelere hem havada hem de suda soğutma işlemi uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık sonrası soğuyan numunelerin yangın dayanımı, kılcal geçirgenlik katsayısı ve ağırlık kaybı belirlenmiştir. Ayrıcaretilen numunelerin mikroyapı analizleri ve görsel değerışimleri de incelenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

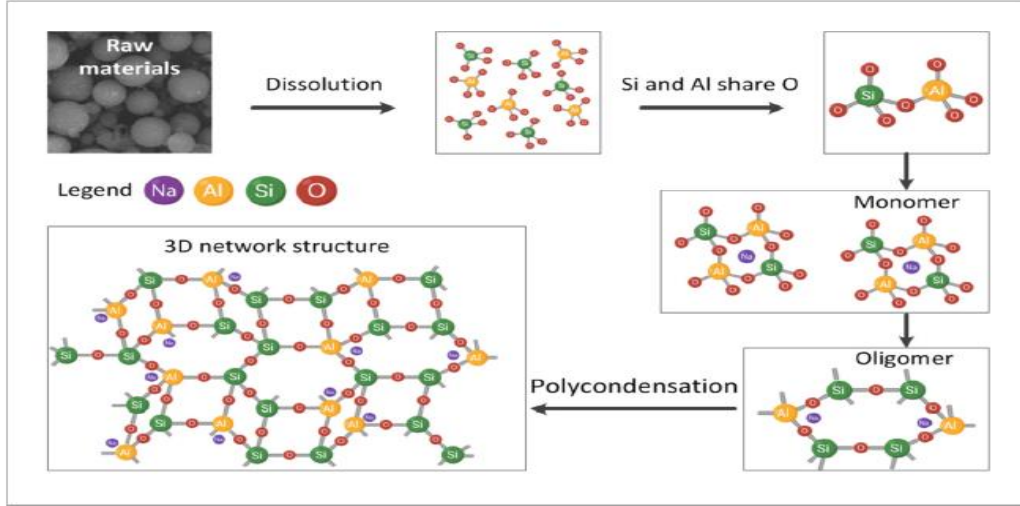
2.1 Geopolimer

1978'de "geopolimer" terimi Davidovits tarafından inorganik polimerik malzemeler üretilerek tanıtılmıştır. Geopolimerler, üç boyutlu amorf mikro yapıya sahip alüminosilikat malzemelerden yapılmıştır. Geopolimeri sentezlemek için alkali ortam (Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^+ , vb.) veya fosforik asit veya hümik asit gibi asidik ortam kullanılabilir. Alkali ortamda, geopolimerizasyon işlemi, silikon ve alüminyum minerallerinin veya alüminosilikatların oksitleri, bir polimerik Si-O-Al bağları oluşturmak için alkali çözelti ile reaksiyona girdiğinde gerçekleşir (Ng ve diğ., 2018).

Geopolimerler, metalürjik cürufların alkali, silikat, karbonat veya sülfat aktivasyonu ile oluşturulan malzemeleri de içeren ve baskın olarak kalsiyum silikat hidrat olan bir ürün veren, alkali ile aktifleştirilen bağlayıcıların daha geniş sınıfının bir alt kümesidir (Barik ve Mishra, 2020).

Geopolimer yeni bir alternatif bağlayıcı malzeme olarak ortaya çıkmaktadır. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kil vb. alümino silikat içeren atık malzemelerin alkali aktivasyonu ile yapılır. Geopolimer harç ve betonların yeşil bağlayıcı malzeme olması ve daha az enerji tüketmesi beklenir (Singh ve diğ., 2019).

Bir geopolimer yapmak için iki tür malzeme gereklidir. Biri alümina ve silika içeren kaynak malzeme, diğeri ise polimerizasyon reaksiyonunu aktive eden bir alkalidir. Kaynak malzemeler (alümino-silikat), kaolinit, kalsine kaolinit ve killeri gibi doğal mineraller olabilir. Alternatif olarak, geopolimerlerin sentezi için kaynak malzeme olarak uçucu kül, cüruf, kırmızı çamur, pirinç kabuğu külü ve silis dumanı gibi endüstriyel atık ürünler kullanılabilir (Ganesh ve Muthukannan, 2018).



Şekil 2.1 : Geopolimerizasyon süreci (Zhang ve diğ., 2020).

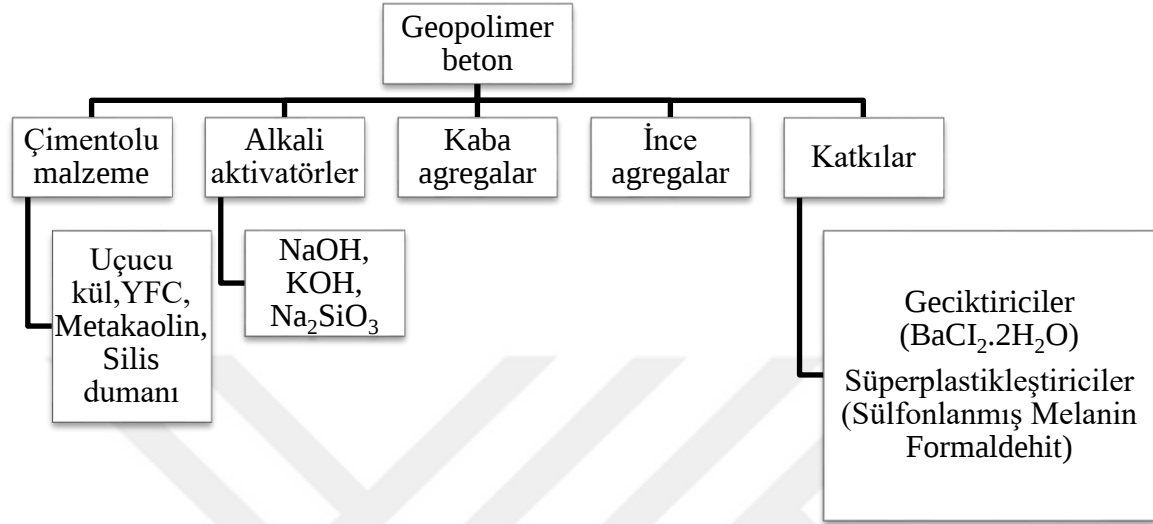
Şekil 2.1’de görüldüğü gibi geopolimerizasyon süreci genellikle alkali sıvılara ek olarak alümina/silikat bazlı kaynak malzemelerle başlar. Nihai ürünün basınç dayanımı, sertleşme süresi ve işlenebilirliği, esas olarak öncüllerin tipine ve oranlarına, aktivatörün tipine ve gücüne, karıştırma ve kürlenme koşullarına bağlıdır (Shehata ve diğ., 2020).

2.2 Geopolimer Beton

Beton, inşaat için kullanılan güvenilir, dayanıklı ve çok yönlü bir malzemedir. Beton, büyük miktarlarda Portland çimentosu gerektirir ve dünyada su gibi çok kullanılan bir malzemedir. Çimento üretimi büyük miktarda enerji tüketir ve aynı zamanda atmosfere büyük miktarda karbondioksit üretir. Bu da küresel ısınmaya ve çevreyi etkileyen sera gazlarının salınmasına yol açar. Karbondioksit emisyonunun azaltılması için çimento elimine edilerek uçucu kül, yüksek fırın cürufu, cüruf, nano silika vb. atık malzemelerin alkali sıvılar ile aktive edilerek üretilen betona “geopolimer beton” denir (Niveditha ve Koniki, 2020).

1950'lerin başlarında, günümüzde geopolimer beton olarak bilinen ve orijinal olarak "toprak silikat betonları" ve "toprak çimentosu" olarak adlandırılan bir beton malzeme geliştirilmiştir. Geopolimer beton, uçucu kül, taban külü, yüksek fırın cürufu, öğütülmüş yüksek fırın, pirinç kabuğu külü, silis dumanı, metakaolin, volkanik tüfler, maden tortuları gibi farklı malzeme ile zeolitler, silvers trim, silikatlar, sodyum silikat, sodyum hidroksit/potasyum silikat ve potasyum hidroksit gibi alkali ile aktifleştirilmiş çözeltilerin

kombinasyonundan oluşan geleneksel çimento betonunun alternatif malzemesidir (Thamilselvi ve diğ., 2017). Şekil 2.2.'de geopolimer betonun bileşenleri görülmektedir.



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

De Toledo Pereira ve diğ., (2018) geopolimer betonların mekanik, termal ve mikroyapı özellikleri ile yüksek performanslı betonları karşılaştırmışlardır. Geopolimer bağlayıcının (GC) hazırlanması için metakaolin, yüksek fırın cürufu ve potasyum hidroksit temel malzeme olarak kullanılmıştır. İncelenen GC, 0.016 mm'nin altında elenmiş metakaolin ve cüruf partikülleri karışımının yüksek alkalimli, pH'ı yaklaşık 14 olan bir KOH çözeltisi içinde çözülmesine yönelik geleneksel yöntemle hazırlanmıştır. Bu çözülme, yaklaşık 5 dakikalık bir geopolimerizasyon periyodu boyunca yaklaşık 25°C'de oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Hacimce hazırlanan %18 oranında geopolimer bağlayıcı üzerine, hacimce %40 çakıl ve hacimce %25 kum ilave edilmiştir. Brezilya standardına göre 1, 7 ve 28 günlük kürlemeden sonra 5 örnekte hem GC hem de HPC betonlarında basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Ek olarak 2 saat agrega ve su, GC ile karıştırıldıktan sonra 5 GC beton örneğinde özdeş basınç dayanımı deneyleri de gerçekleştirilmiştir.

GC, 2 saatlik kürden sonra makul bir basınç dayanımı geliştirirken, yüksek performanslı portland çimentolu (HPC) beton macun kıvamında yumuşak olduğu, HPC betonun GC betondan daha gözenekli ve çatlaklı olduğu görülmüştür. Sonuçlar, GC betonunun

ortalama basınç dayanımının 7 güne kadar daha yüksek olduğunu, ancak 28 günden sonra ortalama olarak HPC betonuyla neredeyse aynı basınç dayanımına sahip olduğunu göstermiştir. GC beton fraktografları, küçük gözeneklere ve mikro çatlaklara sahip düzgün bir tek fazlı geopolimerik matrise iyi yapışmış agregaları ortaya çıkarırken, üç fazlı HPC matrisi, agrega arayüzleri ile ilişkili daha yüksek gözeneklilik ve çatlaklar göstermiştir.

Tuyan ve diğ., (2017) yaptıkları çalışmada C tipi ve F tipi uçucu kül kullanarak geopolimer betonların mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık dirençlerini incelemişlerdir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat, agrega olarak ise kalker esaslı agrega kullanılmıştır. Geopolimer ve çimentolu betonların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü ve yüksek sıcaklık direnci incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda F tipi uçucu kül ile üretilen geopolimer betonun mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık direnci çimento esaslı betona göre yüksek, C tipi uçucu kül ile üretilen geopolimer betonun ise çimento esaslı betona göre düşük olduğu görülmüştür.

Deb ve diğ., (2015) F sınıfı uçucu külün %10 veya %20'sini GGBFS (öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu) ile değiştirmiş ve sodyum silikat:sodyum hidroksit (SS/SH) oranının 1.5 veya 2.5 olduğu geopolimer beton karışımlarının büzülme davranışını araştırmışlardır. Oda sıcaklığında kürlen 4 geopolimer ve 1 sıradan Portland çimentosu (OPC) beton karışımının büzülmesi incelenmiş ve farklı karışım oranlarına sahip geopolimer betonların büzülme davranışları ile OPC betonun büzülme davranışları arasında da karşılaştırmalar yapılmıştır. Geopolimer beton karışımlarında iki karışım değişkeni kullanılmıştır. Bunlar GGBFS yüzdesi ve SS/SH oranıdır ve alkalın sıvı miktarı toplam bağlayıcı maddenin %40'ı olarak kullanılmıştır. Tüm numuneler oda sıcaklığında $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ve % 70 ± 10 bağıl nemde kürlenip numune uzunluğundaki değişiklik belirli aralıklarla ölçülmüştür ve büzülme değerleri 180 güne kadar belirlenmiştir. Oda sıcaklığında kürlen geopolimer betonda cüruf içeriğinin artması ve SS/SH oranının azalması ile büzülmenin azaldığı bulunmuştur. GGBFS katkılı uçucu kül esaslı geopolimer betonun basınç mukavemeti cüruf içeriğinin artmasıyla artmıştır. En yüksek basınç dayanımı, SS/SH oranı 1.5 ve %20 cüruf lu karışımda bulunmuştur.

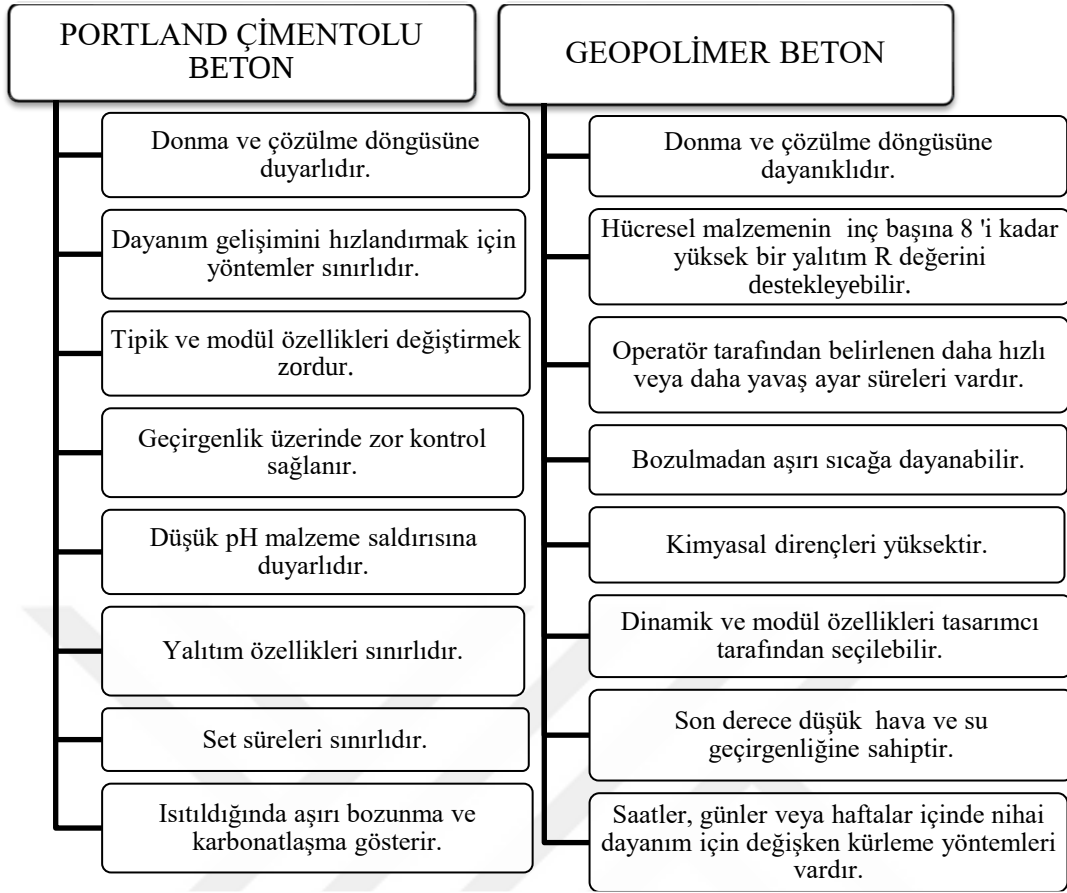
Olivia ve Nikraz (2013), yaptıkları çalışmada %3.5 NaCl çözeltisine sürekli daldırma ve NaCl çözeltisinde 80°C 'de ve 24 saatlik döngüde hızlandırılmış ısıyla kurutma işlemine tabi tutulan F sınıfı uçucu kül kullanılarak elde edilen geopolimer betonun özelliklerinden basınç dayanımı, gözeneklilik ve ağırlıkta değişiklik özelliklerini incelemişlerdir. Kontrol betonu olarak sıradan bir Portland Çimento Tip I, alkali çözeltisi olarak sodyum hidroksit

ve sodyum silikat kombinasyonu kullanılmıştır. Karışımdaki işlenebilirliği arttırmak için bir naftalin sülfonat polimer bazlı süperplastikleştirici dahil edilmiştir. Hem geopolimer hem de OPC beton numuneleri farklı yöntemlerle kürlenmiştir. 12h-70°C, 24h-60°C ve 24h-75°C olmak üzere üç farklı kür rejimi ile kür edilmiştir. Kalıplardan çıkarıldıktan sonra geopolimer numuneler, 23-25°C sıcaklıktaki kür odasında hava ile kürlenmeye bırakılmıştır. OPC numuneleri testten önce 28 gün boyunca kür havuzuna yerleştirilmiştir. Hedef dayanıma ulaşıldığında örnekler %3.5 sodyum klorür çözeltisine daldırılmıştır. Çözeltiler ayda bir kez değiştirilmiştir. Örnekler iki farklı maruziyet rejimine yani sürekli daldırma ve ıslatma-kurutma döngülerine tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı değişikliği 28, 91 ve 365 günlerde ölçülmüştür. Ağırlık değişimi ise 1, 7, 14, 21, 28, 42, 56, 84, 112, 140, 168, 196, 224, 252, 280, 380, 336, 364 günlerde alınmıştır. Deniz suyuna döngüsel olarak maruz kalmak OPC betonunun parçalanma oranını arttırmıştır. Geopolimer beton sürekli daldırma ve ıslatma-kurutma döngülerinden sonra mukavemet ve bozulmada önemli bir değişiklik göstermemiştir. Islatma-kurutma döngülerine maruz kaldıktan sonra yüksek sıcaklık nedeniyle geopolimer betonun yüksek direnci, daha hızlı kristalizasyondan kaynaklanmıştır. Geopolimer betonun, basınç dayanımı, gözeneklilik ve ağırlık değişiminden yola çıkarak OPC betonuna göre döngüsel maruziyet altında daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

2.2.1 Geopolimer betonun avantajları

Normal Portland Çimentosunun (OPC) dezavantajları göz önüne alındığında ve küresel ısınmayı azaltmak için geopolimer beton, inşaat elemanlarında OPC'yi ikame etme potansiyeline sahiptir. Geopolimer beton, sürdürülebilir gelişme için üstün bir ikame olan çevre dostu yapı malzemeleri sınıfı olarak kabul edilir (Barik ve Mishra, 2020).

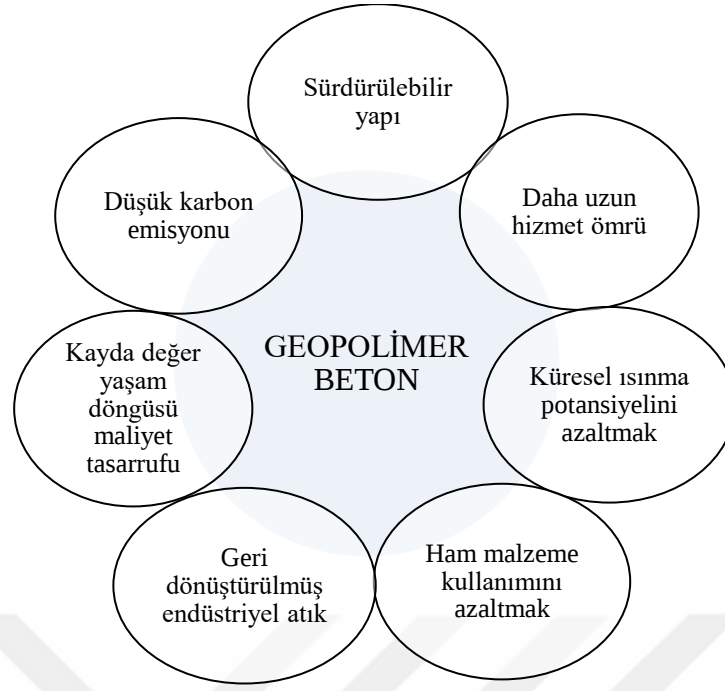
Geopolimer beton, katma değerli inşaat yapı malzemelerine dönüştürülen, çevreye zararlı olan sanayiden çıkan atık ve yan ürünleri kullanarak doğal kaynakları korur ve çevre dostudur (Thamilselvi ve diğ., 2017).



Şekil 2.3 : OPC ile GPC arasında performans karşılaştırması (Hassan ve diğ., 2019).

Geopolimer beton (Zerfu ve Ekaputri, 2016):

- Yüksek mukavemet sağlar ve daha ince kesitlerin tasarlanmasını sağlayan hafif beton olarak kullanılabilir.
- Dayanıklı malzeme sağlar.
- Düşük özgül yayılma, düşük kuruma büzülmesi, iyi sülfat ve korozyon direnci vardır.
- Daha yüksek sıcaklık, tuz ve donma-çözülme direnci vardır.
- Eğriler, kemerler ve diğer tasarımlara tasarım esnekliği sağlar.
- OPC betonundan kaynaklanan CO₂ emisyonlarında % 90'a varan azalma sağlar.
- Atık malzemelerin geri dönüşümünü kullanarak güç endüstrileri çevresinde temiz bir ortam oluşturur.
- Dayanıklı malzeme sağladığı için düşük bakım maliyeti vardır.



Şekil 2.4 : Sürdürülebilir yapıda geopolimer betonun sistematik kullanımı (Hassan ve diğ., 2019).

2.2.2 Geopolimer betonun sınırlamaları

Geopolimer betonun dezavantajları aşağıda özetlenmiştir (Zerfu ve Ekaputri, 2016):

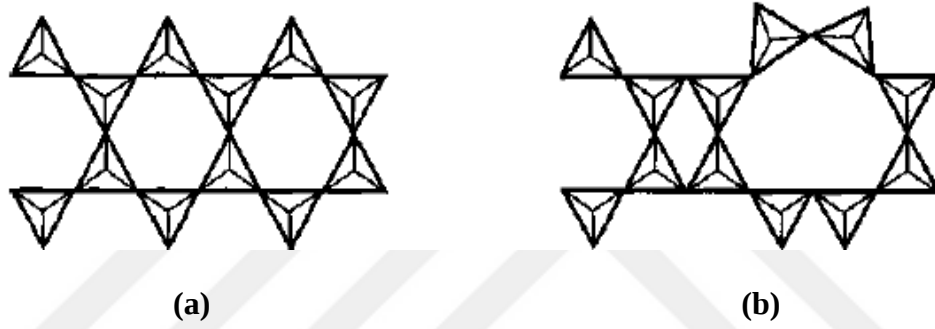
- Geopolimer karışımındaki alkali çözeltisi pahalıdır. Aynı miktarda uçucu külün maliyeti çimentodan önemli ölçüde daha ucuz olsa da, alkali çözeltinin doğrudan fiyatı toplam maliyetin %60'ından fazlasını kapsamaktadır. Bununla birlikte, büyük ölçüde, fiyat endüstriyel ölçekte uygulama için azaltılabilir.
- Geopolimer beton kırılğan olduğundan yüksek darbe yükünde geniş yayılma çatlakları oluşturur. Bu, pik yüke ulaşıldığında herhangi bir uyarı olmadan kırılabileceğini gösterir. Pratik yapı için bundan kaçınılmalıdır.
- Bununla birlikte, önceki çalışmalara göre, bu problem karışımda lifler kullanılarak iyileştirilebilir. Liflerin eklenmesi geopolimer betonun hızlı yayılma çatlaklarını önler. Bu nedenle fiber takviyeli uçucu kül kompozitleri daha yüksek çekme mukavemeti ve süneklikte iyileşme gösterebilir.
- Erken yaşlarda dayanım gelişimi daha çok kürlenme durumuna bağlıdır. Geopolimer betonu sertleştirmek için yüksek sıcaklık gerekir. Bu sınırlama, şantiyenin yüksek sıcaklık ve nem dalgalanmalarında bulunduğu tropik olmayan ülkelerde yerinde beton dökümünde büyük sorunlar olabilir. Tropikal ülkelerde bu sorun olmayabilir ve doğal olarak kürlenme yapılabilir.

- Takviye çubuğu ve geopolimer beton arasındaki bağ dayanımı Portland çimentosunda olduğu gibi iyi çalışmadığı da bilinmektedir.

2.3 Cam Tozu

2.3.1 Camın tanımı ve tarihi

Camı kuvarsit başta olmak üzere feldspat, dolomit, kireçtaşı ve soda meydana getirir. Bu malzemeler eritilir, aniden soğutulur ve cam oluşur. Ani soğutma sonucunda sıvı haldeki molekül yapısını korur ve katılaşır. Yüksek viskoziteye sahip olduğundan düzgün kristal yapıda değildir. Bu sebeple sert ve katı olan cam, sıvı gibi düzensizdir (Kavas ve diğ., 2004).



Şekil 2.5 : (a) bir kristalde düzenli iç yapı (SiO_4 dört yüzlü), (b) bir camda düzensiz iç yapı (Kavas ve diğ., 2004).

Cam; amorf iç yapılı, yüksek sertlikte, saydam, dış etkenlere karşı dayanıklı, ışığı düzgün kıran, güneş radyasyonuna geçirimli bir malzemedir. Ana maddesi ise saydamlık özelliğini sağlayan, amorf bünye içinde erimiş ve dağılmış durumda bulunan silisyum dioksit (SiO_2)'tir (Yüksel, 2009).

Cam insanlar tarafından keşfedilen ve üretilen en eski malzemelerden biridir. Şu ana kadar arkeolojik kazılarda bulunan en eski cam türü Mısır'a ait olup M.Ö.5500 yıllarında bulunmuştur (Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği, 2012).

Haçlı seferleri sırasında (M.S. 1096-1270) Venedik'te cam endüstrinin kurulmasıyla Avrupa'da cam endüstrisi gelişmiştir. Cam yapımı Almanya ve diğer Kuzey Avrupa ülkelerinde 1400'lerin sonu ile 1500'lerin başında önem kazanmıştır ve 1500'lü yıllarda İngiltere'de önemli hale gelmiştir. İngiliz cam üreticisi George Ravenscroft 1674 yılında kurşunlu camı icat etmiştir (Karasu ve diğ., 2017).

1890'dan sonra camın gelişimi, üretimi ve kullanımı hızla artmıştır. 1902'de Irving W. Colburn, pencere camının seri üretimini mümkün kılan düz cam çekme makinesini icat etmiştir. Seri üretim için mekanik teknoloji, Sanayi Devrimi'nin son aşamalarında, Michael Owens'ın 1903'te saatte 2500 şişe üretebilen otomatik bir şişe üfleme makinesi icat etmesiyle başlamıştır. 1959'da Sir Alastair Pilkington, devrim niteliğindeki düz cam üretim tekniğini icat etmiştir. Metodu, kalay veya kurşun gibi erimiş metalin düz yüzeylerine camın dökülmesini içermektedir. Pilkington yöntemi bugün cam üretiminin %90'ında kullanılmaktadır (Karasu ve diğ., 2017).

2.3.2 Camın üretilmesi

Cam; başta silika (kum) olmak üzere feldspat, kireçtaşı, soda külü ve iz elementlerden üretilir. Üretim için kum, kalker, feldspat, dolomit, soda ve sodyum sülfat reçeteye göre hazırlanır, karıştırılır, cam fırınlarında 1500-1600°C'de eritilir. Oluşan malzeme üfleme, dökme-silindirme, pres, haddeleme, yüzdürme, savurma veya akıtma yöntemlerinden biri kullanılarak istenilen şekle sokulur. Biçimlendirme işleminden sonra elde edilen cam, kullanılacak niteliklere sahip olmayabilir. Bu nedenle kesim, temperleme, renklendirme gibi işlemler uygulanır (Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği, 2012).

Cam sırasıyla harman hazırlanması, ergitme işlemi, biçimlendirme işlemi ve tavlama işlemi uygulanarak üretilmektedir.

2.3.3 Camın özellikleri

Fiziksel özellikler: Cam, doğada yakılıp yakılamayan inorganik ve metalik olmayan, aşınmaya karşı yüksek dirençli ve yanmaz özelliklere sahip oldukça dayanıklı bir malzemedir. Genellikle doğada kırılıgandır ve pürüzsüz yüzey dokusu hidrofobiktir. Camın en-boy oranı doğal kuma göre daha yüksektir (Mehta ve Ashish, 2019). Camların özgül ağırlığı 2,2-7,2 g/cm³ arasında değişmekte olup pencere ve şişe cam yoğunlukları 2.3-2.6 g/cm³ arasındadır. Camlar genelde 100-350°C arasındaki sıcaklıklarda soğuk su içerisine atıldıklarında bu sıcak şok etkisine dayanabilirler (Kılıçoğlu, 2013).

Mekanik özellikler: Cam üretildikten hemen sonra en yüksek dayanıma sahiptir ve cam darbelere karşı dayanıksızdır. Camın teorikte dayanabileceği maksimum çekme dayanımı cam lifler üzerinde herhangi bir hata olmaksızın 3000 kN/mm², pratikte ise 20-200 kN/mm²'dir. Basınç dayanımı 500-900 MPa, elastisite modülü 4.5-10 GPa, poisson oranı 0.22'dir (Yüksel, 2009).

Optik özellikler: Camların optik özellikleri son derece önemlidir ve ışığın kırılması, soğurulması, iletilmesi olmak üzere üç kategoriye ayrılabilir (Hasanuzzaman ve diğ., 2016). Işığın bir yüzeyden geri dönmesine yansıma denir. Camların önemli bir optik özelliği olup aynalar ve dekoratif camlar için önemlidir. Yansıma hiç olmadığında gelen ışığın bir miktarı diğer tarafa geçtiğinde kalan miktarı da cam tarafından emilmiştir. Kırılma ise ışığın sapmasıdır. Bu özellikten optik aletlerde faydalanılır (T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, 2012).

Elektriksel özellikler: Camların dış yörüngedeki elektronların güçlü bağ kuvvetleri ile kısıtlanmış olması ve elektronlarının serbest halde bulunamaması elektrik iletilmemesine neden olur. Yani camların elektrik dirençleri yüksektir (Yüksel, 2009). Camlar yüksek yalıtım özellikleri nedeniyle elektrik ve elektronik mühendisliği alanında conta, yüksek gerilim izolatörleri, mikroelettronik paketleme, yüksek vakumlu tüpler, lambalar vb. üretiminde kullanılmaktadır (Hasanuzzaman ve diğ., 2016).

Kimyasal özellikler: Kimyasal dayanıklılık, suyun aşındırıcı etkisine, asitlerin, alkalilerin ve tuzların sulu çözeltisine direnme kabiliyeti ile ölçülen malzemenin özelliğidir. Camların kimyasal dayanıklılığı çoğu metal ve polimerden üstündür. Camlar, özellikle yüksek sıcaklıklarda, çok yüksek veya düşük pH'a maruz kalsalar bile mükemmel dayanıklılığa sahiptirler (Hasanuzzaman ve diğ., 2016).

2.3.4 Cam çeşitleri

Yaygın olarak kullanılan cam çeşitleri şöyledir:

Soda-kireç camlar: En yaygın cam türüdür, nispeten ucuzdur ve geri dönüşüme uygundur. Bu cam ağırlıkça %70-75 SiO₂, ağırlıkça %12-16 Na₂O ve ağırlıkça %10-15 CaO bileşiminden oluşmaktadır (Hasanuzzaman ve diğ., 2016). Düz cam, cam kaplar, normal pencere camları, cam ev eşyaları ve ışıklandırma ürünlerinde kullanılır (Kılıçoğlu, 2013).

Kurşunlu camlar: Kirecin kurşun oksit ile değiştirildiği soda-kireç camına benzer. Kurşun cam tipik olarak ağırlıkça %55–65 SiO₂, ağırlıkça %18–38 PbO ve ağırlıkça %13–15 Na₂O veya K₂O içerir. Radyasyon korumasında kullanım için uygundur (Hasanuzzaman ve diğ., 2016).

Borosilikat camlar: Cam ağ oluşturunucuları olarak önemli miktarda silika ve bor oksit içerir ve tipik olarak ağırlıkça %70-80 SiO₂, %7-13 B₂O₃, %4–8 Na₂O veya K₂O, ve %2-8

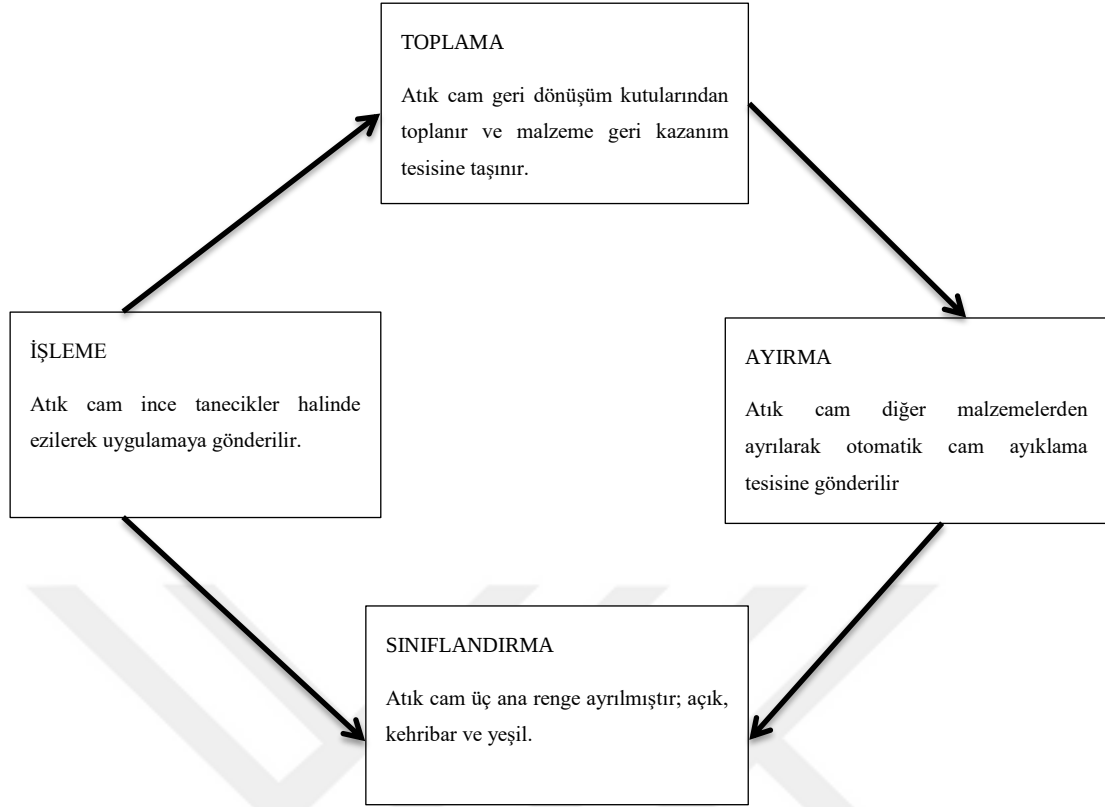
Al_2O_3 'ten oluşur (Hasanuzzaman ve diğ., 2016). Bu camlar ısıya dayanıklı fırın kaplarında, laboratuvar gereçlerinde, borularda ve projektörlerde kullanılmaktadır (Kılıçoğlu, 2013).

Alüminosilikat camlar: Genellikle ağırlıkça %52–58 SiO_2 , ağırlıkça %15–25 Al_2O_3 ve ağırlıkça %4–18 CaO içeren tipik bir bileşime sahip üçlü bir sistemden hazırlanır. Termometreler, yanma tüpü, tencere, halojen lambalar, fırınlar ve cam elyafı izolasyonunda kullanılır (Hasanuzzaman ve diğ., 2016).

2.3.5 Cam tozunun geri dönüşümü

Günümüzde, dünya çapında hızla büyüyen sanayileşme, endüstriyel atık yönetiminin çevresel etkilerine ilişkin endişeleri artırmıştır (Si ve diğ., 2020). Ürünlerin yoğun kullanımı nedeniyle tüm dünyada büyük miktarlarda atık cam oluşmaya başlamıştır. Bu katı atıkların çoğu, düzenli depolama sahalarına gömülmüştür ve bu atıkların toprağa doldurulması elverişsizdir. Çünkü bu atıklar biyolojik olarak parçalanmaz ve bu da bu süreci çevre açısından olumsuz bir hale getirir. Sürdürülebilir kalkınma için yeni bir çözüme başlamak gereklidir. Sürdürülebilir katı atık yönetiminin en iyi çözümlerinden biri, bu atığın mümkün olduğunca azami düzeye indirilmesi, yeniden kullanılması ve geri dönüştürülmesidir (Al-Obeidy ve Khalil, 2016).

Çimentoyu kısmen değiştirebilen ve beton yapıların hizmet ömrünü artıracak alternatif malzemelerin uygulanması için araştırma yapılması, çevresel ve teknolojik açıdan gereklidir (Guignone ve diğ., 2020). Portland çimentosu ve betonda geri dönüştürülmüş atık camların kullanımı, artan bertaraf maliyetleri ve çevresel kaygılar nedeniyle dünya çapında büyük ilgi görmüştür (Shi ve Zheng, 2007). Cam, kalite ve değer kaybı olmaksızın sonsuz şekilde geri dönüştürülebilir (Ogundairo ve diğ., 2019). Atık camın inşaat malzemelerinde geri dönüştürülmesi, atık camın depolanması için depolama alanından tasarruf etmenin yanı sıra atık camın bertarafı için çevresel etkileri ve katı atık yönetimi maliyetini azaltabilir. Ayrıca atık camın agrega veya kısmi çimento ikame malzemesi olarak kullanılması, potansiyel olarak doğal kaynakları koruyabilir ve çimentolu malzeme üretim sürecinde enerji kullanımını ve maliyeti azaltabilir (Si ve diğ., 2020).



Şekil 2.6 : Atık camın tipik geri dönüşüm süreci (Kazmi ve diğ., 2020).

Atık malzemelerin inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımı, sürdürülebilir bina inşaatı kavramını entegre ettiği için son birkaç yılda aşırı büyümüştür. Bununla birlikte, kırmızı çamur, uçucu kül, yakıt atıkları, hurda lastikler, yıkım atıkları ve yüksek fırın cürufu gibi diğer geri dönüştürülebilir atıkların yanı sıra, inşaat mühendisliği uygulamalarında atık cam kullanımı nispeten yeni ortaya çıkan bir fikirdir. Çeşitli çalışmalar, atık camın beton, jeoteknik, polimerler ve diğer cam bazlı ürünler dahil bir dizi inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanım potansiyelini göstermiştir (Kazmi ve diğ., 2020).

2.3.6 Cam tozunun betonda kullanım avantajları

Cam tozunun betonda kullanım avantajları şunlardır (Shi ve Zheng, 2007):

- Düzenli depolama vergisi nedeniyle artması muhtemel olan atık bertaraf maliyetlerini azaltır.
- Her yıl büyük miktarda birincil hammadde tasarrufu sağlayarak çevreyi korur.
- Kırsal alanların korunmasına yardımcı olarak düzenli depolama sahalarımızın ömrünü uzatır.

- Çimento yerine kullanılan öğütölmüş cam tozu kullanıldığında, önemli miktarda enerji tasarrufu sağlar ve üretici çimento klinkerinden yayılan CO₂ ve diğler hava kirleticilerinin miktarını azaltır.
- Atık sorunu ve geri dönüşümün yararları konusunda halkın farkındalığını artırır.
- Maliyetten veya kaliteden ödün vermeden geri dönüştürölmüş cam bazlı ürünler için birçok alternatif kullanım sunar.

2.3.7 Camın kullanım alanları

Camın başlıca kullanım alanları şunlardır (Ogundairo ve diğ., 2019):

- Isı yalıtımı: Yalıtımlı kapalı cam, ısıyı yapıdan içeriye yansıtır ve ısı kaybını önler.
- Güneş koruması: Cam, bir yapıya sızan güneş enerjisinin kapsamını düzenleyebilir ve güneşin sıcaklığının bir kısmını yansıtırken ışığa izin verir.
- Sağlık, Emniyet ve Güvenlik: Bu amaçla kullanılan cam, zarara karşı koruma sağlar, mülkiyeti korur, ayrıca dış mekan sesine karşı koruma sağlar, yerleşimcilerin uyumunu ve refahını korur. Son olarak, antibakteriyel cam, kendisiyle etkileşime giren tüm mikroorganizmaların % 99'unu ortadan kaldırır ve böylelikle refahı garanti eder.
- Estetik: Alanlar şeffaf, açık veya iddiasız renk tonlarında oluşturulabilir. Yarı saydam cam alanı genişletir; boyalı cam, alanı şeffaf olmayan hale getirir ve ayrıca daha sonra rengi yayararak boşlukları izole eder. Dekoratif cam ışığı böler. Yansıyan cam aynalar ve alanı genişletir. Katmanlı ve renkli camlar için estetiğı güvenlikle pekiştirir. Sertleştirilmiş ve serigrafi baskılı cam, iç mekan oluşturmanın özelleştirilmesine yardımcı olur. Elektrominesans (LED'li) cam, ışık ve hayali özellikler oluşturur. Tasarlanmış ve oyulmuş cam, mobilya üreticilerinin yenilikçiliğine yardımcı olur.
- Enerji üretimi: Entegre Fotovoltaik (BIPV) camın inşa edilmesi, bu arada enerji üretirken yapının dış yapısının bir parçasını oluşturan iki yönlü bir role sahiptir.
- İletişim ve Bilgi-Eğlence: LED'leri farkedilir kablolar olmadan entegre eden lamine cam, dış yapıları renkli sergilere veya hareketli resimlere sahip devasa ekranlara dönüştürür.

2.3.8 Cam tozunun inşaat mühendisliğinde kullanım alanları

Cam tozunun inşaat mühendisliğinde kullanım alanları şunlardır (Abdallah ve Fan, 2014):

- Kaldırım malzemelerindeki cam kırıntıları için kullanımı: Cam kırıntı, asfalt serimi için yol yapım agregası olarak kullanılmıştır.
- Bina yapımında beton için agrega olarak geri dönüştürülmüş cam partikülü (kum) için kullanımı.
- Geri dönüştürülmüş camın puzolanik ikame olarak kullanımı.
- Geri dönüştürülmüş camın renkli cam agrega için kullanımı.
- Camın çimento ile reaksiyonu üzerine kullanımı.

2.3.9 Türkiye’de cam sanayisi

Cam sektörü inşaat, enerji, otomotiv, beyaz eşya, gıda, meşrubat, ilaç, kozmetik, mobilya, turizm, boru, elektrik ve elektronik gibi birçok alanda kullanılmakta olup ülke ekonomileri için önemlidir (Kılıçoğlu, 2013).

Ülkemiz, sektörün kuruluşundan şu ana kadar yapılan çalışmalar ve yatırımlar ile dünya çapında cam üreten ülkeler arasına girmiştir ve her geçen gün rekabet gücünü artırmaktadır (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ve TÜBİTAK-MAM, 2019).

Cam üretiminde kullanılan en önemli malzemeler Türkiye’de bol miktarda bulunduğu için Türk cam sanayisinde %98 oranında yerli hammadde kullanılmaktadır. Ülkemizin cam üretim kapasitesi yaklaşık olarak 3.7 milyon ton/yıl’dır. Yurt içi üretim kapasitesinin %50’si düz cam, %32’si cam ambalaj, %16’sı cam ev eşyası, geri kalan %2’si cam elyaf kapasitesinden oluşmaktadır (Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği, 2012).

2.3.10 Cam tozu ile ilgili yapılan çalışmalar

Uzun ve diğ., (2018) yaptıkları çalışmada bir kontrol numunesi ve %10, %15, %20 oranlarında cam tozunu çimento yerine kullanarak üretilen beton numunelere buhar kürü uygulamışlardır. Elde edilen bu numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarını karşılaştırmışlardır. Çalışmada CEM I 42.5 R çimento ve Sefar Conslumper 5252 HZ hiper akışkanlaştırıcı, kırmataş agrega olarak kullanılmıştır. Deneyde toplamda 4 farklı karışım oranında numuneler üretilmiştir. Numuneler bir gün bekletildikten sonra buhar kürüne tabi tutulmuştur. Buhar kürü sonrasında ise normal küre bırakılmıştır. Toplamda kontrol numuneleri de dahil olmak üzere 24 adet küp numune hazırlanmıştır. Cam tozu katkısından dolayı karışımda oluşabilecek kıvam problemlerini incelemek için her karışımda slump

testleri yapılmıştır. Cam tozunun slump değerlerini azalttığı dolayısıyla kalıba yerleştirmede güçlük yaşandığı görülmüştür. Basınç testlerinde cam tozu kullanılan numuneler kontrol numuneleriyle kıyaslandığında 7 günlük sonuçlarda daha düşük, 28 günlük sonuçlarında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak cam tozu basınç dayanımında ilk kazanımı düşürürken nihai dayanımı artırdığı gözlemlenmiştir. Yapılan çalışma neticesinde cam tozunun beton basınç dayanımını %20 oranında artırdığı gözlenmiştir.

Orhan ve Esen (2017), yaptıkları çalışmada öğütülmüş atık cam tozu katkılı betonun pozolanik aktivitesi, yarmada çekme dayanımı, su emme, porozite, birim hacim ağırlık ve özgül ağırlık değerleri bulunarak atık camların öğütülüp betonda çimento yerine kullanımının pozolanik etkisi, betonun fiziksel özelliklerine etkisi ve betonun yarmada çekme dayanımına katkısının olup olmadığını deneysel olarak araştırmışlardır. Elazığ Çimento Fabrikası'ndan temin edilen CEM I 42.5 R çimento, mineral katkı olarak atık pencere camlarının 50 µm tane büyüklüğüne kadar öğütülmesi sonucu elde edilen cam tozu, kimyasal katkı olarak Sika ViscoCrete Hi-Tech-36 Serisi üçüncü nesil süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan öğütülmüş atık cam tozu betona %0, %5, %10, %15, %20 oranlarında, çimento ile yer değiştirilerek ilave edilerek beş farklı beton serisi hazırlanmıştır. Numuneler 20±2°C'de 7, 28, 90 gün standart su küründe bekletilmiştir. Deney sonuçlarına göre cam tozu kullanımı arttıkça su emme artmış, birim hacim ağırlık ve özgül ağırlık azalmıştır. Beton numunelerine ait yarmada-çekme dayanımı ilk günlerdeki dayanımlarda cam tozu etkisi fazla görülmemiş ve kontrol betonunun dayanımının daha yüksek olduğu görülmüştür. Deneyin uygulandığı 7,28 ve 90 günlük sonuçlarda yarmada çekme dayanımında %10 cam tozu kullanımının optimum değer olduğu sonucuna varılmıştır.

Malik ve diğ., (2013) yaptıkları çalışmada ince agregaların atık cam ile kısmen değiştirilmesini içeren betonu incelemişlerdir. Çalışma boyunca IS 8112 ile sınırlı 43 dereceli Khyber sıradan Portland çimentosu, ince agregalar IS383-1970'e göre 2.6 büyüklüğünde, II. Kullanılan kaba agregalar 20 mm IS elekten geçen ve köşeli 2,7 özgül ağırlığı olan 4,75 mm IS elekten tutulan şekilli açısallı makine kırma taşından, atık cam atık pencere camından (Soda Lime cam) oluşmuştur. Los Angeles aşınma aparatında toz haline getirilmiştir ve daha sonra 1.18 mm IS elekten elenmiştir. Atık camın özgül ağırlığı 2,42 olarak bulunmuştur. 0.45 su/çimento oranı kullanılmıştır. İnce agregaların yerine %10, %20, %30 ve %40 atık cam tozu içeren beton küp numuneler üretilmiştir. Slump testi,

basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyi uygulanmıştır. Dayanım deneyleri için numuneler normal koşullarda sertleştirilip 7 ve 28 günde test edilmiştir. Kalıplardan çıkarıldıktan sonra küp numunelerinin ortalama kuru ağırlığı ölçülmüştür ve kütleme için suya daldırıldıktan sonra küp numunelerinin ortalama ağırlığı 28 günlükken ölçülmüştür. Her bir beton numunesi için su emme yüzdesi ve dayanıklılık ölçümünü vermiştir. Çökme, atık cam içeriğindeki artışla birlikte artmıştır. Atık cam partikülleri kumla karşılaştırıldığında daha az su emer ve böylece beton karışımının işlenebilirliğini artırır. İnce agregaların yerine %40 atık cam içeren beton karışımı için çökme maksimum olmuştur. Basınç dayanımında ince agregaların atık cam ile değiştirilmesinde %30'a kadar bir artış gözlenmiştir. Ölçülen maksimum basınç dayanımı, ince agregaların yerine %20 atık cam içeren beton karışımına karşılık gelen 28 günlük referans karışımından %25 daha fazla olduğu görülmüştür. %40 atık cam içeriğine sahip beton karışımı için basınç dayanımının referans karışımından daha az olduğu bulunmuştur. Cam içeriği arttıkça yarmada çekme dayanımı azalmıştır. Su emme yüzdesi atık cam içeriğindeki artışla azalmıştır. En düşük su emme değeri %40 atık cam içerikli beton karışımı için bulunmuştur. Referans karışımla karşılaştırıldığında her karışımın küp numunelerde atık cam içeriğindeki artışla yoğunluğun azaldığı gözlenmiştir. Sonuçlar, referans karışımla karşılaştırıldığında %40 atık cam içerikli beton karışımı için beton küp numunelerinin kuru ağırlığında %5 azalma olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak 0-1.18 mm partikül büyüklüğü için ağırlıkça %30'a kadar olan ince agregaların kısmen değiştirilmesi olarak atık cam tozunun kullanılması uygun görülmüştür.

Al-Obeidy ve Khalil (2016), yaptıkları çalışmada Yüksek Mukavemetli Çevre Dostu Beton üretmek için geri dönüşümden sonra cam atıklarının betonda kullanımını araştırmışlardır. Çimentoya kısmi ikame olarak %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarda cam atık tozu içeren beton karışımları hazırlanmıştır. Betonun taze yoğunluk, 7, 28, 60 ve 90 günlük yaşlarda basınç dayanımı ve 60 günlük yaşta su emme incelenmiş ve referans beton karışımının sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Cam atıklarını 0.5 mm'lik küçük parçalara kadar öğütme işlemi farklı zaman periyotları (1, 5, 10 ve 15 dakika) boyunca gerçekleştirilmiştir. Cam tozu daha sonra elek No. 200 (75 mikron) üzerinde elenmiştir. Referans beton karışımı, beton karışım tasarımı için İngiliz yöntemine göre, 28 gün hiçbir katkı maddesi olmaksızın minimum 40 MPa basınç dayanımına sahip beton elde etmek üzere tasarlanmıştır. Karışım oranları 500 kg/m^3 çimento içeriği, su/çimento oranı 0.42 ve çökme değeri 100 ± 5 mm olan ağırlıkça 1:1.4:1.8 (çimento:kum:çakıl) olarak alınmıştır.

İşlenebilirlik özelliğine bakıldığında aynı işlenebilirliğe (çökme 100 ± 5 mm) sahip tüm karışımlar için cam tozu içeriğinin artmasıyla su miktarı azalmıştır. Taze yoğunluğa bakıldığında referans karışımla karşılaştırıldığında cam tozu içeriğinin artmasıyla taze yoğunlukta azalma görülmüştür. Fırın kuru yoğunluğa bakıldığında 60 günlük yaştaki test sonuçları %25'e kadar cam tozu içeren örnekler için kuru yoğunlukta hafif bir artış göstermiştir. 60 günlük yaşta çeşitli cam tozu yüzdeleri içeren farklı beton numunelerinin su emme sonuçlarına bakıldığında %15 cam tozu içeren beton numunelerinden en düşük su emme değeri elde edilmiştir. Test sonuçları 7 günlük yaşta farklı cam tozu yüzdeleri içeren betonun basınç dayanımının referans numunelere kıyasla azaldığı, 28 ve 60. günlerde ağırlıkça çimento yerine %10 ve %15 cam tozu içeren örneklerin basınç dayanımının arttığını göstermiştir. Cam tozu içeriği %15'ten fazla arttığında, referans örneğe kıyasla basınç dayanımı azalmıştır. Test sonuçları, çimento yerine %15 cam tozu içeren numunelerin daha yüksek basınç dayanımı verdiğini göstermiştir. Pratik ve ekonomik durumlarda sürdürülebilirliğin sağlanması için %15 cam tozu içeren beton için 60 günlük dayanım uygulama için optimum değer olarak kabul edilmiştir.

Yassen ve diğ., (2018) yaptıkları çalışmada cam tozlarının kısmen çimento yerine kullanımını incelemişlerdir. Beton karışımları sabit su/bağlayıcı oranı 0.32 ve 1:1.5:3 çimento:kum:çakıl olacak şekilde tasarlanmış ve kimyasal katkı olarak yüksek performanslı süperakışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmıştır. Sonuçlara göre %20 cam tozu kullanımında 28 günlük yaşta daha yüksek basınç dayanımı verirken, %15 cam tozu kullanımında daha yüksek basınç dayanımı 56 günlük yaşta vermiştir. Ultrasonik test sonuçları ise tüm GP karışımlarının daha yüksek hız verdiğini özellikle %20 GP 'nin 28 günlük yaşta en iyi sonuçları verdiğini göstermiştir.

Mahmoud ve diğ., (2019) yaptıkları çalışmada cam tozunu %0, %7.5, %10, %12.5 ve %15 oranlarında çimento ile yer değiştirerek basınç yükü altındaki bazı özellikler, basınç dayanımı, gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ve elastisite modülünü incelemişlerdir. Ayrıca sıcaklığın basınç dayanımına etkisini araştırmışlardır. Yüksek sıcaklıkların beton basınç dayanımı üzerindeki etkisini değerlendirmek için 21, 250, 500 ve 750°C sıcaklıklar dikkate alınmıştır. Sıcaklığın basınç dayanımına etkisi incelendiğinde 750°C'ye tabi tutulduktan sonra cam tozu kullanılan tüm numuneler, cam tozu içermeyen referans betondan daha yüksek bir mukavemet göstermiştir. Elastisite modülü %10 ve %15 cam tozu içeren betonlarda en yüksek değere ulaşmıştır. Deneysel çalışmanın sonucuna göre cam tozu betonun basınç dayanımını ve elastisite modülünü geliştirmiş ve artırmıştır. Cam tozu

özellikle %12.5 ve %15 olmak üzere tüm değiştirme yüzdeleri için betonun basınç dayanımını artırmıştır.

Ubeid ve diğ., (2020) yaptıkları çalışmada betonun basınç dayanımı, yarmada ve eğilmede çekme dayanımları, darbe direnci ve bağlanma mukavemeti özelliklerinde, çimentonun kısmi ikamesi olarak cam atığının toz olarak etkisini araştırmışlardır. Cam tozu %0, %10 ve %15 oranında imento ile yer değiştirmiştir. Su/imento oranı 0.29, beton karışım oranları 1:2.13:2.83 (imento:kum:çakıl) ve süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Sonuç olarak cam tozu kullanıldığı takdirde basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı artmıştır.

Vijayakumar ve diğ., (2013) yaptıkları çalışmada %10, %20, %30 ve %40 oranlarında atık cam tozu ile çimentoyu kısmi yer değiştirerek hazırlanan beton ile geleneksel betonu karşılaştırmışlardır. 330 kg/m³ imento içeriği ve 0.53 su/imento oranı kullanılmış ve malzemelerin karışım oranı 1:2.33:3.6 olarak alınmıştır. Hazırlanan numunelerin 28. ve 60. günde basınç, çekme ve eğilme mukavemeti belirlenmiştir. Sonuç olarak cam tozunun artmasıyla basınç dayanımı, çekme dayanımı ve eğilme dayanımı değerlerinin arttığı gözlenmiştir.

Kalakada ve diğ., (2019) yaptıkları çalışmada imento ile yapılan betonların, çeşitli oranlarda kaba cam tozu (<150 µm) ile değiştirilen ve farklı kürleme koşulları kullanılarak taze, mekanik ve dayanıklılık özelliklerini araştırmışlardır. Cam tozunun ikame seviyeleri ağırlıkça %0, %15, %30 ve %50 iken, takip edilen kürleme rejimleri ortam, 40 °C 'lik yüksek sıcaklıkta kürleme (ETC) ve sudur. Çalışmada kullanılan imento CEMIX genel amaçlı imento, kullanılan GP'ler ise biri 75 µm ve diğeri 150 µm olan iki farklı boyutta cam tozudur. Deneysel alışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir: İlk aşama iki farklı büyüklükteki GP'lere sahip beton için aynı karışım tasarımıının kullanılmasından oluşmakta ve ikinci aşama kaba GP ile hazırlanan beton örneklerinin farklı kürleme rejimlerine tabi tutulmasını içermektedir. Sonuç olarak GP oranı arttıkça işlenebilirlik artmış ve maksimum işlenebilirlik %30 cam tozu oranında elde edilmiştir. 40°C'lik yüksek sıcaklıkta kürleme özellikle 7 günlük erken kürlenmede basınç dayanımlarında artışlara neden olmuştur. Bununla birlikte, bu olumlu etki 91 günlük daha uzun kürleme rejimlerinde ve %50 daha yüksek ikame seviyelerinde azalmıştır. %15 ve %30 GP içeren karışımlar, sertleştirme durumuna bakılmaksızın ve tüm sertleştirme yaşları için %75'ten daha yüksek kuvvet aktivite endeks değerleri göstermiştir. Bu da betonda puzolanik bir malzeme olarak GP kullanımının uygun olduğunu göstermiştir. Özellikle %50 GP ile karışımlar, %0 GP ile

kontrol karışımına kıyasla klorür iyonu penetrasyonuna karşı fazla artış göstermiştir. Böylece çelik korozyon olasılığını önemli ölçüde azaltmıştır. Sonuç olarak bu çalışmada %30 cam tozu kullanımı ideal ikame seviyesi olarak kabul edilmiştir.

Sethi ve diğ., (2019) yaptıkları çalışmada %15, %20 ve %25 oranlarında uçucu külün öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBS) ile değiştirilmesi ve %5, %10 ve %15 cam tozunun eklenmesi ile ortam sertleşmesi altında geopolimer betonun özelliklerini incelemişlerdir. Ayrıca bu çalışma farklı molar konsantrasyonun, yani 4 M, 8 M ve 12 M NaOH hazırlanan karışımlar üzerindeki etkisini ölçmeyi ve karışımların hazırlanması için optimum molar konsantrasyonuna karar vermeyi amaçlamıştır. Deneylerde 28. gündeki basınç dayanımı 7. gündeki basınç dayanımından daha fazla olduğu ve mol konsantrasyonu arttıkça mukavemetin azaldığı görülmüştür. 4 M ile %25 GGBS ve %5 GP içeren karışım, ortam sertleşmesinde daha yüksek basınç dayanımı ve eğilme dayanımı sergilemiştir.

2.4 Yüksek Fırın Cürufu

Türkiye demir-çelik sektöründe 2000 ile 2015 yılları arasındaki zaman diliminde kapasite ve üretim artış hızı bakımından önde gelen ülkelerden biri olmuştur. 2000 yılında ham çelik üretme kapasitesi 20 milyon ton civarındayken, 2013 yılının sonunda bu rakam 50 milyon tona çıkmış ve Türkiye dünyada ham çelik üretiminde 8. sıraya yükselmiştir (Kürklü, 2016). Demir-çelik fabrikalarında endüstriyel atık malzeme olarak oluşan ve yüksek sıcaklıkta olan YFC, çok hızlı soğutulduğunda granüle yapıya gelir ve betonda kum olarak kullanılabilir. Öğütüldüğünde ise yüksek oranlarda SiO_2 ve Al_2O_3 içerdiğinden dolayı bağlayıcı özelliğe sahip olur. Bu özellik çimento üretiminde ve betonda katkı maddesi olarak kullanılabilmesini sağlar. YFC'nin betonda kullanımı dayanımını iyi yönde etkilemektedir (Canbaz ve Topçu, 2008). %28-38 SiO_2 , %8-24 Al_2O_3 , %30-50 CaO ve %1-18 MgO bileşiminden oluşan YFC'de CaO miktarının yüksek olması genellikle betonun basınç dayanımını iyileştirir. YFC'nin çimento yerine kullanılması ile üretilen betonda geleneksel betona göre dayanım artışı düşüktür. Basınç dayanımında gerçekleşen azalma miktarı cürufun aktivitesine bağlıdır. Portland çimentosu ile suyun karışımıyla hidrasyon reaksiyonu gerçekleşir. Bu reaksiyonla kalsiyum hidroksit (CH) ve kalsiyum-silikat-hidrat (CSH) oluşur. CSH çimentonun dayanımını artırırken, CH dayanıma fazla etki etmez. Cürufta silikatlar CH ile birleşerek ilave C-S-H oluşturur. Bu Portland çimentolu betonla kıyaslandığında nihai dayanımı artırabilecek daha sert ve yoğun yapıya yol açabilir (Bilenler Altundal, 2019).

Betonda kullanılan YFC'nin fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı erken yaş dayanımlarının düşük (7 ile 28 gün arası), ileri yaş dayanımlarının yüksek olduğu (28 günden sonra), priz süresini uzattığı, işlenebilmeyi arttırdığı, terlemeyi, hidrasyon ısını ve su geçirimsizliğini azalttığı, klor geçirimsizliğini azalttığı, donatı korozyonuna karşı direnç sağladığı bilinmektedir (Emiroğlu ve diğ., 2011).

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun bağlayıcı özelliklerini etkileyen faktörler (Bilim, 2006);

1. Cürufun kimyasal kompozisyonu
2. Ortamın sıcaklığı
3. Cüruf içerisindeki camsı yapının miktarı
4. Cüruf ile kullanılan Portland çimentosunun inceliği
5. Reaksiyonda kullanılan alkali konsantrasyonu

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun beton özelliklerine etkileri (Bilim, 2006);

1. Portland çimentolu betona göre ilk gün dayanımları daha düşük, nihai dayanımları daha yüksektir.
2. Sülfatlı ortama ve deniz suyuna daha dayanıklıdır.
3. Cüruf miktarı yüksek olduğunda alkali-silika reaksiyonunun sebep olduğu genleşmeler daha azdır.
4. Klor iyonunun sızması azdır ve daha az geçirimlidir.
5. Yüksek sıcaklıklara daha dayanıklıdır.

Binici ve diğ., (2012) yaptıkları çalışmada YFC, silis kumu ve pomzayı NaOH ile aktive ederek geopolimer beton üretmişlerdir. 4x4x16 cm ve 10x10x10 cm boyutlarında numuneler üreterek 20 saat 100°C ve 150°C'de etüv uygulamışlar ve bu numunelere su emme, birim hacim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrasonik ses geçirgenlik ve lineer soğurma katsayısı deneylerini yapmışlardır. Su emme ve birim hacim ağırlık sonuçları incelendiğinde 150°C'deki numunelerin su emme oranlarının düşük, birim hacim ağırlıklarının yüksek olduğu görülmüştür. 100°C ve 150°C'de NaOH ile aktive edilen UK ve pomza katkılı geopolimer betonlarda katkı oranının artmasıyla su emmenin arttığı, YFC ile silika kumu katkılı betonlarda ise su emmenin azaldığı görülmüştür. Eğilme ve basınç dayanım sonuçları incelendiğinde silis kumu katkılı geopolimer betonların dayanımları yüksek, UK katkılı geopolimer betonların dayanımının ise daha düşük olduğu görülmüştür. Pomza katkılı geopolimer betonların katkı oranı arttıkça dayanımlarının düşük çıktığı

görülürken, en yüksek dayanım değerleri YFC katkılı geopolimer betonlarda görülmüştür. Ultrasonik ses geçiş hızı deneyi sonuçları incelendiğinde yüksek sıcaklıkta aktive edilen ve dayanımı yüksek olan numunelerde bu değerin daha fazla çıktığı görülmüştür.

Bilim ve Atış (2011), yaptıkları çalışmada su/bağlayıcı oranını 0.30, 0.40, 0.50 ve YFC oranını her bir su/bağlayıcı için %0, 20, 40, 60, 80 seçerek 7, 28, 90 ve 180 günde kür edilen numunelerin aşınma, eğilme ve basınç dayanımlarını incelemişlerdir. Ayrıca düşük su/bağlayıcı oranına sahip numunelerde işlenebilirliği kolaylaştırmak için yapılan yayılma tablası deneyindeki yayılmanın 20 ± 1 cm olması için değişik dozajlarda hiperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Numunelerin bir kısmı 65 ± 5 bağıl neme sahip ve $22 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki kür odasında, diğer kısmı aynı sıcaklıktaki su içerisinde deney gününe kadar bekletilmiştir. Basınç dayanımı deneyinin sonuçları incelendiğinde her iki kür durumu için su/bağlayıcı oranı 0.30, cüruf katkısı %20 ve %40 olan numunelerin 7. günde daha yüksek dayanıma, 28 gün ve daha sonraki günler için ise cüruf katkı miktarı %60 olan numunelerin daha yüksek dayanıma ulaştığı görülmüştür. Eğilme dayanımı deneyi sonuçları incelendiğinde her iki kür durumu için su/bağlayıcı oranı 0.30, cüruf katkısı %20 ve %40 olan numunelerin dayanımlarının daha yüksek, su/bağlayıcı oranı 0.40 ve 0.50 olup kuru kür edilmiş numunelerin dayanımları daha düşük çıkmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0.40 ve 0.50, cüruf katkısı %20 ve %40 olup ıslak kür edilen numuneler ise yüksek su/bağlayıcı oranlarından dolayı 180. gün sonunda yüksek dayanım geliştirmişlerdir. Aşınma deneyi sonuçları incelendiğinde ıslak kür edilen su/bağlayıcı oranı 0.30, cüruf katkısı %20 ve %40 olan numunelerin daha yüksek aşınma direnci, su/bağlayıcı 0.50 olan numunelerin ise tüm zamanlarda daha yüksek aşınma miktarı gösterdiği görülmüştür. Kuru kür uygulanan numunelerin sonuçları incelendiğinde su/bağlayıcı oranı 0.30 cüruf katkısı %20, %40 ve %60 olan numunelerin 28. günden sonra aşınma oranlarının düşük, su/bağlayıcı oranı 0.40 ve 0.50 olanların ise daha büyük aşınma miktarına sahip olduğu görülmüştür.

Balçıkınlı ve diğ., (2015) yaptıkları çalışmada %0, %50, %100 oranlarında YFC alkalilerle aktive edilerek oluşturulan numunelerin basınç, eğilme, aşınma ve çekip çıkarma dayanımlarını incelemişlerdir. Karışıma cüruf aktivasyonu için sodyum konsantrasyonu %5 olacak şekilde NaOH ve silis modülü 3 olan sodyum silikat çözeltisi ilave edilmiştir. Numuneler 40, 60 ve 80°C kür sıcaklığında, etüvde 6,12 ve 24 saat bekletilmiştir. Sıcaklık küründen sonra suda bekletilerek 28. gün basınç ve eğilme deneyleri uygulanmıştır. Alkali aktive edilmiş %100 oranında YFC içeren numunelerin basınç dayanımları sıcaklıkta kür

edildiğinde %0 içeren numunelerden daha yüksek olduğu, %50 oranında YFC kullanımının ise düşük performansa sahip olduğu görülmüştür. Fakat YFC katkılı çimento harçları suda kür edilince geleneksel çimento harcı kadar iyi dayanım kazanamadığı gözlemlenmiştir. Basınç deneyi sonuçları incelendiğinde %100 YFC kullanılan numunelerin suda kür edildiğinde dayanımları %0 YFC içeren numunelerden daha düşük, ısı kürü uygulandığında ise 40 ve 60°C’de daha yüksek dayanım elde edilmiştir. Portland çimentosuyla karıştırılarak aktive edilen cürufllu numunelerin %100 YFC ile aktive edilen numunelerden daha düşük dayanıma sahip olduğu gözlemlenmiştir. %50 YFC’li numunelerin dayanımı sadece çimento kullanılan numunelere göre sıcaklık kürü ile azalmıştır. Eğilme deneyi sonuçları incelendiğinde alkali ile aktive edilen %100 YFC’li numunelerin eğilme dayanımları %0 YFC’li numunelere göre yaklaşık %50 azaldığı, %50 YFC’li numunelerin ise yaklaşık %70 daha az dayanım gösterdiği görülmüştür. Aşınma deneyi sonuçları incelendiğinde YFC’nin aşınmaya karşı çimento kadar iyi performans göstermediği sonucuna varılmıştır. YFC içeren numuneler en az aşınma direncini suda kür edildiğinde göstermiş olup alkali aktive edilmiş %100 YFC içeren numuneler ise 80°C-24 saatte en yüksek aşınma direnci göstermiştir.

Gök ve Kılınç (2017), yaptıkları çalışmada geleneksel beton üretimine alternatif olarak uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanarak geopolimer beton üreterek mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Elde edilen numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları ve ortam koşullarının etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada uçucu kül, yüksek fırın cürufu, ince agrega (kum), maksimum 20 mm agrega boyutuna sahip iri agrega (kırmı taş II), maksimum 12 mm agrega boyutuna sahip iri agrega (kırmı taş I) ve alkali aktivatörler kullanılmıştır. 12 Molar potasyum hidroksit solüsyonu hazırlanmış ve bu solüsyon 24 saat sonra kullanılmıştır. Daha sonra potasyum hidroksit çözeltisi ve sıvı sodyum silikat karıştırılmıştır ve bu yeni çözelti alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufu toplam bağlayıcının %4, %10 ve %20’si olarak kullanılmıştır. Beton numuneler, basınç dayanımı testi uygulanmadan önce, herhangi bir kürlenme yapmadan laboratuvar şartlarında ve dış ortamda bırakılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde dış ortam koşulları, alkali aktif betonun erken yaşta basınç dayanımında artış sağlarken, laboratuvar koşullarında 28. günde daha yüksek basınç dayanımı sağlamıştır. Yüksek fırın cürufunun alkali aktif betona göre daha yüksek basınç dayanımı değerleri sağladığı bulunmuştur.

Saha ve Rajasekaran (2017), yaptıkları çalışmada toplam bağlayıcılara %10, %20, %30, %40 ve %50 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBFS) katarak uçucu kül esaslı

geopolimer hamurun özelliklerini geliştirmek için araştırma yapmışlardır. Araştırmada uçucu kül, GGBFS, alkali çözeltiler (sodyum hidroksit çözeltisi ve sodyum silikat çözeltisi kombinasyonu) ve damıtılmış su malzeme olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada, sodyum silikat çözeltisinin sodyum hidroksit çözeltisine oranı ve alkali çözeltinin bağlayıcıya oranı sırasıyla 1.0 ve 0.4 olarak sabit tutulmuştur ve numuneler 7, 28 ve 56 günlük kürlemeden sonra test edilmiştir. Sonuç olarak geopolimer macunun priz başlangıç ve bitiş sürelerinin karışımlardaki GGBS artışıyla önemli ölçüde azaldığı ve GGBS içeriği daha yüksek olduğunda basınç dayanımındaki artışın daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Deb ve diğ., (2014) yaptıkları çalışmada farklı oranlarda GGBFS ve aktivatör içeriğinin uçucu kül bazlı geopolimer betonun işlenebilirlik ve mukavemet özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada GGBFS, değişken aktivatör içeriği (%40 ve %35) ve sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı (1.5 ila 2.5) ile toplam bağlayıcının %0, %10 ve %20'si olarak eklenmiştir. Geopolimer beton numuneleri ortam koşullarında $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ve 70 ± 10 bağıl nemde kürlenmiş ve OPC beton numuneleri aynı sıcaklıkta suda kürlenmiştir. Karışımlarda daha yüksek GGBFS ve daha düşük sodyum silikat/sodyum hidroksit oranına sahip geopolimer betonlarda mukavemette önemli artış ve işlenebilirlikte bir miktar azalma gözlenmiştir. Geopolimer betonun işlenebilirliği, diğer karışım değişkenleri aynı kaldığında bağlayıcıdaki uçucu kül ile birlikte GGBFS içeriğinin artmasıyla azalmıştır. İşlenebilirlik ayrıca aktivatör-bağlayıcı oranının 0,4'ten 0,35'e düşürülmesi ile azalmıştır. 180 güne kadar her yaşta basınç dayanımı cüruf içeriğinin artmasıyla artmıştır. Basınç dayanımı artışı 28 günlük yaştan sonra yavaşlamış ve 180 güne kadar daha yavaş bir hızda artmaya devam etmiştir.

Mehta ve Siddique (2018), yaptıkları çalışmada GGBFS kısmen pirinç kabuğu külü (RHA) ile değiştirildiği harmanlanmış RHA ve GGBFS bazlı geopolimer betonun 3, 7, 28 ve 90 günlük mukavemetini, klor geçirgenliğini, emiciliğini ve mikroyapısal özelliklerini araştırmışlardır. GGBFS %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranında RHA ile yer değiştirilmiş, alkali aktive edici çözelti için sodyum silikat ve 10 M sodyum hidroksit karıştırılmıştır ve numuneler 80°C 'de kürlenmiştir. Basınç ve yarma çekme dayanımı sonuçlarında %5, %10, %15 yer değiştirmede artış gözlenirken %20, %25, %30 yer değiştirmede azalma gözlenmiştir. %15 RHA içeren GPC karışımı, 90 günde maksimum basınç ve yarma çekme dayanımına ulaşmıştır. Geçirgenlik özellikleri sonucunda ise %5, %10, %15 yer değiştirmede azalış, %20, %25, %30 yer değiştirmede ise artış gözlenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, GGBFS'nin kısmi ikamesi olarak optimum RHA içeriği %15 olarak belirlenmiştir.

Al Safi (2019), yaptığı çalışmada çimentonun kısmi ikamesi olarak granüle yüksek fırın cürufu harçları farklı koşullarda kürleyerek 7 günlük basınç dayanımlarını incelemiştir. Geopolimer harçlara; ortam sıcaklığında, 6 gün süreyle su ile kürleme, ardından 80°C'de 1 gün ısıyla kürleme ve ortam sıcaklığında 6 gün hava ile kürleştikten sonra 80°C'de 1 gün boyunca ısıyla kürleme uygulanmıştır. Her deney için, bir set geopolimer harç numunesi kalıptan çıkarılıp 7 gün boyunca ortam koşullarında açık havada bırakılarak bozulmadan sertleştirilmiştir. İkinci bir geopolimer harç numunesi seti, 6 gün boyunca suda sertleştirilip ardından 80°C'de 24 saat süreyle bir elektrikli fırına alınmıştır. Üçüncü bir geopolimer harç örneği seti, 6 gün ortam sıcaklığında kürleştikten sonra 80°C'de 1 gün boyunca elektrikli fırında kürlenmiştir. Portland çimento harçları, karşılaştırma amacıyla benzer şekilde dökülmüş ve kürlenmiştir. Fırın ısıtma kürleme, geopolimer harçlar için optimum basınç dayanımı ve yoğunluğu için su kürleme ve ardından fırın ısıtma ve ortam sıcaklığında kürleme ile karşılaştırıldığında potansiyel bir kürleme yöntemi olarak görülmüştür. Fırında ısıtma ile kürlenen yeni geopolimer harçlar geleneksel Portland çimento harcı ile karşılaştırıldığında basınç dayanımında artış sağlamıştır.

Kürklü (2016), yaptığı çalışmada oda sıcaklığında kürlenen geopolimer harcın üretiminde kullanılan granüle yüksek fırın cürufunun bağlayıcı ve agrega olarak kullanımını araştırmıştır. Likit/bağlayıcı oranı (l/b) 1 ve 0.7, alkali aktivatör olarak NaOH ve Na₂SiO₃ 2:1, 1:2, 3:0 ve 0:3 oranlarında kullanılarak 28 günden sonra deneyler uygulanmıştır. Mekanik özellikler için yapılan deneylerin sonuçlarında l/b oranı 0.7 olan numunelerin basınç ve eğilme dayanımı l/b oranı 1 olan numunelerden fazla çıkmıştır. Fiziksel özellikler için yapılan deney sonuçlarında l/b oranı 1 olan numunelerin görünür porozite ve su emme değerleri l/b oranı 0.7 olanlardan yüksek çıkmıştır. SEM analizinde l/b oranı 1 olan numunelerde tabaklanma görülürken l/b oranı 0.7 olan numunelerde tabaklanma gözlenmemiştir. Deney sonucunda NaOH olmadan Na₂SiO₃ kullanımında işlenebilirliğin azaldığı ve priz süresinin uzadığı görülmüştür ve ideal l/b oranı 0.7 olarak belirlenmiştir.

2.5 Yüksek Sıcaklık Etkisi

Diğer yapı malzemeleri ile kıyaslandığında betonun dayanımının yüksek olmasının, istenilen boyutlarda ve şekillerde üretilebilmesinin yanı sıra, yüksek sıcaklık ve yangına dayanıklı olma özelliği vardır. Beton yandığında belli bir süre zarar görmez ve zehirli

duman çıkarmaz. Fakat bu durum belli bir sıcaklığa kadar ve sınırlı süre için geçerlidir (Ay, 2010). Sertleşmiş çimento hamuru ve agreganın birleşmesiyle oluşan betonda, sertleşmiş çimento hamuru 150°C'ye kadar ısıtıldığında %0.2 oranında genleşme gösterir. Sıcaklık 150°C'den 300°C'ye çıkarıldığı zaman çimento hamurunda büzülme gerçekleşip, 800°C'ye artırıldığında bu büzülme oranı %2.2'ye kadar çıkabilir. Genel olarak sıcaklığın 150°C'yi aşması durumunda betondaki agregalar genişir ve dağılır, hidrasyon ürünlerinin dehidrasyonu sonucunda çimento pastası büzülür. Bu sebepten dolayı yüksek sıcaklıkta termal genleşmeler ve çatlamlar gerçekleşir (Kurt, 2012). Çoğu araştırmacı 200°C'de beton basınç dayanımının arttığına inanmaktadır. Beton yaklaşık 400°C'de bozulmaya başlar ve 400°C-800°C aralığında en büyük dayanım kaybı gerçekleşir (Güçlüer, 2019).

Yüksek sıcaklık etkisinde olan betonun sıcaklığını düşürmek için su kullanılmasıyla beton zarar görür. Çünkü CaO su ile reaksiyona girerek Ca(OH)_2 oluşturur ve hacim genleşmesi meydana getirir. Betonun kısa bir sürede büzülüp genleşmesi nedeniyle iç gerilmelerden dolayı deformasyon artar (Dakman, 2017).

Zhang ve diğ., (2020) yaptıkları çalışmada yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra ortam sıcaklığında ve ısıyla kürlenmiş düşük kalsiyumlu uçucu küllü geopolimer betonun performansını incelemişlerdir. Alkali aktivatör olarak 8 M ve 12 M Na_2SiO_3 ve NaOH kullanılmıştır. Numuneler 5°C/dk ısıtma hızında 100, 200, 400, 600, 800 ve 1000°C'ye ısıtılmıştır. Fırın kürü 80°C'de 24 saat, ortam kürü ise 72 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde beton numuneler en yüksek basınç dayanımını 200°C'de göstermişlerdir. Sıcaklık arttıkça ağırlık kaybı artmıştır. Aynı karışım için ortam sıcaklığında kürlenmiş numuneler ısı ile kürlenmiş numunelerden daha fazla ağırlık kaybı göstermiştir. Genel olarak ortam sıcaklığında kürlenmiş numuneler ısıyla kür edilen numunelerden daha yüksek dayanım artışı yaşamıştır.

Tuyan ve diğ., (2017) yaptıkları çalışmada F ve C tipi uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer beton numunelerin mekanik özelliklerini ve sıcaklık dirençlerini incelemişlerdir. Üretilen numuneler 105°C'de 24 saat etüvde kurutulmuştur. Daha sonra 5°C/dk hızla ısıtılarak 150, 300, 600 ve 900°C'ye 3 saat maruz bırakılmıştır. Alkali aktivatör olarak Na_2SiO_3 ve NaOH kullanılmıştır. Üretilen numunelerin hepsi incelendiğinde F tipi uçucu kül ile üretilen ve 900°C sıcaklığa maruz kalan numunenin en yüksek sıcaklık direncine sahip olduğu görülürken %50 C tipi uçucu kül+%50 F tipi uçucu kül ile üretilen ve ortamda kür edilen numunenin ise en düşük sıcaklık direncine sahip

olduğu görülmüştür. Normal çimento ile üretilmiş, benzer dayanıma sahip geleneksel beton ile kıyaslandığında F tipi uçucu kül kullanılarak üretilen betonun mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık direnci daha yüksek, C tipi kullanılarak üretilen betonun daha düşük çıkmıştır. Ayrıca ortamda kürlen C tipi uçucu külle üretilen numuneler ile benzer dayanıma sahip geleneksel betonun mekanik özellikleri birbirine yakındır. Bu deneyde %50 F tipi uçucu kül+%50 C tipi uçucu kül kullanılarak elde edilen geopolimer beton numunesi ile geleneksel beton da kıyaslanmıştır. Bu geopolimer beton numunesi ortamda kürlendiğinde mekanik özelliklerinin ve sıcaklık direncinin geleneksel betondan daha düşük çıktığı görülmüştür.

Abdulkareem ve diğ., (2013) yaptıkları çalışmada uçucu kül ve hafif agrega kullanılarak üretilen geopolimer betonun 100 ile 800°C arasında değişen sıcaklıklara maruz kalmadan önceki ve maruz kaldıktan sonraki mekanik ve mikro yapısal özelliklerini incelemişlerdir. Deney öncesinde hafif agregaların nemini uzaklaştırmak için bu agregalar 105°C'de 24 saat kurutulmuştur. Daha sonra hazırlanan numuneler 70°C'de 24 saat kür edilmiştir. 27 gün sonra numunelere 100°C'lik artışla 100 ile 800°C arasında değişen sıcaklıklar uygulanmıştır. Numuneler her sıcaklıkta 1 saat bekletilmiştir. Sıcaklığa maruz kalmayan numunelerde iyi bir dayanım/ağırlık oranı elde edilmiştir. Sıcaklık etkisi incelendiğinde 100, 200 ve 300°C'ye maruz bırakılan numunelerde basınç dayanımının arttığı, 400°C'den 800°C'ye kadar maruziyette bozulmaların başladığı ve dayanımın azaldığı görülmüştür.

Kurt (2012), yaptığı çalışmada çimentoya %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında barit tozu, diatomit, silis dumanı, uçucu kül gibi mineral katkıları ikame ederek 300 ve 400 dozajlı beton numuneler üretmiştir. Üretilen bu numuneler 200, 400, 600 ve 800°C sıcaklığa maruz bırakılarak betonda özelliklerin değişimini incelemişlerdir. 400°C'de 400 dozajlı beton en yüksek dayanımına ulaşmışken 300 dozajlı betonda fazla bir değişim görülmemiştir. 400°C'den sonra hem 300 dozajlı hem 400 dozajlı numunelerin dayanımlarında düşüş görülmüştür. Ayrıca bütün üretilen numunelerde 400 dozajlı betonların dayanımı 300 dozajlı betonlardan yüksek çıkmıştır.

Kaya ve diğ., (2014) yaptıkları çalışmada mineral katkılı kendinden yerleşen beton numuneler üretmiştir. Elde edilen bu numuneler 400°C ve 800°C'ye maruz bırakılarak fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Deneyde mermer tozu ve YFC %10, %20 ve %30 oranlarında ince agregayla ikame edilerek kendiliğinden yerleşen beton üretilmiştir. Numuneler 24 saat kalıpta bekledikten sonra 22±1°C'de kirece doymun suda kür edilmiştir. 28 günlük kürden sonra 365 gün laboratuvarında bekletilmiştir. Sonuçlar

incelendiğinde sıcaklık arttıkça tüm beton numunelerinin basınç dayanımları azalmıştır. 20°C’de yani oda koşullarındaki numunelerin en yüksek basınç dayanımı %30 YFC ve %30 mermer tozu kullanımında bulunmuştur. Sıcaklığa maruz kalan numunelerde basınç dayanım kaybı sonuçlarına bakıldığında en yüksek dayanım kaybı 400°C’de %30 mermer tozu kullanımında, 800°C’de %30 YFC kullanımında elde edilmiştir.

Yazıcıoğlu ve diğ., (2019) yaptıkları çalışmada bazaltik agregası, dere agregası, kireçtaşı ve hafif agregası olarak pomza kullanılarak üretilen betonda yüksek sıcaklık etkisini incelemiştir. Bu 4 farklı agregası türü ile 100x100x100 mm ve 150x150x150 mm boyutlarında hazırlanan beton numuneler kür tankında 23±2°C’de 28 gün kürlenmiştir. Kür süresi dolduktan sonra 300, 600 ve 900°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Basınç dayanımı sonuçlarına göre hafif agregası ile üretilen betonun diğer üç agregası ile üretilen betondan daha düşük basınç dayanımına sahip olduğu ve yüksek sıcaklıktan daha çok etkilendiği, bazaltik agregası ile üretilen betonun ise yüksek sıcaklıktan daha az etkilendiği ve basınç dayanımının en yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Beton numunelerinin boyut farkının yüksek sıcaklık etkisi altında basınç dayanımını etkilediği görülmüştür. 15 cm³ boyutundaki tüm numunelerin merkezine yüksek sıcaklığın etkisi geciktirildiğinden artan boyut ile birlikte yüksek sıcaklığın etkisi azalmış ve 10 cm³ boyutundaki numunelere göre daha yüksek basınç dayanım sonuçları vermiştir.

Dakman (2017), yaptığı çalışmada %0, %20, %40 ve %60 oranlarında köpük solüsyonu çimento harcına katarak beton numuneler üretmiştir. Ürettiği numuneleri 28 gün kür havuzunda kürlendikten sonra 15x15x15 cm ve 5x5x5 cm boyutlarında hazırlamıştır. Daha sonra hazırlanan bu numuneler 20,100, 400 ve 700°C sıcaklığa 3 saat maruz bırakılarak bazı özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre kontrol betonun 20°C-400°C arasındaki basınç dayanımı artmış, 400°C-700°C arasında azalmıştır. %20, %40 ve %60 köpük solüsyonu katkılı betonda sıcaklık arttıkça basınç dayanımında azalma görülmüştür. Birim ağırlık değerleri ise tüm numunelerde sıcaklık artışı ile düşüş göstermiştir. Yüksek sıcaklığın ultrases geçiş hızına etkisi incelendiğinde tüm numuneler 400°C’ye kadar azalış gösterirken; sıcaklık değeri 400°C-700°C arasında köpük solüsyonu kullanılmayan numunelerde ultrases geçiş hızı azalış, köpük solüsyonlu numunelerde ise artış göstermiştir.

Kantarıcı (2013), yaptığı çalışmada Elazığ ferrokrom cürufu kullanarak geopolimer beton numunesi üretmiştir. Bu çalışmada agregası olarak dere agregası ve kırma kum agregası, aktivatör olarak Na₂SiO₃ ve NaOH kullanılmıştır. Numunelere 72 saat boyunca %60 nem

ortamında ve 75°C buhar ortamında kür uygulanmıştır. Üretilen numuneler 28 gün bekletildikten sonra 100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700°C’de 1 saat süreyle fırına yerleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre kontrol numunelerine kıyasla tüm numunelerde 100°C ve 300°C’de basınç dayanımı artmıştır. 700°C sıcaklıkta ise tüm numunelerde minimum basınç dayanımı elde edilmiştir. Ayrıca geopolimer beton numunelerin yangın dayanımının normal betonlarınkinden daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Bilim (2016), yaptığı çalışmada alkali ile aktifleştirilmiş cüruf harçları yüksek sıcaklığa maruz bırakarak mekanik özellikleri üzerinde aktivatör parametrelerinin etkilerini incelemiş ve Portland çimentolu kontrol harçları ile kıyaslamıştır. Alkali aktivatör olarak 2.0 modül sıvı Na_2SiO_3 kullanılmıştır. Cüruf aktivasyonunda cüruf miktarına göre ağırlıkça %4, %6 ve %8 Na ve 0.75, 1.0, 1.25 ve 1.5 silis modülleri kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0.5, kum/bağlayıcı oranı 3 olacak şekilde numuneler hazırlanmış ve çimento yerine ağırlıkça %100 YFC kullanılmıştır. Numuneler $21\pm1^\circ\text{C}$ sıcaklıkta 27 gün suda kür edilmiştir. Kürlenmiş numuneler 1 saat boyunca 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Fırından çıkarılan numunelere suda ve havada olmak üzere iki farklı soğutma uygulanmıştır. Sonuç olarak, alkali aktivatörün Na dozajı ve silis modülü arttıkça basınç dayanımının arttığı gözlenmiştir. Havada soğuyan numunelerin basınç dayanımı suda soğuyan numunelerin basınç dayanımından daha yüksek çıkmıştır. Alkali ile aktifleştirilmiş cüruf harçların yangına karşı dayanımı Portland çimentolu harçlara göre daha iyi çıkmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Materyal

3.1.1 Yüksek fırın cürufu

Geopolimer beton üretiminde kullanılan YFC Karabük ilindeki Karçimsa firmasından temin edilmiştir ve yeterli incelikte olup öğütülmesine gerek kalmamıştır. Temin edilen yüksek fırın cürufunun özgül yüzeyi 3996 cm²/g ve özgül ağırlığı 2.86 g/cm³'tür. YFC'nin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi.

Bileşim (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
YFC	32.47	9.94	1.25	32.45	9.31	0.82
Bileşim (%)	S ⁻²	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	Cl ⁻
YFC	0.33	0.31	0.85	1.16	3.51	0.015



Şekil 3.1 : Yüksek fırın cürufu.

3.1.2 Cam tozu

Çalışmada kullanılan cam tozu AKÇİHAN Geri Dönüşüm fabrikasından temin edilmiştir. Cam tozunun özgül ağırlığı 2.58 g/cm^3 'tür. Cam tozunun kimyasal bileşimi Çizelge 3.2'de ve kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Cam tozunun kimyasal bileşimi.

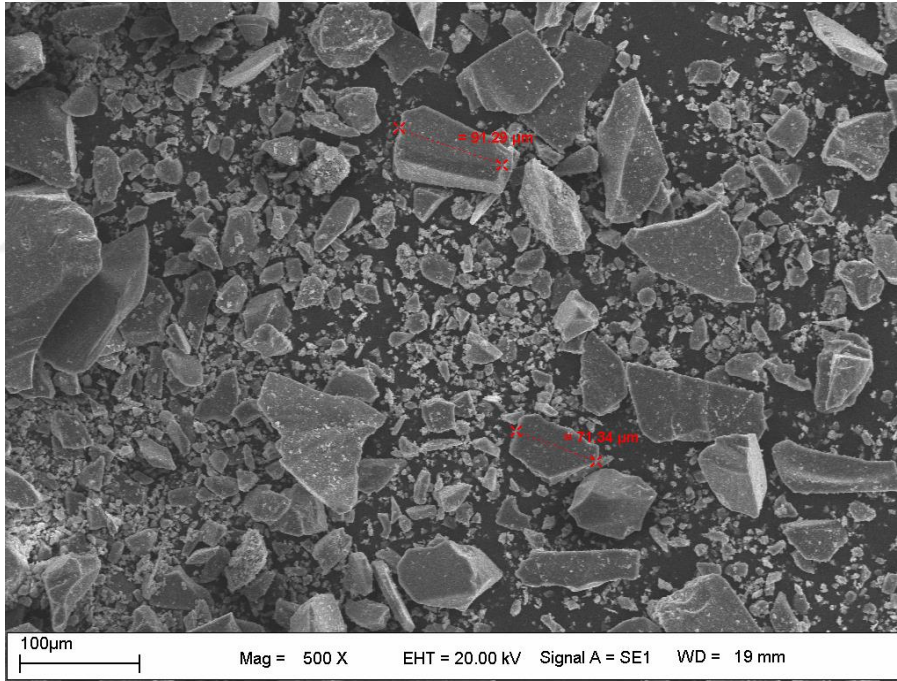
Bileşim (%)	SiO ₂	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO
Cam Tozu	69.42	12.31	0.48	8.27
Bileşim (%)	Al ₂ O ₃	MgO	LOI	
Cam Tozu	1.09	4.25	16.18	

Çizelge 3.3 : Cam tozunun kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Parametre	Değer
Görünüm	Toz
Koku	Kokusuz
Erime Noktası / Donma Noktası Aralığı (°C)	720
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	2.58
Yığın Yoğunluk (g/cm^3)	1.56
Tane Boyutu	<0.125 (120 mesh altı)
Alevlenirlik Özelliği	Ürün kendiliğinden alevlenmez.
Patlayıcılık Özellikler	Patlayıcı özellik göstermez.
Oksitleyici Özellikler	Oksitleyici özellik göstermez.
Su Absorbsiyonu	0.02



Şekil 3.2 : Cam tozu.



Şekil 3.3 : Cam tozunun SEM görüntüsü.

3.1.3 Agregası

Üretilen numunelerde en büyük agrega tane çapı 8 mm olarak seçilmiştir. Geopolimer beton üretiminde ince agrega olarak 0-4 mm tane çapında dere kumu, iri agrega olarak 4-8 mm tane çapında dere agregası kullanılmıştır. Beton üretiminde ince agrega hacimce %65, iri agrega hacimce %35 olarak TS 802 (2016)'da yer alan optimum bölgeye uygun olacak şekilde belirlenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan agregalardan alınan örnekler üzerinde yapılan deneyler ve bu deneylerden elde edilen sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.



Şekil 3.4 : İnce ve iri agrega.

3.1.4 Aktivatör

Bu tez çalışmasında geopolimer betonları aktive etmek için sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi kullanılmıştır. Seçilen konsantrasyonda 12 mol NaOH çözeltisi elde edilebilmek için musluk suyu kullanılmıştır. Deneyde kullanılan NaOH kimyasal özellikleri Çizelge 3.4’te verilmiştir.

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/cm ³)	2.13

3.1.5 Aletler

3.1.5.1 Elekler

Geopolimer beton üretiminde kullanılacak agreganın TS 706 EN 12620+A1 (2009)’a uygun olması için 4 mm ve 8 mm göz açıklıklı eleklerden elenerek kullanılmıştır.

3.1.5.2 Çelik kalıplar

Hazırlanan geopolimer beton numuneler Şekil 3.5'te görülen 50x50x50 mm boyutuna sahip çelik kalıplara yerleştirilmiştir.



Şekil 3.5 : Çelik kalıplar.

3.1.5.3 Beton karışım mikseri

Geopolimer beton üretiminde kullanılacak malzemeleri karıştırmak için UTEST markalı beton karışım mikseri kullanılmıştır.

3.1.5.4 Hassas terazi

Çalışma aşamalarında ağırlık ölçümleri için Şekil 3.6'da görülen 0.01 g hassasiyetli terazi kullanılmıştır.



Şekil 3.6 : Hassas terazi.

3.1.5.5 Etüv

Geopolimer beton üretiminde kullanılacak olan agregaların özgül ağırlık ve su emme oranı tayini için Şekil 3.7'de görülen Mikrotest marka etüv kullanılmıştır.



Şekil 3.7 : Etüv.

3.1.5.6 Basınç dayanım cihazı

Üretilen geopolimer numunelerin basınç dayanımlarını belirlemek için Şekil 3.8’de görülen ELE marka 3000 kN yükleme kapasitesine sahip tek eksenli basınç dayanım test cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.8 : Basınç dayanımı cihazı.

3.1.5.7 Yüksek sıcaklık fırını

Üretilen geopolimer beton numunelerin yangın dayanımı deneyleri Şekil 3.9’da gösterilen yüksek sıcaklık fırını kullanılmıştır.



Şekil 3.9 : Yüksek sıcaklık fırını.

3.1.5.8 SEM-EDX cihazı

Elde edilen geopolimer beton numunelerinin içyapı analizi için LEO EVO 40 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM cihazı) kullanılmıştır.

3.2 Yöntem

Bu bölümde üretimde kullanılan agregalara uygulanan deneyler, üretilen geopolimer betonların karışım oranlarının belirlenmesi, bu belirlenen oranlara göre betonun hazırlanması, kalıplara yerleştirilmesi, kür edilmesi ve daha sonra sertleşen geopolimer betonlara uygulanan deneyler ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

3.2.1 Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler

Geopolimer beton karışımında maksimum tane çapı 8 mm olan dere agregası ve maksimum tane çapı 4 mm olan dere kumu kullanılmıştır. Numune alımında TS EN 932-2 (1999)’da belirtilen çeyreklemeye metodu kullanılmıştır.

Kullanılan agregaların geopolimer beton üretiminde hacimce yüzdeleri %65 ince agrega, %35 iri agrega olarak TS 802 (2016)'ya uygun olarak belirlenmiştir. Üretimde kullanılan agregaların özgül ağırlıklarını belirlemek için deneyler uygulanmıştır. Kaba agregadan bir miktar alınarak 24 saat etüvde bekletilmiştir. Etüvden çıkarılan numuneler tartılıp Arşimed Deneyi ile hacimleri bulunmuştur. Hacmi bulunan kaba agregaların kuru yüzey özgül ağırlıkları hesaplanmıştır. Doygun yüzey kuru ağırlığını hesaplamak için kaba agregalardan bir miktar daha alınmıştır ve 24 saat suda bekletilmiştir. 24 saat sonunda havlu yardımıyla kaba agregaların yüzeyi kurulanıp tartılmıştır. Daha sonra Arşimed Deneyi uygulanarak hacmi belirlenip doymun yüzey özgül ağırlığı hesaplanmıştır.

İnce agregadan bir miktar alınarak etüvde 24 saat bekletilmiştir. 24 saat sonunda ince agregalar tartılarak kuru ağırlıkları belirlenmiştir. İnce agregalarının tane yapısından dolayı hacim belirlenmesinde dereceli silindir kap kullanılmıştır. Hacim belirlendikten sonra kuru yüzey özgül ağırlıkları hesaplanmıştır. İnce agregadan bir miktar daha alınarak 24 saat suda bekletilmiştir. Sudan alınan agregaların yüzeyi kurutulup hacmi belirlenerek doymun yüzey özgül ağırlığı hesaplanmıştır. Deney sonuçları Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

3.2.2 Geopolimer beton karışım oranlarının belirlenmesi

Geopolimer beton üretiminde bağlayıcı olarak YFC ve katkı malzemesi olarak cam tozu kullanılmıştır. Bağlayıcı dozajı 400 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. YFC yerine %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında cam tozu kullanılarak 5 grup geopolimer beton numunesi üretilmiştir. Oluşturulan geopolimer beton gruplarının kodları Çizelge 3.5'te C0, C5, C10, C15 ve C20 olarak belirtilmiştir. Literatür çalışmalarının incelenmesi ve laboratuvarında yapılan denemeler sonucunda optimum silis modülü 1.5, çözelti/bağlayıcı oranı 0.50 ve çözeltinin molaritesi 12 M olarak belirlenmiştir. Bu belirlenen değerlere göre aktivatör miktarı ve hacmi hesaplanmıştır. Bağlayıcı miktarının ve aktivatör miktarının toplamının 1 m^3 'den çıkarılması ile toplam agrega hacmi bulunmuştur. Geopolimer beton üretimi için belirlenen karışım miktarları Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 : Geopolimer beton kodları.

Geopolimer beton kodu	Ağırlıkça malzeme oranı (%)	
	Cam Tozu	YFC
C0	0	100
C5	5	95
C10	10	90
C15	15	85
C20	20	80

Çizelge 3.6 : Geopolimer karışımlarda kullanılan malzeme miktarları (1 m³ için).

Karışımlar	C0	C5	C10	C15	C20
Cam Tozu (kg)	-	20	40	60	80
YFC (kg)	400	380	360	340	320
NaOH çözeltisi (kg)	200	200	200	200	200
Agrega 0-4 mm (kg)	1102.76	1101.5	1100.23	1098.96	1097.69
4-8 mm (kg)	605.35	604.65	604.96	603.26	602.56

3.2.3 Geopolimer beton üretimi, numunelerin yerine konması ve kür edilmesi

Geopolimer beton üretimi için belirlenen malzemeler 0.1 g hassasiyetli terazide tartılarak karışıma hazır hale getirilmiştir. İlk önce alkali aktivatör çözeltisi hazırlanmıştır. Daha sonra sırasıyla YFC ve cam tozu, ince agreg a ve kaba agreg a beton karıştırma mikserine eklenerek karıştırılmış tır. Hazır hale getirilen geopolimer beton numunelerinin yağlanan 50x50x50 mm boyutuna sahip çelik kalıplara düzgün şekilde yerleşmesini sağlamak için hem şişleme çubuğu kullanılmış, hem de tokmakla vurularak titreşim etkisi oluşturulmuştur. Yerleştirilen numunelerin yüzeyi mala ile düzeltilip 24 saat kalıpta bekletilmiştir. 24 saatin sonunda kalıptan çıkarılan numuneler oda koşullarında deney gününe kadar bekletilmiştir.



Şekil 3.10 : Kalıplara yerleştirilmiş geopolimer beton numuneler.



Şekil 3.11 : Geopolimer beton numunelerinin kür edilmesi.

3.2.4 Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler

Bu çalışma kapsamında üretilen geopolimer beton numunelerde basınç dayanımı, ağırlık kaybı, kılcal geçirimsizlik, yarmada çekme dayanımı ve yangın dayanımı deneyleri yapılmış ve elde edilen deney verileri kontrol numuneleri ile karşılaştırılmıştır.

3.2.4.1 Basınç dayanımı

Elde edilen geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları TS EN 12390-3 (2019) test metodu kullanılarak belirlenmiştir. Geopolimer beton numuneleri yükleme yüzeyi temizlenen basınç dayanım cihazına düzgün bir şekilde yerleştirilip cihaz ekranından numune boyutları seçilmiştir. Boyutu seçilen numunelerin yükleme hızı 1.40 kN/s olarak cihaz tarafından otomatik belirlenmiştir.

Numunelerin basınç dayanımı Denklem 3.1 kullanılarak elde edilmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarını elde etmek için her numuneden üçer adet üretilip ortalaması alınmıştır.

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

F_c : Basınç dayanımı, MPa.

P : Kırılma anındaki en büyük yük, N.

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

3.2.4.2 Ağırlık kaybı

Yangın dayanımı deneyi için yüksek sıcaklığa maruz bırakılan geopolimer beton numunelerinde meydana gelen deformasyonu incelemek için ağırlık kaybı değerleri incelenmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılacak her numunenin yangın öncesi ve yangın sonrası ağırlığı 0.01 g hassasiyetli terazide tartılmıştır. Geopolimer beton numunelerinin ağırlık değişimleri Denklem 3.2 ile hesaplanmıştır.

$$\text{Ağırlık kaybı (\%)} = \frac{(W - W_0)}{W_0} \times 100 \quad (3.1)$$

W_0 : Numunenin başlangıçtaki ağırlığı, g.

W : Numunenin yangın sonrası ağırlığı, g.

3.2.4.3 Kılcal geçirimlilik deneyi

Kılcal geçirimlilik deneyi ASTM C1585 standardına uygun bir şekilde yapılmıştır. Deney için numuneler etüvde 105±5°C sıcaklıkta 24 saat boyunca Şekil 3.12’de görüldüğü gibi bekletilmiştir. Etüvden çıkarılan numunelerin yan yüzeylerinin su geçirmemesi için suya dayanıklı bir bantla kenarları sarılmıştır. Daha sonra numuneler alt yüzeylerinden 5 mm suya temas edecek şekilde hazırlanan düzeneğe konulmuştur (Şekil 3.13). Aynı anda

kronometre başlatılıp 5, 15, 30, 60 ve 1440 dakikalık süreler sonunda numunelerin yüzeylerindeki su bir havlu ile silinmiştir ve 0.01 g duyarlılıktaki terazide tartılarak ağırlıkları kaydedilmiştir. Numunelerin 24 saat içerisinde birim alanda kapiler olarak emdiği su miktarından yola çıkılarak kılcal geçirimlilik katsayısı Denklem 3.3 ve Denklem 3.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca deney sonuçları her üç numunenin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Geopolimer beton numunelerin yangın sonrasındaki kılcal geçirimlilik değerleri belirlenirken yukarıda verilen yöntem kullanılmıştır.

$$S = \frac{I}{t^2} \quad (3.3)$$

$$I = \frac{m_t}{a \times d} \quad (3.4)$$

S: Numunelerin geçirgenlik değerleri, (cm/s^{0.5}).

I: Numunelerin su emmesi, (cm).

t: Zaman, (s).

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

a: Numunenin açıkta kalan yüzey alanı, (cm²).

d: Suyun yoğunluğu, (g/cm³).



Şekil 3.12 : Kılcal geçirimlilik deneyi için etüvde bekletilen geopolimer beton numuneler.



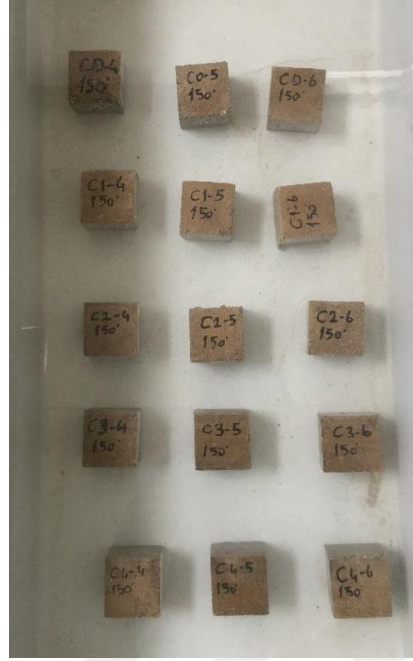
Şekil 3.13 : Kılcal geçirimsizlik deneyi düzeneğindeki geopolimer beton numuneler.

3.2.4.4 Yangın dayanımı deneyi

Geopolimer numuneler 28 gün hava kürüne tabi olduktan sonra yangın dayanımlarını belirlemek amacıyla her grup karışımından 40 numune alınarak fırında bir saat süreyle bekletilmek üzere 150, 300, 450, 600 ve 750°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık fırınından çıkarılan numunelere havada ve suda olmak üzere iki farklı şekilde soğutma uygulanmıştır. Havada soğutmada, fırından çıkarılan her numune tüm yüzeyinin havayla temasını sağlayarak dışarıda soğumaya bırakılmıştır (Şekil 3.14). Suda soğutmada, fırından çıkarılan numuneler içerisinde su bulunan kaba konularak oda sıcaklığına gelene kadar su içinde bırakılmıştır (Şekil 3.15).



Şekil 3.14: Havada soğumaya bırakılan numuneler.



Şekil 3.15 : Suda soğumaya bırakılan numuneler.

3.2.4.5 Yarmada çekme dayanımı deneyi

Geopolimer numunelerin yarmada çekme dayanımlarını belirlemek için TS 12390-6 (2010) standardı kullanılmıştır. Bu deney için her gruptan 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde silindir numuneler üretilmiştir. 28 günlük kür süresini tamamlayan numuneler çekme dayanım cihazına düzgün bir şekilde yerleştirilip yükleme yapılmıştır.

Numunelerin yarmada çekme dayanımları Denklem 3.5 kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 3.16 : Yarmada çekme dayanımı deneyi uygulanan geopolimer beton numune.

$$\sigma = \frac{2P}{\pi LD} \quad (3.5)$$

σ : Yarmada çekme dayanımı, (MPa).

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

L: Silindir numunenin uzunluğu, (mm).

D: Silindir numunenin çapı, (mm).

3.2.4.6 SEM-EDX analizi

Numunelerde iyi bir sinyal oluşumu sağlamak amacıyla SEM-EDX analizlerine başlamadan önce numune üzerine düşen elektronların bir noktada birikmemesi için numune yüzeyi altın paladyum tozları kullanılarak iletken bir kaplama ile kaplanmıştır. SEM-EDX analizleri İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1 Agregada Deneyleri İle İlgili Bulgular ve Tartışma

Deneyde kullanılan kaba ve ince agregalar için özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Agregaların kuru özgül ağırlık, doymun kuru yüzey özgül ağırlık, görünen özgül ağırlık ve su emme oranları hesaplanarak sonuçları Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : Agreganın özgül ağırlık ve su emme oranı.

Özellik	Agrega (mm)	
	0-4	4-8
Kuru özgül Ağırlık	2.49	2.60
Doymun kuru özgül ağırlık	2.57	2.62
Görünen özgül ağırlık	2.62	2.69
Su emme oranı (%)	2.00	1.50

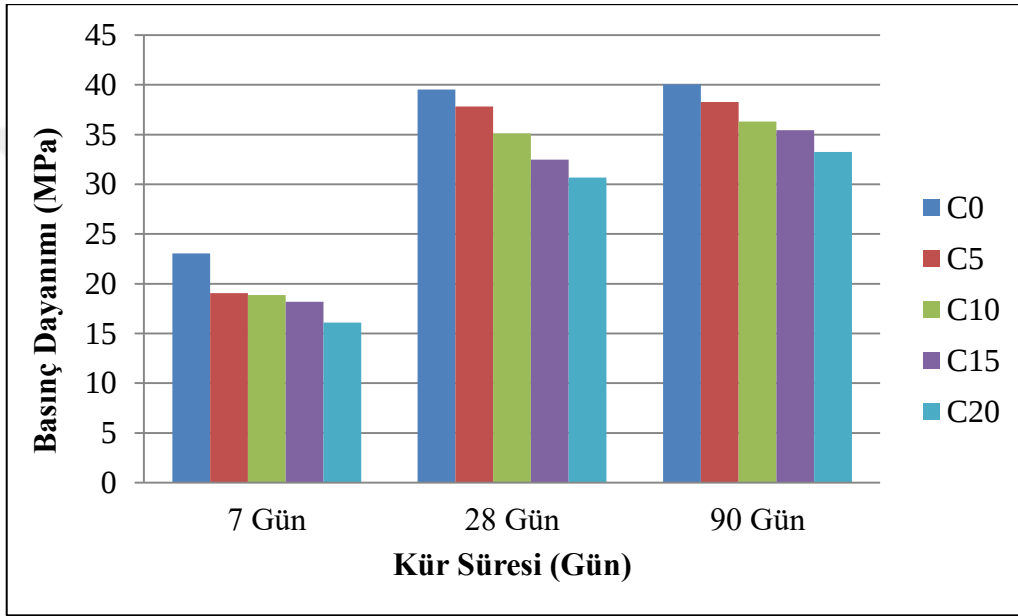
4.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri İle İlgili Bulgular ve Tartışma

Üretilen 5 grup geopolimer beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı, 28 günlük yarmada çekme dayanımı ve 28 günlük yangın sonrası basınç dayanımı, kılcal geçirgenlik ve ağırlık kaybı değerleri incelenmiştir.

7, 28, 90 günlük kür süresini tamamlayan 5 grup numunenin basınç dayanımları incelenmiştir. Elde edilen basınç dayanımları Çizelge 4.2’de verilip Şekil 4.1’de grafik halinde gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 : Geopolimer beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri.

Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)		
	Kür Süresi		
	7 Gün	28 Gün	90 Gün
C0	23.03	39.54	40.03
C5	19.07	37.81	38.27
C10	18.87	35.13	36.32
C15	18.20	32.49	35.45
C20	16.10	30.67	33.25



Şekil 4.1 : Geopolimer beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri.

7 günlük basınç dayanım sonuçları incelendiğinde en yüksek dayanımın cam tozu içermeyen C0 geopolimer beton numunesinde, en düşük dayanımın %20 cam tozu içeren C20 geopolimer beton numunesinde elde edildiği görülmüştür ve kür süresi arttıkça tüm geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı artış göstermiştir. Bu artış 28 günde gözle görülebilir bir fark ile gerçekleşirken, 90 günde artış fazla gerçekleşmemiştir.

7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerlerine bakıldığında cam tozu katkılı karışımların basınç dayanımının düşük çıkmasının bir sebebi; cam tozunun puzolanik reaksiyonunun yavaş gerçekleşmesinden yani cam tozunun erken yaştaki puzolanik aktivitesinin düşük olmasından kaynaklanabilir. Bir başka sebep ise, büyük cam partiküllerinin kullanımı daha fazla cam matris ara yüzleri ara yüz geçiş bölgesi sağlayabilir. Camın pürüzsüz ve yoğun yüzeyinden dolayı ara yüzey bağlanma mukavemetini daha da düşürebilir. Böylece basınç

dayanımını azaltabilir. Bu sebeplere ek olarak kullanılan cam tozunun YFC'ye oranla daha kaba olmasının basınç dayanım sonuçlarını olumsuz etkilediği düşünülmektedir.

Orhan ve Şahin (2016), yaptığı çalışmada 50 µm boyutunda cam tozu %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında çimento yerine kullanarak beton üretmiştir. Üretilen numunelere 20±2°C'de 7, 28 ve 90 gün su kürü uygulanmıştır. Kür havuzundan çıkarılan numuneler etüvde kurutulmuştur. Daha sonra numuneler 100°C, 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklığa 1 saat maruz bırakılmış ve havada kurutma uygulanmıştır. 7 günlük basınç dayanımı sonuçlarında cam tozunun ve sıcaklığın artmasıyla dayanım azalmıştır. 28 ve 90 günlük dayanımlarda kontrol betonuna göre daha az dayanım kaybı gerçekleşmiştir.

4.2.1 Kontrol numuneleri ile ilgili bulgular ve tartışma

28 gün kür edilen numunelerin basınç dayanımı, kılcal geçirimsizlik, yarmada çekme dayanımı ve görsel incelemeleri yapılmıştır.

4.2.1.1 Kontrol numunelerin basınç dayanımı

%0, %5, %10, %15 ve %20 cam tozu içeren 5 grup geopolimer betonun 28 günlük basınç dayanım değerleri Çizelge 4.2'de ve Şekil 4.1'de verilmiştir.

Cam tozu kullanılarak üretilen numunelerin basınç dayanım değerleri cam tozu kullanılmadan üretilen numunelerin basınç dayanım değerlerine göre azalma göstermiştir. Sonuçlar incelendiğinde %5, %10, %15 ve %20 cam tozu kullanımı dayanımı sırasıyla %4.38, %11.15, %17.83, %22.44 oranlarında azalttığı görülmüştür. Dolayısıyla cam tozu miktarı arttıkça dayanım azalmıştır. Bunun sebebinin; cam tozu miktarının artmasıyla cam tozunun pürüzsüz yüzeyinden ve hidratasyon ürünlerinin yavaş oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunun yanında kür süresinin cam tozu için yeterli olmadığı söylenebilir.

Uzun ve diğ., (2018) %10, %15 ve %20 oranlarında cam tozu çimento ile yer değiştirerek ve buhar kürü uygulayarak 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerlerini incelemişlerdir. Sonuç olarak 7 günlük dayanımda %10 cam tozu kullanımı kontrol numunesine göre %17.8 azalma gösterirken %15 ve %20 cam tozu kullanımında sırasıyla %0.68 ve %3.98 oranlarında dayanımda artış göstermiştir. 28 günlük dayanım sonuçları incelendiğinde %10 cam tozu kullanımında kontrol numunesine göre %4.18 azalma gösterirken %15 ve %20 cam tozu kullanımında sırasıyla %17.46 ve %21.32 oranlarında

artış göstermiştir. Elde edilen sonuçlara göre en iyi dayanıma %20 cam tozu kullanımında ulaşılmıştır.

Al-Obeidy ve Khalil (2016), yaptıkları çalışmada %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında cam tozunu çimento yerine kullanarak beton numunelerin 7, 28, 60 ve 90 günlük basınç dayanımını incelemişlerdir. 7 ve 28 günlük dayanım sonuçlarında genel olarak dayanımda azalma görülürken en az dayanım azalması %10 cam tozu kullanımında görülmüştür. 60 ve 90 günlük dayanım sonuçlarında %15'e kadar cam tozu miktarının artmasıyla dayanımın arttığı, %15'den sonra cam tozu miktarı arttıkça dayanımın düştüğü görülmüştür. %15 oranında cam tozu kullanımı 28, 60 ve 90 günlük dayanımları sırasıyla %1.17, %13.34 ve %19.34 oranında artırmıştır.

Yassen ve diğ., (2018) yaptıkları çalışmada %0, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında cam tozunu çimento yerine kullanarak 28 ve 56 günlük basınç dayanım sonuçlarını incelemişlerdir. %10, %15, %20 ve %25 cam tozu kullanıldığında 28 günlük basınç dayanımında kontrol numunesine göre sırasıyla %86.2, %113.4, %125.8 ve %26.2 artış görülürken, 56 günlük basınç dayanımında sırasıyla %84.7, %123.4, %110.3 ve %24.2 artış görülmüştür. Sonuç olarak %20 cam tozu kullanımı 28 günlük basınç dayanımında en yüksek değeri verirken %15 cam tozu kullanımı 56 günlük basınç dayanımında en yüksek değeri vermiştir.

Sethi ve diğ., (2019) yaptıkları çalışmada %15, %20 ve %25 oranında uçucu külün granüle yüksek fırın cürufu ile değiştirilmesi ve %5, %10 ve %15 cam tozu eklenmesiyle geopolimer betonu geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmada 4 M, 8 M ve 12 M olmak üzere 3 farklı NaOH solüsyonu kullanılmıştır. 7 ve 28 günlük kontrol betonun (S0-G0-M12) basınç dayanımı sırasıyla 7.37 MPa ve 15 MPa olarak bulunmuştur. GGBS %15 ve GP %15 içeren geopolimer numunenin basınç dayanım artışı GGBFS %25 ve GP %5 benzer olduğu görülmüştür. Fakat GGBFS %15 ve GP %15 geopolimer betonun dayanım artış yüzdesi GGBFS %25 ve GP %5 geopolimer betonunkinden daha azdır. Cam tozu artışı geopolimer beton karışımların dayanımını azaltmıştır. 4 M konsantrasyonun S25-G5 karışımının tüm karışımlarda en yüksek basınç dayanımı gösterdiği ve mol konsantrasyonu arttıkça dayanımın azaldığı görülmüştür.

Vijayakumar ve diğ., (2013) yaptıkları çalışmada %10, %20, %30 ve %40 oranlarında cam tozunu çimento yerine kullanarak 28 ve 60 günlük dayanım sonuçlarını geleneksel beton ile karşılaştırmışlardır. Geleneksel betonun 28 günlük basınç dayanımı 31.1 MPa

bulunmuştur. Cam tozunun çimento ile %20, %30 ve %40 oranlarında yer değiştirilmesi ile basınç dayanımı sırasıyla %19.6, %25.3 ve %33.7 artış göstermiştir.

Nahi ve diğ., (2020) yaptıkları çalışmada ağırlıkça %0, %10, %25, %35 ve %60 oranlarında cam tozunu çimento ile yer değiştirerek harç numuneler elde etmişlerdir. Bu numuneler 7, 28 ve 90 gün kür edilmiştir. Tüm kürleme yaşlarında cam tozunun artışıyla basınç dayanımı azalmıştır.

Mehta ve Ashish (2020), yaptıkları çalışmada silis dumanı ve atık camın betonun işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Cam tozunun artmasıyla çökme artmış, dayanım ve geçirgenlik azalmıştır. Betonun basınç, yarmada çekme gerilmesi ve eğilme dayanımı dahil olmak üzere betonun sertleşmiş ve uzun vadeli özelliklerini iyileştirmek için çimento yerine %20'ye kadar cam tozu ilavesi kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Annakoa (2019), yaptığı çalışmada cam tozu/YFC oranı %0, %10, %20, %30, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 0.67, 1, 1.5 olan geopolimer beton numuneler üretmiştir. Elde edilen numunelerin 28 günlük basınç dayanım sonuçları incelendiğinde cam tozu yüzdesinin artması ile basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. İdeal dayanımın %15-%20 cam tozu kullanımında elde edildiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 0.67 olan numunelerde dayanım sonuçları etkili çıkmıştır.

Zhang ve diğ., (2020) yaptıkları çalışmada üç farklı partikül boyutu dağılımına sahip cam tozu, yüksek fırın cürufu ve F sınıfı uçucu külünü alkali aktivatörler ile reaksiyona sokarak numuneler üretmişlerdir. Üretilen numuneler ilk 24 saat 20°C, 50°C, 80°C ve 100°C'de, daha sonra ise 20°C sıcaklıkta kürlenmiştir. Basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde cam tozu tane büyüklüğünün etkili olduğu ve atık camın daha küçük parçacık boyutunun genellikle geopolimerlerin dayanımını artırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

He ve diğ., (2021) yaptıkları çalışmada alkali ile aktifleştirilmiş cüruf harçlarına büyük miktarda cam tozu ekleyip ortamda 28 gün kür edildiğinde basınç dayanımında azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

Lu ve Poon (2018), yaptıkları çalışmada atık cam, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanarak ve alkali ile aktifleştirilerek elde ettikleri harçta cam tozu miktarının artmasıyla basınç dayanımının azaldığı sonucuna ulaşmışlardır.

Sonuç olarak literatürde cam tozu kullanım oranı arttıkça, basınç dayanımı açısından bazı çalışmalarda artma, bazı çalışmalarda ise azalma gözlemlendiği tespit edilmiştir. Bu farklılığın daha çok kullanılan cam tozunun fiziksel özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

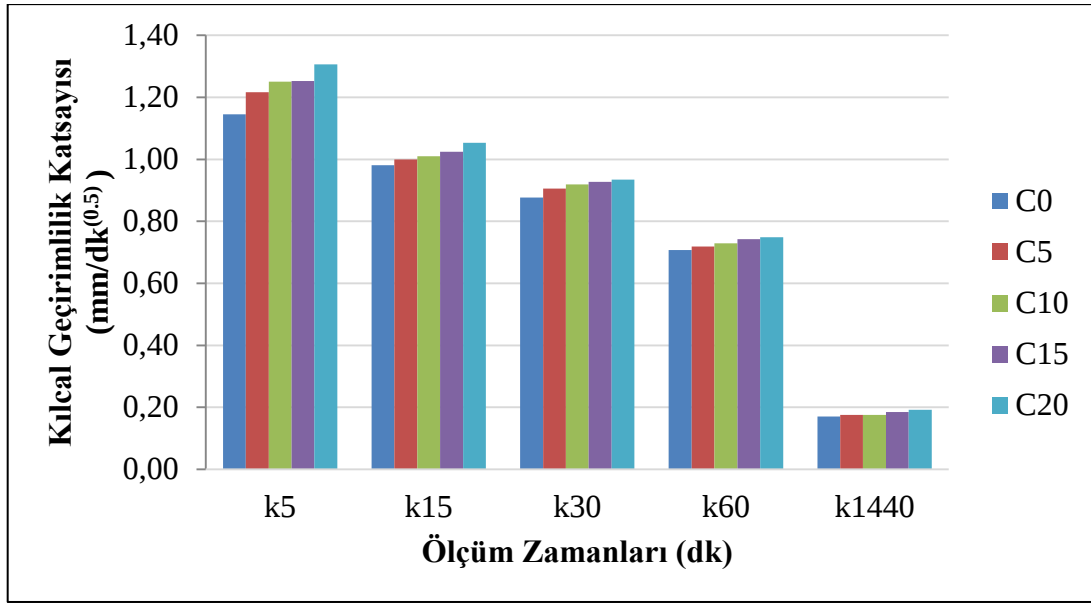
4.2.1.2 Kontrol numunelerin kılcal geçirimliliği

Kılcal geçirimlilik deneyi uygulanan numunelerden elde edilen veriler Çizelge 4.3'te verilip Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Sonuçlara göre cam tozu miktarı arttıkça kılcal geçirimlilik katsayısı tüm karışımlarda artmıştır.

%0 cam tozu içeren C0 numunesinde kılcal geçirimlilik katsayısı 5, 15, 30, 60 ve 1440 dakikalık ölçüm zamanında sırasıyla 1.14, 0.98, 0.88, 0.71 ve 0.17 değerleri ile minimum olduğu görülürken, %20 cam tozu içeren C20 numunesinde kılcal geçirimlilik katsayısı sırasıyla 1.31, 1.05, 0.93, 0.75, 0.19 değerleri ile maksimum olduğu görülmüştür. Ayrıca ölçüm zamanı arttıkça kılcal geçirimlilik katsayısı azalmıştır.

Çizelge 4.3 : Geopolimer beton kontrol numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısı değerleri.

Karışım adı	Kılcal geçirimlilik katsayısı [$\text{mm/dk}^{(0.5)}$]				
	k_5	k_{15}	k_{30}	k_{60}	k_{1440}
C0	1.14	0.98	0.88	0.71	0.17
C5	1.22	1.00	0.91	0.72	0.18
C10	1.25	1.01	0.92	0.73	0.18
C15	1.25	1.02	0.93	0.74	0.18
C20	1.31	1.05	0.93	0.75	0.19



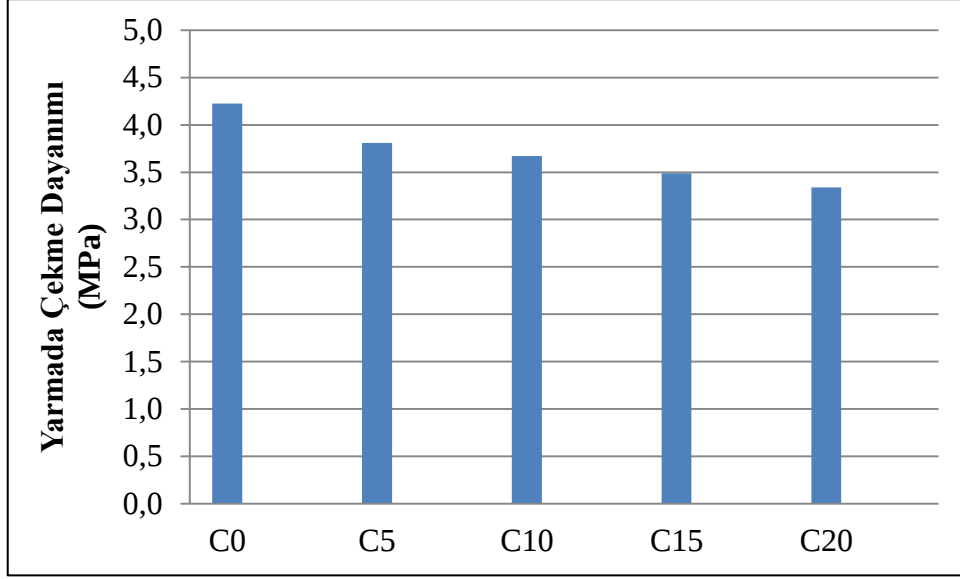
Şekil 4.2 : Geopolimer beton kontrol numunelerin zamana bağlı kılcal geçirimsizlik katsayı değerleri.

4.2.1.3 Kontrol numunelerin yarmada çekme dayanımı

28 günlük kür süresini tamamlayan geopolimer beton numunelerin yarmada çekme dayanımı değerleri Çizelge 4.4'te verilip Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde yarmada çekme dayanımı en düşük C20, en yüksek C0 geopolimer beton numunesinden elde edilmiştir.

Çizelge 4.4 : Geopolimer beton numunelerin 28 günlük yarmada çekme dayanım değerleri.

Karışım	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)
C0	4.22
C5	3.81
C10	3.67
C15	3.49
C20	3.34



Şekil 4.3 : Geopolimer beton numunelerin yarmada çekme dayanım değerleri.

Elde edilen sonuçlara göre %5, %10, %15 ve %20 cam tozu içeren geopolimer beton numuneleri, kontrol betonunun yarmada çekme dayanımına göre sırasıyla %9.86, %13.13, %17.44 ve %20.94 oranında azalma göstermiştir. Yarmada çekme dayanımının düşük çıkmasının sebebinin betonun kırılgan yapısından ve ara yüzey geçiş bölgesinin özelliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Yassen ve diğ., (2018), yaptıkları çalışmada cam tozunu kısmi olarak çimento yerine kullanımını araştırmışlardır. Yarmada çekme dayanımındaki artış, kontrol beton numunesine göre %10, %15, %20 ve %25 oranında cam tozu kullanımında sırasıyla %87.1, %88.2, %61.9 ve %27.0 olduğu görülmüştür.

Orhan ve Esen (2017), yaptıkları çalışmada %0, %5, %10, %15 ve %20 oranında cam tozunu çimento ile yer değiştirerek üretilen numuneleri 7, 28 ve 90 gün su kürüne tabi tutmuşlardır. Yarmada çekme dayanımı sonuçları incelendiğinde 7 günlük dayanımda kontrol betonu en yüksek çıkarken, 28 ve 90 günlük dayanımda %10 cam tozu kullanımında en yüksek değer çıktığı görülmüştür.

Vijayakumar ve diğ., (2013), yaptıkları çalışmada %10, %20, %30 ve %40 oranında cam tozunu çimento ile yer değiştirerek 60 günlük yarmada çekme dayanımını incelemişlerdir. %40 cam tozu kullanımının kontrol betona göre yarmada çekme dayanımını %4.4 artırdığı sonucuna varılmıştır.

Ubeid ve diğ., (2020), yaptıkları çalışmada %0, %10, %15 cam tozunu çimento yerine kullanmışlardır. %10 ve %15 cam tozu kullanımı kontrol betonuna göre yarmada çekme dayanımını sırasıyla %23.5 ve %28.7 oranında artırmıştır.

4.2.1.4 Kontrol numunelerin görsel incelemeleri

Kür sürelerini tamamlayan beton numunelerin görünüşleri Şekil 4.4'teki gibidir. Cam tozu miktarı arttıkça numunelerin renginin koyulaştığı görülmektedir.



Şekil 4.4 : Kür süresini tamamlayan kontrol numunelerin görünüşleri.

4.2.2 Yangın sonrası geopolimer beton numuneleri ile ilgili bulgular ve tartışma

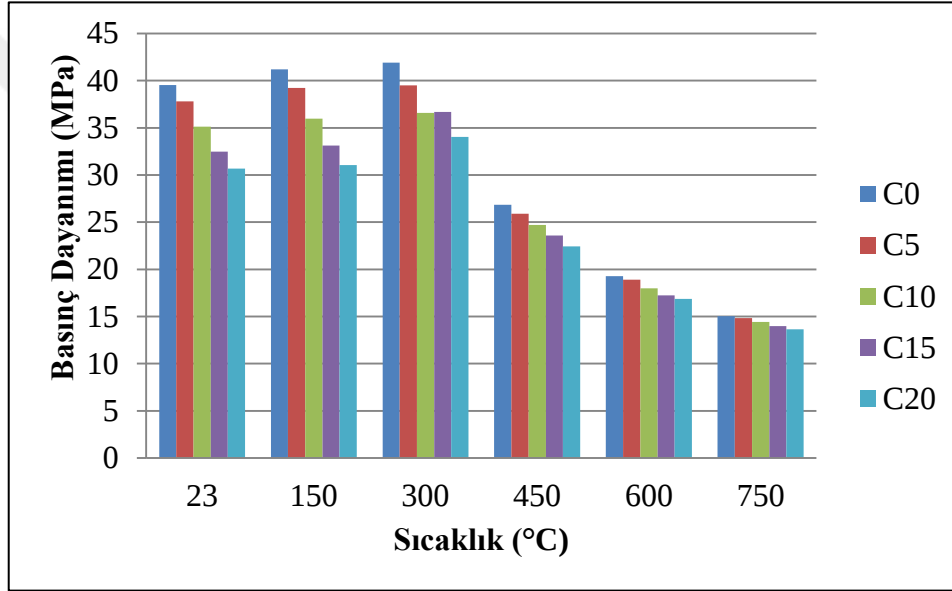
Kür süresini tamamlayan geopolimer beton numuneler 150, 300, 450, 600 ve 750°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra numunelere havada ve suda soğutma uygulanmıştır. Soğutma işlemlerinden sonra basınç dayanımı, kılcal geçirimsizlik ve ağırlık kaybı deneyleri uygulanarak elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

4.2.2.1 Yangın sonrası numunelerin basınç dayanımı

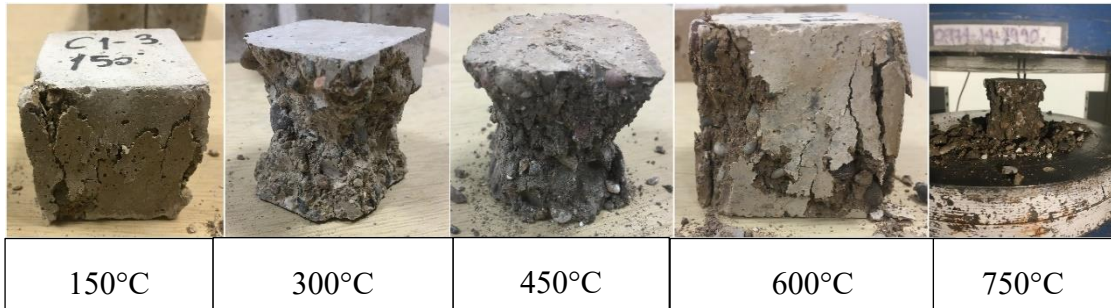
Havada soğumaya bırakılan numunelerin yangın sonrası basınç dayanım sonuçları incelendiğinde en yüksek basınç dayanım değeri 300°C'de C0 adlı numunede 41.90 MPa ve en düşük dayanım değeri 750°C'de C20 adlı numunede 13.65 MPa olarak bulunmuştur. Uygulanan sıcaklık maruziyetleri göz önüne alındığında tüm gruplarda en yüksek dayanım değerlerine 300°C'de ulaşılmıştır. Havada soğumaya bırakılan numunelerde bütün sıcaklık değerlerinde en yüksek dayanım C0 ve en düşük dayanım C20 beton numunelerinde elde edilmiştir. Yüksek sıcaklığın beton üzerindeki olumsuz etkisinin 450°C'de belirgin olarak ortaya çıktığı gözlenmiştir. Sıcaklık 300°C'yi aştığında hidratasyon ürünleri olan CH ve C-S-H jelinde dehidratasyon sebebiyle dayanımda düşüş meydana geldiği düşünülmektedir.

Çizelge 4.5 : Yangın sonrası havada soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri.

Basınç Dayanımı (MPa)					
Sıcaklık (°C)	C0	C5	C10	C15	C20
23	39.54	37.81	35.13	32.49	30.67
150	41.20	39.23	35.98	33.11	31.05
300	41.90	39.50	36.60	36.70	34.03
450	26.83	25.91	24.72	23.59	22.45
600	19.27	18.89	17.98	17.24	16.87
750	15.03	14.84	14.43	13.97	13.65



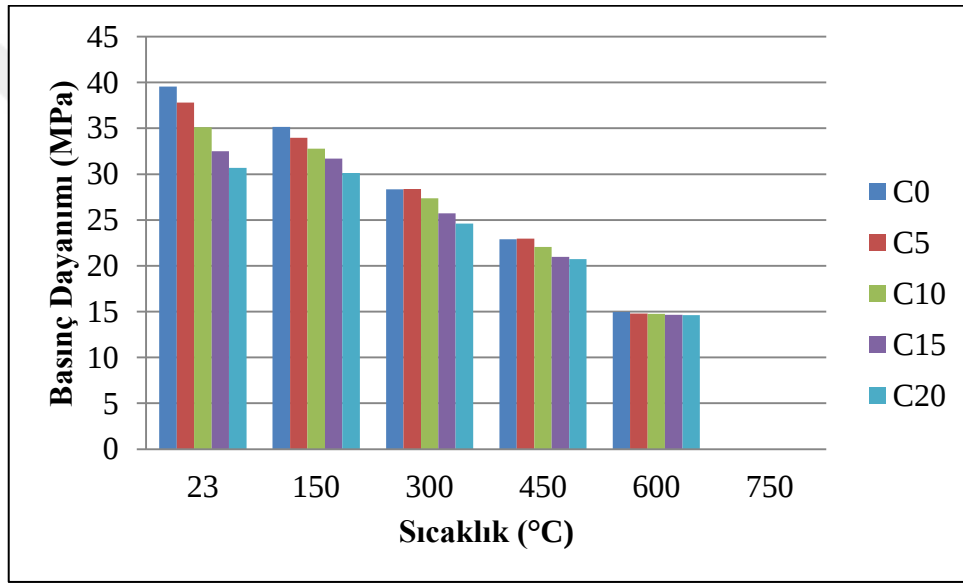
Şekil 4.5 : Yangın sonrası havada soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri.



Şekil 4.6 : Yangın sonrası havada soğuyan numunelerin basınç dayanımı deneyi sonrası görselleri.

Çizelge 4.6 : Yangın sonrası suda soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri.

Basınç Dayanımı (MPa)					
Sıcaklık (°C)	C0	C5	C10	C15	C20
23	39.54	37.81	35.13	32.49	30.67
150	35.17	33.95	32.77	31.69	30.12
300	28.33	28.37	27.38	25.72	24.60
450	22.90	22.95	22.07	20.97	20.73
600	14.97	14.81	14.76	14.65	14.62
750	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



Şekil 4.7 : Yangın sonrası suda soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri.

Suda soğumaya bırakılan numunelerin yangın sonrası basınç dayanım değerleri incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı 0°C’de C0 adlı geopolimer beton numunede 39.54 MPa olarak elde edilmiştir. Uygulanan sıcaklık maruziyetleri göz önüne alındığında tüm gruplarda en yüksek dayanım değerlerine 0°C’de ulaşılmıştır. 750°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin suda soğutulması sonucunda beton numunelerde basınç dayanım değeri elde edilememiştir. Bunun sebebinin; betonun yüksek sıcaklığa maruziyeti sonrası suda hızlı soğuması ile termal şok olduğu için meydana geldiği düşünülmektedir.



Şekil 4.8 : 750°C yangın sonrası suda soğutulan numuneye uygulanan basınç dayanımı deneyi sonrası görülen dağılma.

Dayanım sonuçları incelendiğinde havada soğuyan numunelerin basınç dayanımlarının suda soğuyan numunelerin dayanımlarından yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sebebi; yangın sonrası suda ani soğuma gerçekleştiği için çatlak oluşumuna neden olduğu ve bu durumun basınç dayanımını düşürdüğü düşünülmektedir.

Mahmoud ve diğ., (2019) yaptıkları çalışmada cam atığını betonda %0, %7.5, %10, %12.5 ve %15 oranlarında yer değiştirmiştir. 21, 250, 500 ve 750°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelere havada soğutma uygulanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde 750°C sıcaklığa maruz bırakılan cam atığı içeren tüm numunelerden cam tozu içermeyen numuneye göre daha iyi basınç dayanımı elde edilmiştir. Özellikle %12.5 ve %15 cam tozunun basınç dayanımı üzerinde geliştirici etkisi olduğu görülmüştür.

Kalakada ve diğ., (2019) yaptıkları çalışmada cam tozunu %0, %15, %30 ve %50 oranlarında çimentoyla yer değiştirerek ortamda, 40°C’de ve suda kür işlemi uygulamışlardır. 75 µm’den ve 150 µm’den küçük olmak üzere iki farklı boyutta cam tozu kullanılmıştır. 7, 28 ve 91 günlük basınç dayanım sonuçları incelendiğinde 75 µm boyutunda %15 ve %30 cam tozunun kullanılmasıyla sırası ile 39 MPa ve 31 MPa’lık maksimum basınç dayanımı elde edilmiştir. Farklı kürleme koşullarına ve farklı kürleme yaşlarına maruz kalan numunelerde cam tozunun artışıyla basınç dayanımı azalma göstermiştir. Bu azalma 91 günlük 40°C kürleme koşullarında belirginlik göstererek %15 cam tozu kullanımında %4, %30 cam tozu kullanımında %13 oranında gözlenmiştir.

Yüksek sıcaklıkta kütleme 7 günlük basınç dayanımında artışa neden olurken 91 günlük basınç dayanımında azalmaya neden olmuştur.

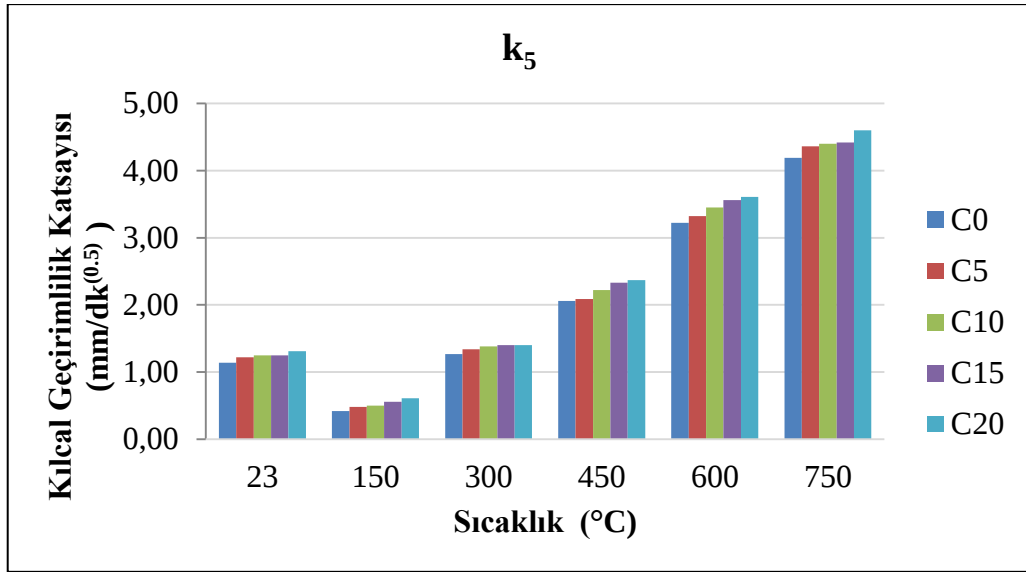
Annakoa (2019), yaptığı çalışmada cam tozu/YFC oranı %0, %10, %20, %30, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 0.67, 1, 1.5 olan geopolimer beton üretmiştir. Üretilen numuneler 300°C, 600°C, 900°C ve 1200°C sıcaklığa 1 saat süreyle maruz bırakılmıştır ve daha sonra havada soğutma işlemi uygulanmıştır. Soğutma işlemi sonrasında basınç dayanımları bulunarak 28 günlük numune değerleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde sıcaklık 300°C'yi aştığında dayanım kayıpları meydana gelmiştir. En az ağırlık kaybı %10 ile %15 cam tozu kullanımında ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 1.5 olan numunelerde görülmüştür.

4.2.2.2 Yangın sonrası numunelerin kılcal geçirimliliği

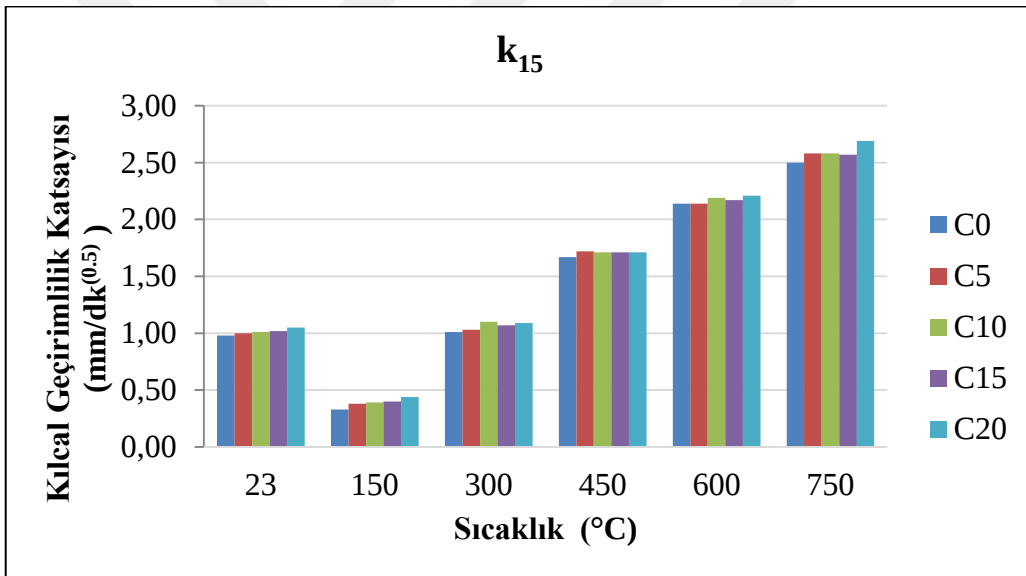
Üretilen geopolimer numuneler 150, 300, 450, 600 ve 750°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra kılcal geçirimlilik deneyine tabi tutulmuşlardır. Deney sonucunda elde edilen veriler Çizelge 4.7'de ve kılcal geçirimlilik katsayılarında meydana gelen değişim grafikleri Şekil 4.9-13'te gösterilmiştir. Sonuçlara göre sıcaklık arttıkça kılcal geçirimlilik katsayısı artmıştır. Bunun sebebinin sıcaklığın artması ile boşlukların ve çatlakların artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Cam tozu miktarında ise %20 cam tozu kullanımında en yüksek kılcal geçirimlilik değeri, %0 cam tozu kullanımında en düşük kılcal geçirimlilik değeri elde edilmiştir. Yani cam tozu düşük puzolanik reaksiyon gösterdiğinden kılcal geçirimliliğin arttığı düşünülmektedir. Ayrıca deney ölçüm süresi arttıkça birbirini takip eden süreler arasında ölçülen kılcal geçirimlilik katsayı değerlerinin azaldığı görülmüştür.

Çizelge 4.7 : Geopolimer beton numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısı değerleri.

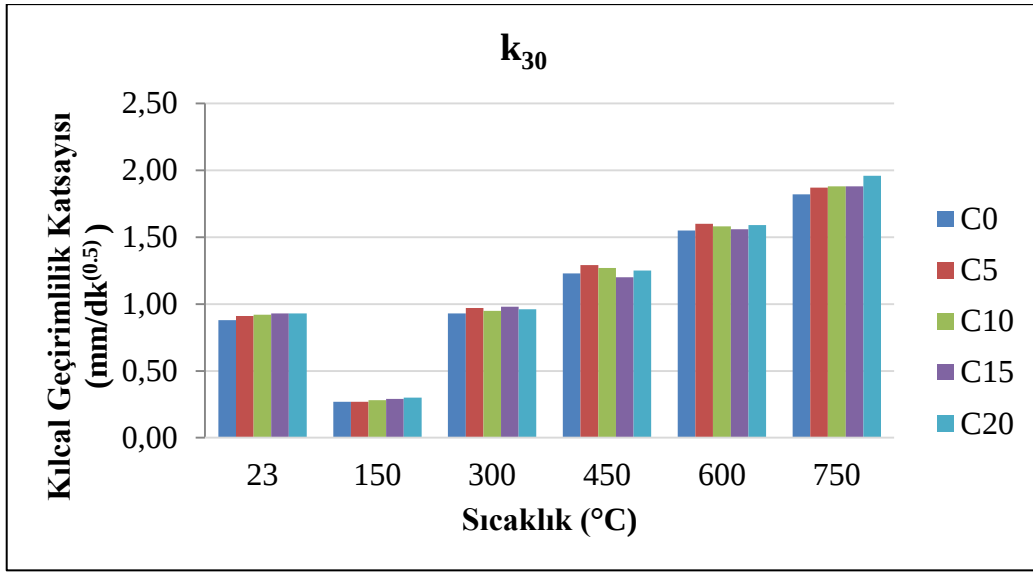
Sıcaklık (°C)	Karışım adı	Kılcal geçirimlilik katsayısı, (mm/dk ^(0.5))				
		k ₅	k ₁₅	k ₃₀	k ₆₀	k ₁₄₄₀
23	C0	1.14	0.98	0.88	0.71	0.17
	C5	1.22	1.00	0.91	0.72	0.18
	C10	1.25	1.01	0.92	0.73	0.18
	C15	1.25	1.02	0.93	0.74	0.18
	C20	1.31	1.05	0.93	0.75	0.19
150	C0	0.42	0.33	0.27	0.21	0.05
	C5	0.48	0.38	0.27	0.21	0.05
	C10	0.50	0.39	0.28	0.22	0.05
	C15	0.56	0.40	0.29	0.20	0.06
	C20	0.61	0.44	0.30	0.20	0.06
300	C0	1.27	1.01	0.93	0.76	0.17
	C5	1.34	1.03	0.97	0.75	0.16
	C10	1.38	1.10	0.95	0.73	0.16
	C15	1.40	1.07	0.98	0.74	0.16
	C20	1.40	1.09	0.96	0.76	0.18
450	C0	2.06	1.67	1.23	0.91	0.20
	C5	2.09	1.72	1.29	0.93	0.21
	C10	2.22	1.71	1.27	0.92	0.21
	C15	2.33	1.71	1.20	0.93	0.20
	C20	2.37	1.71	1.25	0.94	0.22
600	C0	3.22	2.14	1.55	1.12	0.24
	C5	3.32	2.14	1.60	1.13	0.24
	C10	3.45	2.19	1.58	1.15	0.24
	C15	3.56	2.17	1.56	1.12	0.25
	C20	3.61	2.21	1.59	1.18	0.25
750	C0	4.19	2.50	1.82	1.29	0.29
	C5	4.36	2.58	1.87	1.32	0.29
	C10	4.40	2.58	1.88	1.33	0.30
	C15	4.42	2.57	1.88	1.33	0.29
	C20	4.60	2.69	1.96	1.38	0.30



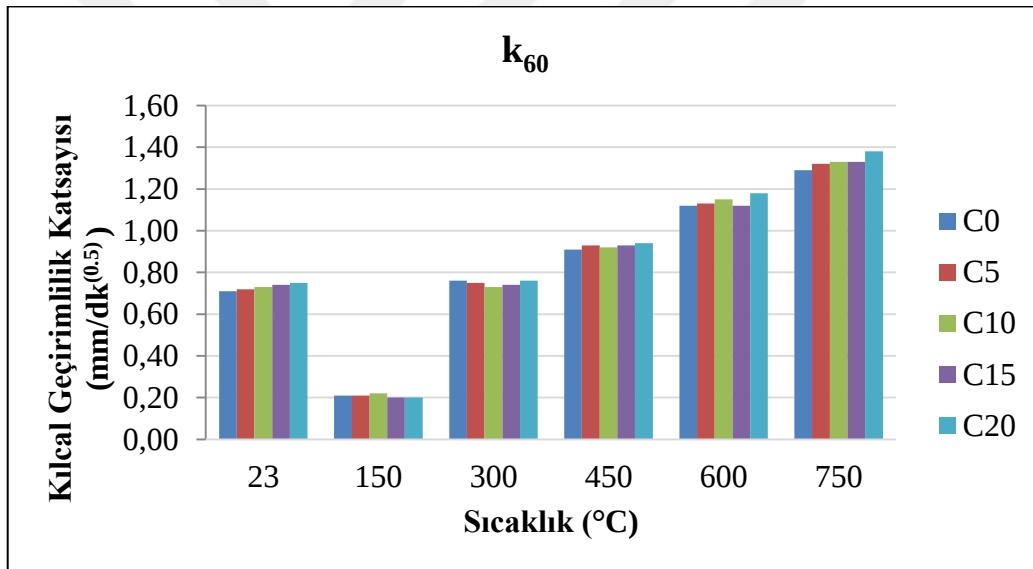
Şekil 4.9 : 5 dakikalık ölçüm için geopolimer beton numunelerin sıcaklığa bağlı olarak kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.



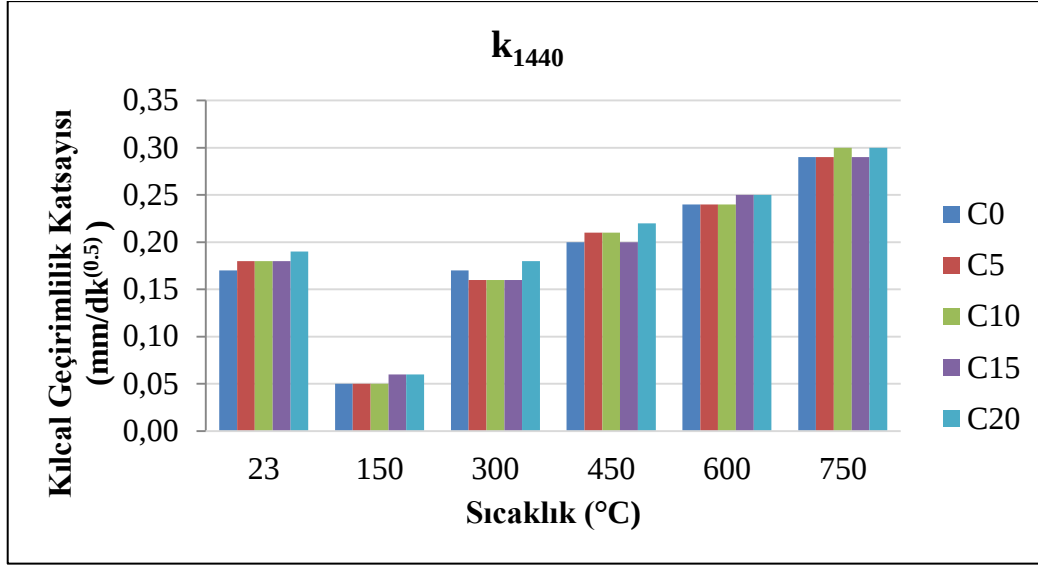
Şekil 4.10 : 15 dakikalık ölçüm için geopolimer beton numunelerin sıcaklığa bağlı olarak kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.



Şekil 4.11 : 30 dakikalık ölçüm için geopolimer beton numunelerin sıcaklığa bağlı olarak kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.



Şekil 4.12 : 60 dakikalık ölçüm için geopolimer beton numunelerin sıcaklığa bağlı olarak kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.



Şekil 4.13 : 1440 dakikalık ölçüm için geopolimer beton numunelerin sıcaklığa bağlı olarak kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.

Emiroğlu ve diğ., (2011) yaptıkları çalışmada %0, %10, %20 ve %30 oranlarında YFC kullanarak beton numuneler üretmişlerdir. Elde edilen numunelerin 90 günlük kür süresinin ardından kılcal geçirimliliğini incelemişlerdir. Deney ölçümü 0, 30, 50, 90, 175, 255, 360, 1440 ve 7740 dakikalık sürelerde gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonunda %0, %10, %20 ve %30 YFC kullanımında sırasıyla 2.93×10^{-6} , 9.8×10^{-6} , 10.06×10^{-6} ve 10.06×10^{-6} cm^2/s değerleri elde edilmiştir. Bu değerlere göre referans beton numunesinde en küçük kapilarite katsayısına, %20 ve %30 YFC katkılı beton numunesinde ise en yüksek kapilarite katsayısına ulaşılmıştır. Bu çalışmada YFC oranının artması ile kapilarite katsayısının arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Topal (2020), yaptığı çalışmada %0, %25, %50, %75 ve %100 geri dönüştürülmüş agrega, bağlayıcı olarak YFC, aktivatör olarak NaOH ve Na_2SiO_3 kullanarak geopolimer beton üretmiştir. Kür süresini tamamlayan numuneler 100, 200, 400, 600 ve 800°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra 5, 15, 30, 60 ve 1440 dakikalık zamanlarda ölçüm yaparak kılcal geçirimlilik deneyi gerçekleştirilmiştir. %0 oranında geri dönüştürülmüş agregada minimum kılcal geçirimlilik katsayısı elde edilirken %100 geri dönüştürülmüş agrega kullanımında maksimum kılcal geçirimlilik katsayısı elde edilmiştir. Yani geri dönüştürülmüş agrega miktarı arttıkça kılcal geçirimlilik katsayısı da artmıştır. Ayrıca ölçüm zamanı arttıkça kılcal geçirimlilik katsayısı azalmıştır.

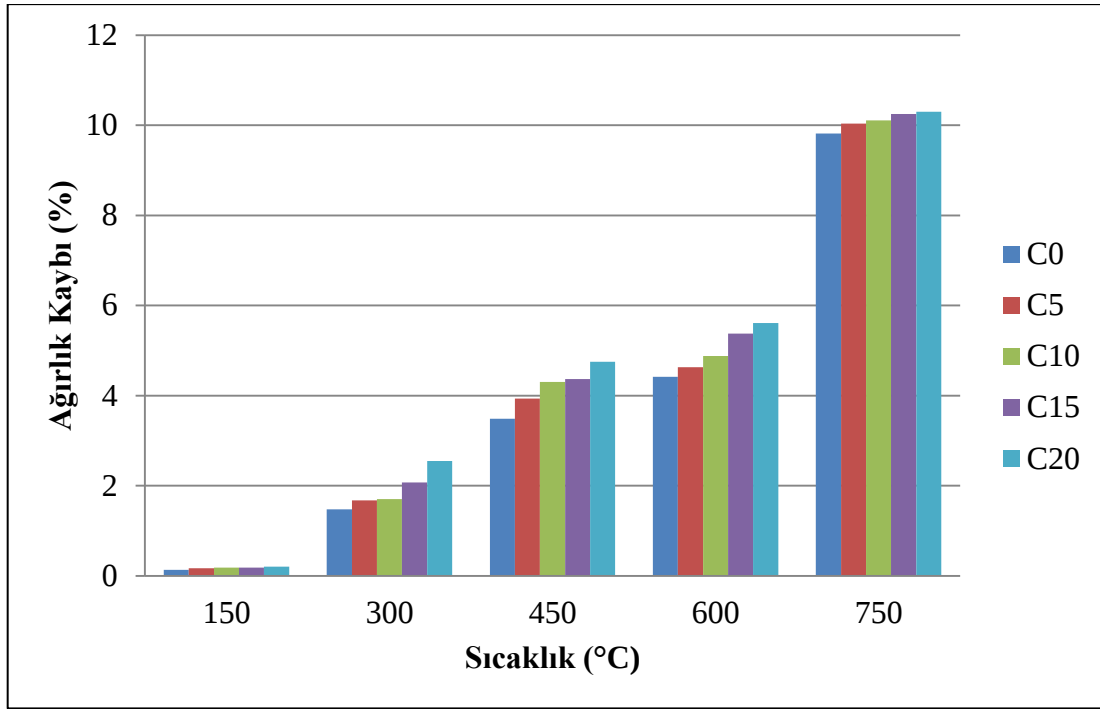
Sonuç olarak literatür incelendiğinde ölçüm zamanı arttıkça birbirini takip eden süreler arasında ölçülen kılcal geçirimlilik katsayısı azalmış, sıcaklık arttıkça da toplam kılcal geçirimlilik katsayısı artmıştır.

4.2.2.3 Yangın sonrası numunelerin ağırlık kaybı

Üretilen numuneler 150, 300, 450, 600 ve 750°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra oluşan ağırlık kaybı değerleri Çizelge 4.8-9'da verilmiş olup, değişim Şekil 4.14-15'te grafik olarak gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde en az ağırlık kaybı havada ve suda soğumaya bırakılan numunelerde C0 beton numunelerinde meydana gelmiştir. En fazla ağırlık kaybı ise hem havada hem suda soğuyan numunelerde C20 beton numunesinde gerçekleşmiştir. Sonuçlar incelendiğinde havada soğuyan numunelerde minimum ağırlık kaybı 150°C'de C0 numunesinde %0.13, maksimum ağırlık kaybı 750°C'de C20 numunesinde %10.30 olmuştur. Suda soğuyan numunelerde ise minimum ağırlık kaybı 150°C'de C0 numunesinde %0.22, maksimum ağırlık kaybı 750°C'de C20 numunesinde %14.29 olmuştur. Görüldüğü gibi, suda soğuyan numunelerin ağırlık kaybı değerleri havada soğuyan numunelerden daha fazladır. Bu sonuçlar, basınç dayanımı sonuçları ile uyumludur.

Çizelge 4.8 : Yangın sonrası havada soğuyan numunelerin ağırlık kaybı.

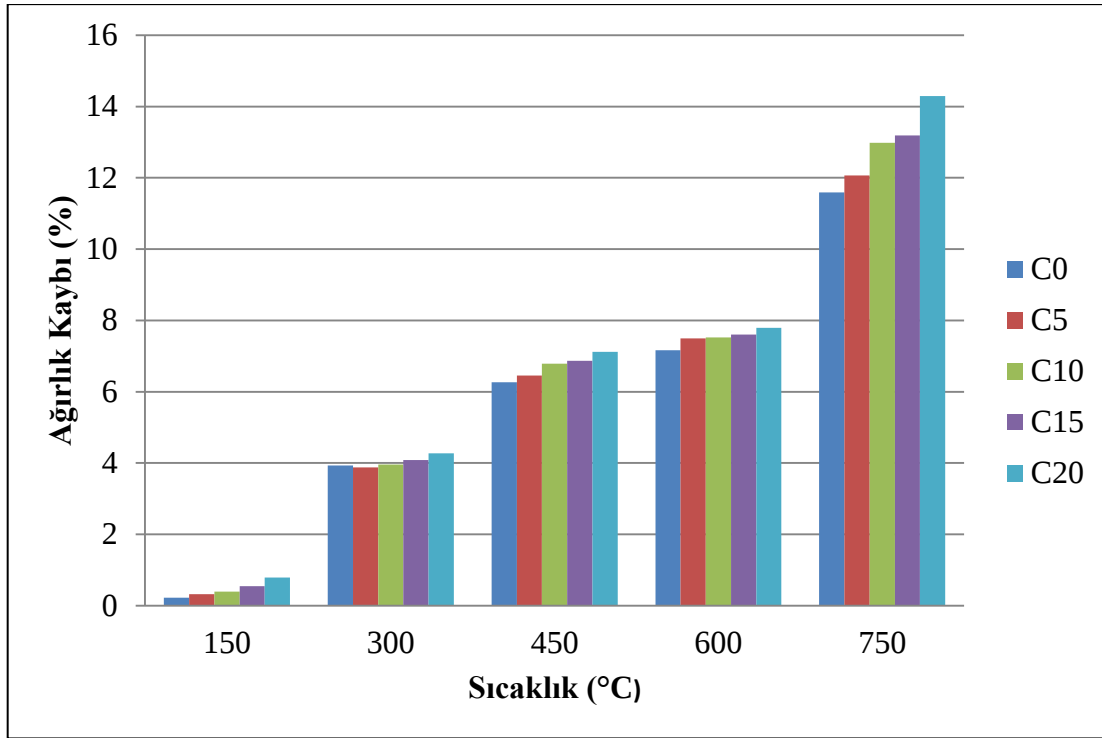
Karışım adı	Ağırlık Kaybı (%)				
	Sıcaklık (°C)				
	150	300	450	600	750
C0	0.13	1.47	3.49	4.42	9.82
C5	0.17	1.68	3.93	4.63	10.04
C10	0.18	1.70	4.31	4.88	10.11
C15	0.18	2.08	4.37	5.38	10.25
C20	0.21	2.55	4.75	5.61	10.30



Şekil 4.14 : Yangın sonrası havada soğuyan numunelerin ağırlık kaybı.

Çizelge 4.9 : Yangın sonrası suda soğuyan numunelerin ağırlık kaybı.

Ağırlık Kaybı (%)					
Karışım adı	Sıcaklık (°C)				
	150	300	450	600	750
C0	0.22	3.93	6.26	7.17	11.59
C5	0.32	3.88	6.46	7.50	12.07
C10	0.39	3.96	6.79	7.52	12.98
C15	0.54	4.08	6.87	7.61	13.19
C20	0.79	4.28	7.12	7.79	14.29



Şekil 4.15 : Yangın sonrası suda soğuyan numunelerin ağırlık kaybı.

Rodier ve Savastano Jr. (2018), 2 kg atık cam tozu ve 500 g seramik bilyeleri 7.5 L bir kavanoza koyarak kavanoz haddeleme tesisi kullanmışlardır. Öğütme işleminden sonra elde edilen cam tozu bir 325 nolu elekten (0.045 mm) elenmiştir. Cam tozunu %0, %10 ve %20 oranlarında çimento yerine kullanarak elde edilen harcın yangın sonrası ağırlık kaybı değerlerini incelemişlerdir. Oluşturulan numuneler 2 saat boyunca 700°C’de yangın dayanımına tabi tutulup havada soğutma işlemi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre cam tozu kullanılan harçlarda kontrol harcına göre yaklaşık %10 ağırlık kaybı gözlenmiştir.

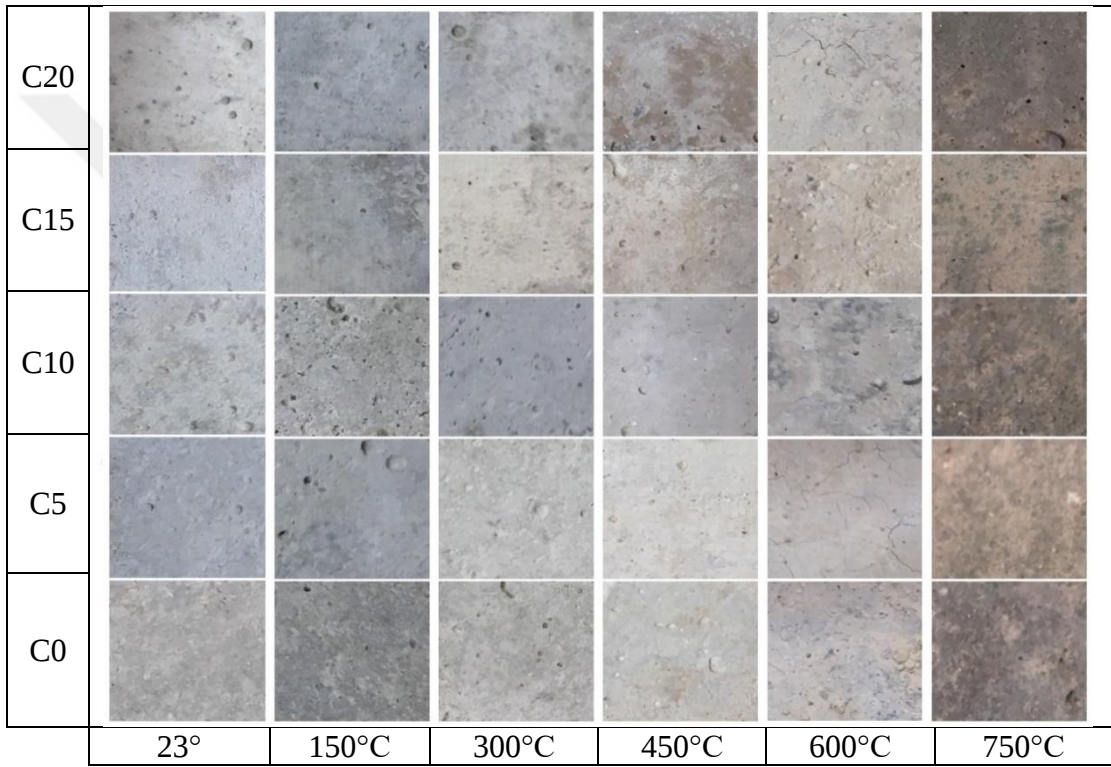
Durgun ve Sevinç (2019), yaptıkları çalışmada %10, %20 ve %30 oranında yüksek fırın cürufu (GGBFS) ve atık cam tozu (GP), %1, %3 ve %5 oranında kolemanit cevheri atıklarını çimento yerine kullanarak beton elde etmişlerdir. 28 ve 90 günlük kürden sonra 200, 400, 600, 800 ve 1000°C sıcaklığa maruz kalan numunelere havada ve suda soğutma işlemi uygulanmıştır. Tüm sıcaklık seviyelerinde hem havada hem suda soğutma işleminde en yüksek ağırlık kaybı %30 cam tozu kullanımında elde edilmiştir. 28 günlük gruplarda en düşükten en yüksek sıcaklık değerlerine doğru havada soğutma işleminde ağırlık kaybı %2.01, %3.06, %4.13, %7.65 ve %21.95; suda soğutma işleminde ağırlık kaybı %1.79, %2.59, %3.85 ve %9.51 olarak tespit edilmiştir. Sıcaklık bakımından 400°C sıcaklığa

kadar ağırlık kaybı fazla gerçekleşmemişken 600°C ve üzerindeki sıcaklıklarda en yüksek ağırlık kaybı %30 cam tozu kullanımında gerçekleşmiştir.

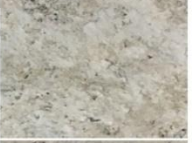
Sonuç olarak literatürde cam tozu oranının ve sıcaklığın artması ile ağırlık kaybının arttığı görülmüştür.

4.2.2.4 Yangın sonrası numunelerin görsel incelemeleri

Yüksek sıcaklığa maruziyet sonrası havada soğuyan geopolimer beton numuneler Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Numuneler görsel olarak incelendiğinde cam tozu miktarının ve sıcaklığın artmasıyla boşlukların meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 4.16 : Yangın sonrası havada soğuyan numunelerin görsel incelemeleri.

C20					
C15					
C10					
C5					
C0					
	150°C	300°C	450°C	600°C	750°C

Şekil 4.17 : Yangın sonrası suda soğuyan numunelerin görsel incelemeleri.

Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer beton numuneler suda soğuduktan sonra görsel incelemeleri Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Cam tozu miktarı ve sıcaklık arttıkça boşlukların arttığı görülmüştür. 750°C sıcaklıkta geopolimer beton numunelerde fazla deformasyon meydana gelmiş olup çatlakların genişlemesi ile ufalanmalar meydana gelmiştir.

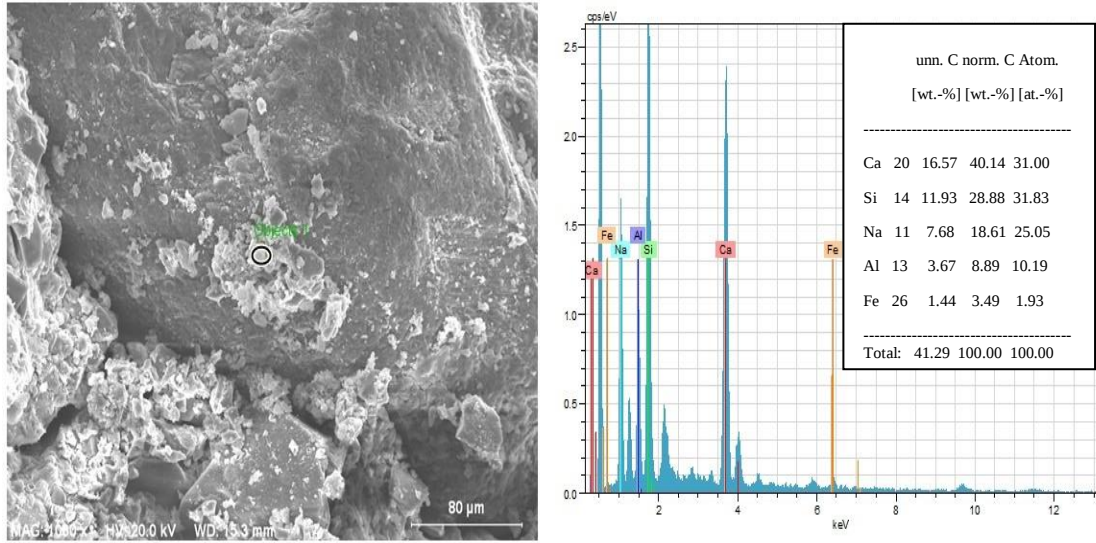
Durgun ve Sevinç (2019), yaptıkları çalışmada öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBFS), atık cam tozu (GP) ve kolemanit cevheri atıkları (CW) ile üretilen betonun özelliklerini incelemişlerdir. Ağırlıkça %10, %20 ve %30 GGBFS ve GP, %1, %3 ve %5 CW kullanılmıştır. Üretilen betonlar 28 ve 90 gün kürlendikten sonra 200, 400, 600, 800 ve 1000°C sıcaklığa 1 saat maruz bırakılmıştır. Maruziyet sonrası numunelere suda ve havada soğutma işlemi uygulanmıştır. Görsel incelemelere göre 200°C ve 400°C’de yüzeyde önemli çatlaklar bulunmamaktadır. 28 günlük numuneler için önemli çatlamlar ve bozulmalar 600°C’de, 90 günlük numuneler için 800°C’de gözlemlenmiştir. Tüm numuneler 1000°C su soğutmasında tamamen bozulmuştur.

Zhang ve diğ., (2020) yaptıkları çalışmada yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra ortam sıcaklığında ve ısıyla kürlenmiş düşük kalsiyumlu uçucu küllü geopolimer betonun performansını incelemişlerdir. Numuneler 100, 200, 400, 600, 800 ve 1000°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Fırın kürü 80°C’de 24 saat, ortam kürü ise 72 saat süreyle

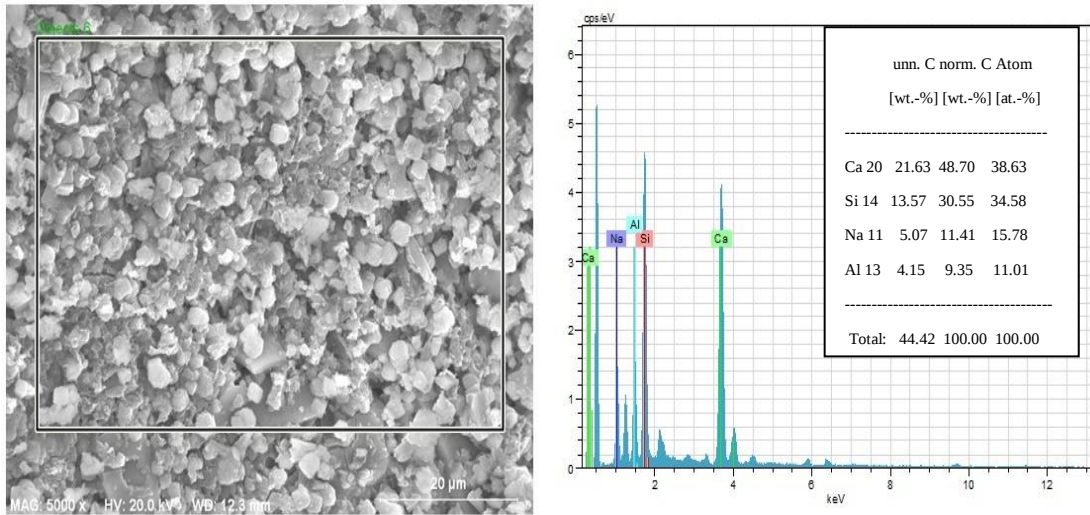
gerçekleştirilmiştir. Beton numuneler ortam sıcaklığında gri ve gri-beyaz renk göstermiştir. 600°C’de renk değişimi bariz bir şekilde görülmüştür. 800 ve 1000°C’de uçucu külün yüksek demir oksit içeriğinden dolayı kırmızı renk oluşumu görülmüştür.

4.2.3 Mikroyapı analizi

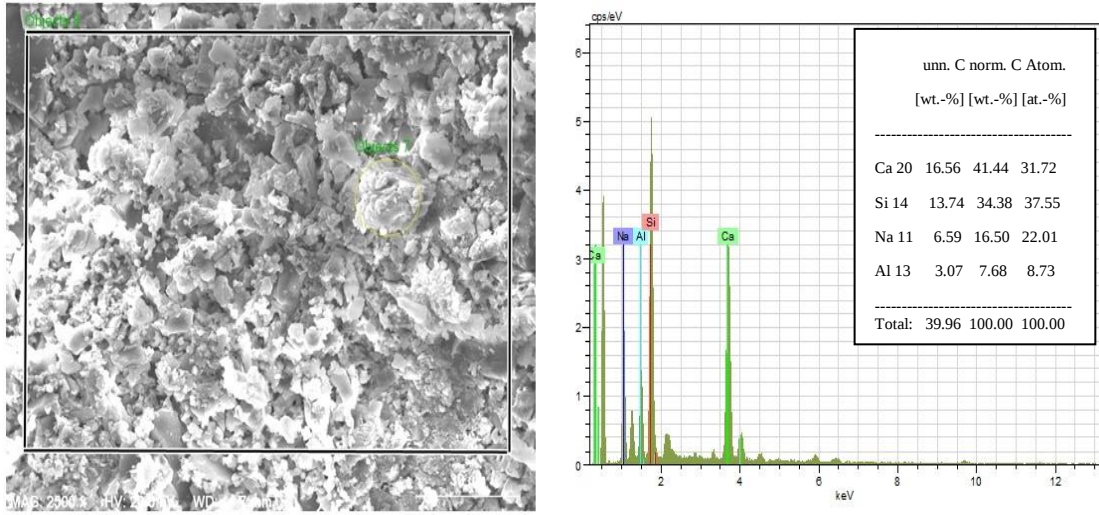
Bu bölümde numunelerin içyapı analizleri SEM ve EDX görüntüleri ile değerlendirilmiştir. Şekil 4.18-23’te numunelerin EDX analizleri, Şekil 4.24-29’da SEM analizleri gösterilmiştir.



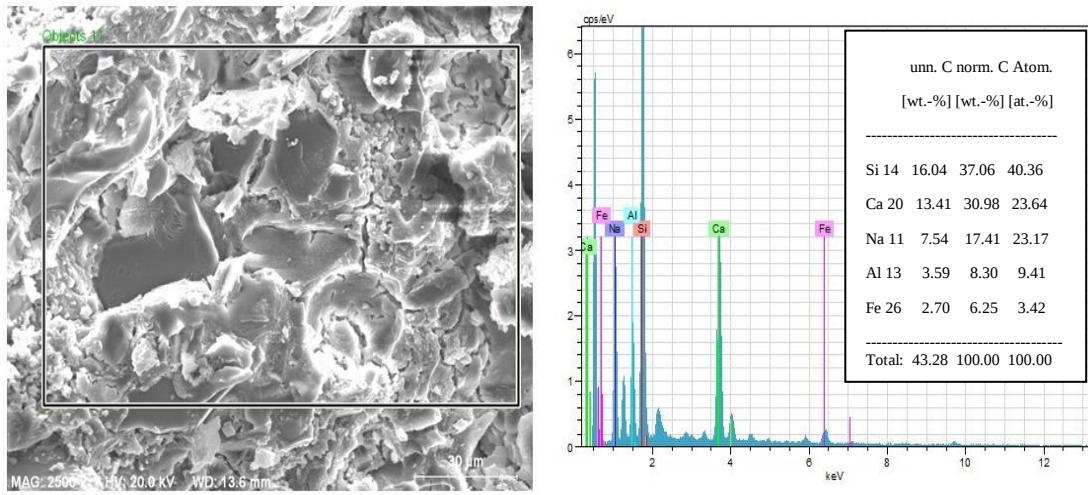
Şekil 4.18 : 23°C’de bekletilen geopolimer beton numunelerin EDX analizi.



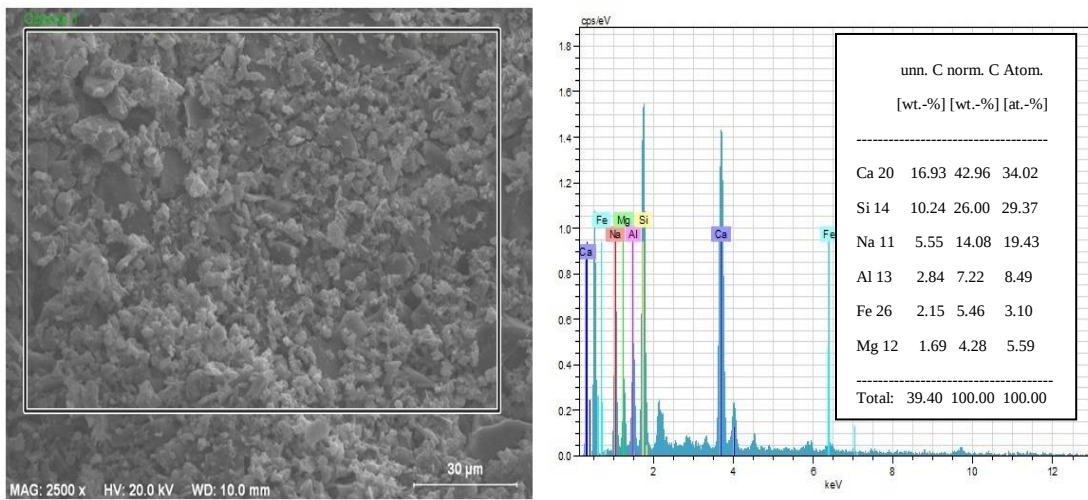
Şekil 4.19 : 150°C sıcaklıktaki geopolimer beton numunelerin EDX analizi.



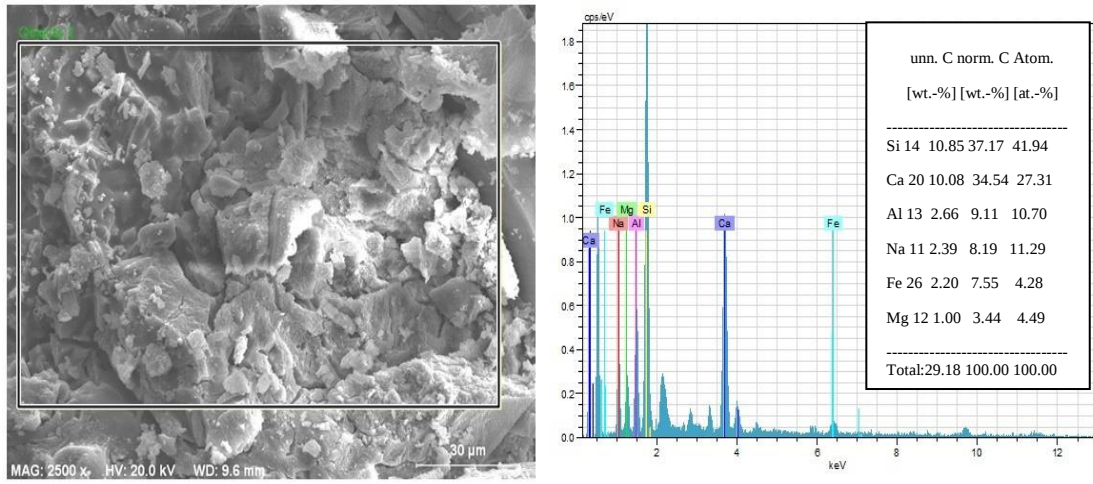
Şekil 4.20 : 300°C sıcaklıktaki geopolimer beton numunelerin EDX analizi.



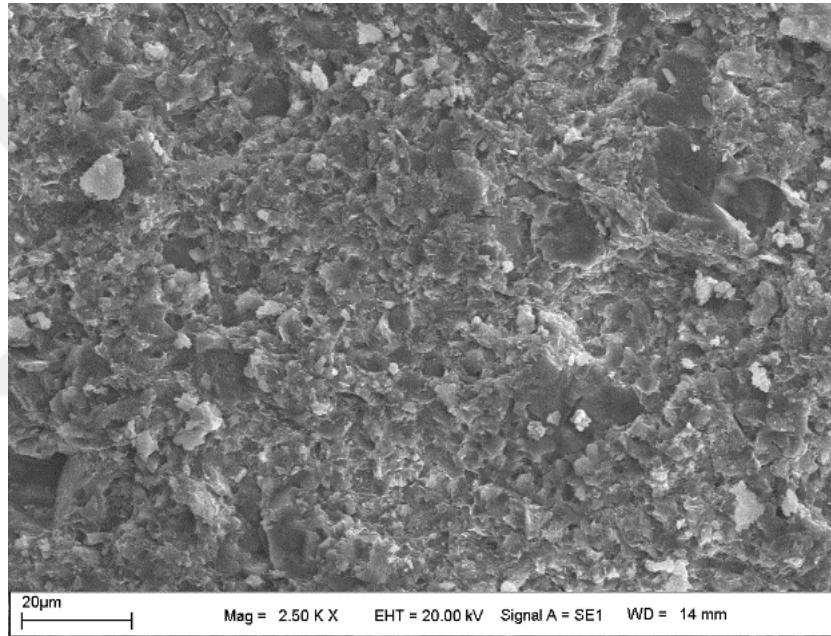
Şekil 4.21 : 450°C sıcaklıktaki geopolimer beton numunelerin EDX analizi.



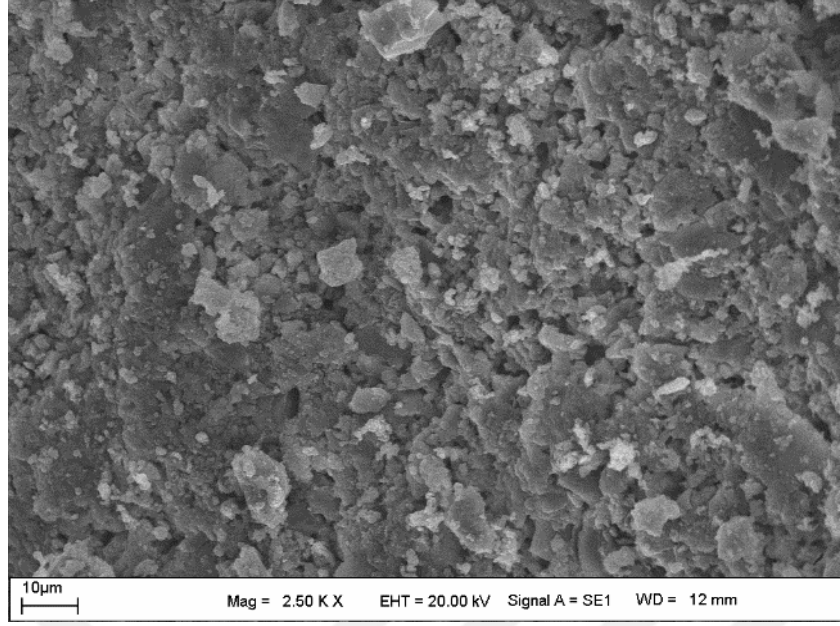
Şekil 4.22 : 600°C sıcaklıktaki geopolimer beton numunelerin EDX analizi.



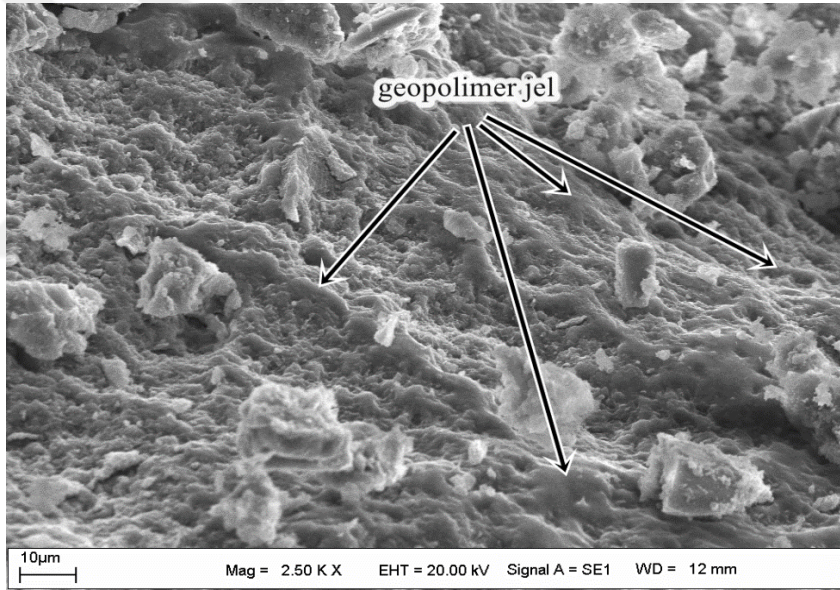
Şekil 4.23 : 750°C sıcaklıktaki geopolimer beton numunelerin EDX analizi.



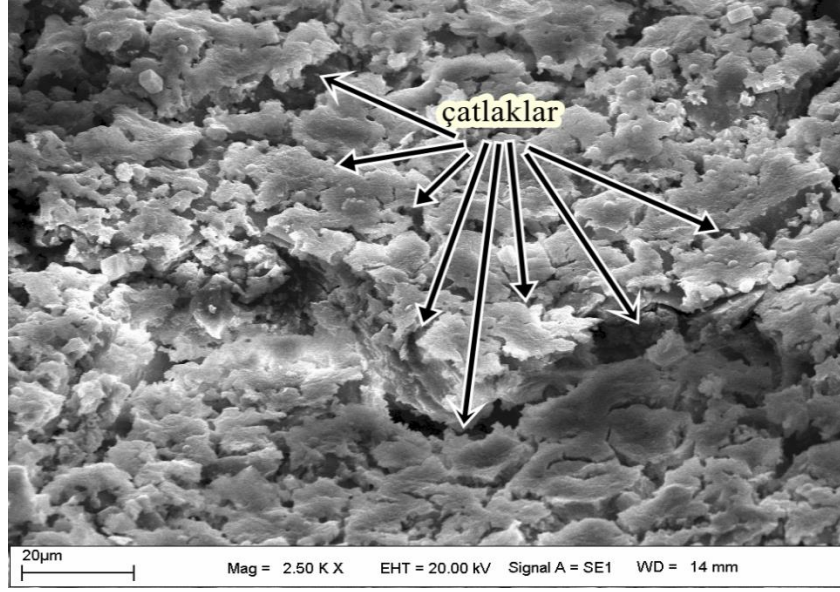
Şekil 4.24 : 23°C’de bekletilen geopolimer beton numunelerin SEM analizi.



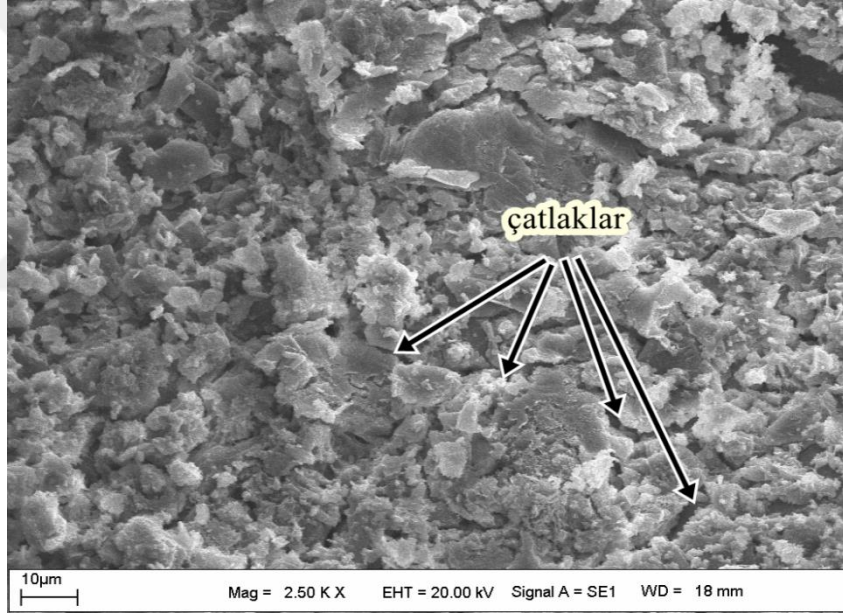
Şekil 4.25 : 150°C sıcaklıktaki geopolimer beton numunelerin SEM analizi.



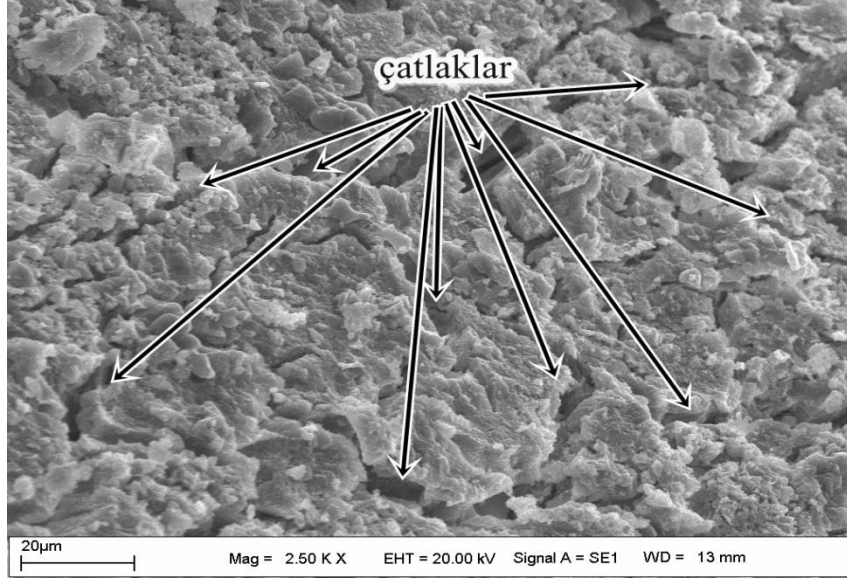
Şekil 4.26 : 300°C sıcaklıktaki geopolimer beton numunelerin SEM analizi.



Şekil 4.27 : 450°C sıcaklıktaki geopolimer beton numunelerin SEM analizi.



Şekil 4.28 : 600°C sıcaklıktaki geopolimer beton numunelerin SEM analizi.



Şekil 4.29 : 750°C sıcaklıktaki geopolimer beton numunelerin SEM analizi.

SEM analiz sonuçları incelendiğinde 300°C’den sonraki sıcaklık değerlerinde çatlak oluşumu başlamıştır. 750°C sıcaklıkta ise çatlakların artış gösterdiği gözlenmiştir.

Sethi ve diğ., (2019) yaptıkları çalışmada üç farklı konsantrasyonda aktivatör ile uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve cam kullanarak üretilen geopolimer betonu incelemişlerdir. Molar konsantrasyonu ve cam tozu arttıkça arayüzey geçiş bölgesinin bağı azalmış, harç ile agrega arasındaki boşluk artmıştır. Bu da harç ile agrega arasında zayıf bir bağ olduğunu göstermektedir.

Mehta ve Ashish (2020), yaptıkları çalışmada silis dumanı ve atık camın beton özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Cam tozu ilavesinin yoğun matrisler oluşturabileceği ve betonun mikroyapısını iyileştirdiği görülmüştür. Erken yaşlarda dolgu görevi görmüş ve pürüzsüz yüzey sonraki yaşlarda gözlenmiştir.

Durgun ve Sevinç (2019), yaptıkları çalışmada yüksek fırın cürufu, atık cam tozu ve kolemanit cevheri atıklarını çimento yerine kullanmışlardır. Betona 28 ve 90 gün kür uygulayıp farklı derecelerde yüksek sıcaklığa maruz bırakmış, suda ve havada soğutma işlemi uygulamışlardır. 800°C öncesinde önemli çatlamlar görülmediğinden 800°C ve 1000°C incelenmiştir. 800°C havada soğutmadan sonra çatlama açısından önemli değişiklikler görülmemiştir. Fakat suyla soğutmadan sonra arayüzey geçiş bölgesinde ve matriste mikro çatlaklar oluşmuştur. 1000°C’den sonra hidrasyon ürünlerinin tamamen zarar gördüğü ve C-S-H jeli yapısının değiştiği gözlenmiştir. 90 günlük örneklerin 28 günlük örneklere göre daha düşük mikroyapı değişiklikleri yaşadığı görülmüştür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında cam tozu YFC yerine ikame edilerek elde edilen geopolimer beton numunelere yangın dayanımı, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, kılcal geçirimlilik katsayısı ve ağırlık kaybı deneyleri uygulanmış, görsel incelemeleri yapılmış ve SEM-EDX ile içyapı analizleri incelenmiştir. Ayrıca 150, 300, 450, 600 ve 750°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelere havada ve suda olmak üzere iki farklı soğutma işlemi uygulanmıştır. Geopolimer beton numunelere uygulanan deneyler sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1. Geopolimer beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım sonuçlarında zamanla dayanımın arttığı görülmüştür. Fakat her kür süresinde cam tozu miktarının artmasıyla basınç dayanımı azalmıştır.
2. Numunelerin 28 günlük yarmada çekme dayanımı cam tozu miktarı arttıkça azalmıştır ve en yüksek değer C0 numunesinde, en düşük değer C20 numunesinde elde edilmiştir.
3. Yangın sonrası havada soğuyan numunelerde 300°C'de C0 numunesinde en yüksek, 750°C'de C20 numunesinde en düşük dayanım değerine ulaşılmıştır.
4. Yangın sonrası suda soğuyan numunelerde 150°C'de C0 numunesinde en yüksek dayanıma ulaşılmış ve 750°C sıcaklıkta dayanım değeri elde edilememiştir.
5. Havada soğuyan numunelerin basınç dayanımı suda soğuyan numunelerin basınç dayanımından yüksek olduğu görülmüştür.
6. Yangın sonrası kılcal geçirimlilik katsayıları incelendiğinde %20 cam tozu kullanımında en yüksek, %0 cam tozu kullanımında en düşük değer elde edilmiştir.
7. Kılcal geçirimlilik katsayısı sıcaklık arttıkça artmış, deney ölçüm süresi arttıkça azalmıştır.
8. En az ağırlık kaybı havada ve suda soğuyan numunelerde 150°C'de C0 numunesinde, en fazla ağırlık kaybı ise hem havada hem de suda soğuyan numunelerde 750°C'de C20 numunesinde meydana gelmiştir.
9. Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrasında görsel inceleme sonuçlarında havada ve suda soğuyan numunelerde cam tozunun ve sıcaklığın artmasıyla boşlukların

oluştugu görülmüştür. Ayrıca suda soğuyan numunelerde 750°C sıcaklıkta deformasyon miktarı artmış olup ufalanmalar meydana gelmiştir.

Yapılan bu çalışmada uygulanan deneyler ve elde edilen sonuçlar neticesinde, tane boyutu daha ince cam tozu kullanılarak üretilen geopolimer betonun yangına dayanımı için farklı yöntemler geliştirilebilir. Karışımlarda kullanılan bağlayıcı türü ve miktarı, kür koşulları, alkali aktivasyon çözelti konsantrasyonu ve türü değiştirilerek üretilen geopolimer betonların dayanıklılığı araştırılabilir.



KAYNAKLAR

- Abdallah, S., ve Fan, M.** (2014). Characteristics of concrete with waste glass as fine aggregate replacement. *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*, 2(6), 11-17.
- Abdulkareem, O. A., Abdullah, M. M. A. B., Hussin, K., Ismail, K. N., ve Binhussain, M.** (2013). Mechanical and microstructural evaluations of lightweight aggregate geopolymer concrete before and after exposed to elevated temperatures. *Materials*, 6(10), 4450-4461.
- Al Safi, A. A.** (2019). Blast furnace slag-based geopolymer mortars cured at different conditions: Modeling and optimization of compressive strength. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-13.
- Al-Obeidy, N. F., ve Khalil, W. I.** (2016). *Properties Of High Strength Eco-Friendly Concrete With Glass Waste Powder*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.161679>
- Annakoa, M. A. I.** (2019). *Geopolimer Betonda Cam Tozu Kullanımının Araştırılması*. Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ay, S.** (2010). Farklı agregalı betonların mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın etkisi/Effect of the temperature on mechanical properties of concrete which is prepared by different types of aggregates. *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Balçıkanlı, M., Özbay, E., ve Türker, H. T.** (2015). Alkalilerle Aktive Edilmiş Harçların Çekip Çıkarma ve Aşınma Dirençlerinin Belirlenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(2), 87-98.
- Barik, N., ve Mishra, J.** (2020). *Geopolymer concrete for sustainable development: A brief review*. 7(1), 5.
- Bilenler Altundal, M.** (2019). *Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı geopolimer betonların %5 sülfürik asit etkisinde mekanik davranışı* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Gelişim Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bilim, C.** (2006). *Yüksek fırın cürufu katkısının çimento tabanlı malzemelerde kullanılabilirliği* [Doktora tezi]. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bilim, C.** (2016). Alkali ile Aktive Edilmiş Cüruf Harçlarının Yangın Direnci. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2), 67-76.
- Bilim, C., ve Atış, C. D.** (2011). Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu İçeren Harçların Aşınma ve Mukavemet Özellikleri. *Politeknik Dergisi*, 14(2), 101-107.
- Binici, H., Eken, M., ve Aksoğan, O.** (2012). Cüruf, Uçucu Kül, Silis Kumu ve Pomza Esaslı Geopolimerlerin Fiziksel, Mekanik ve Radyasyon Geçirgenlik Özellikleri, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Toros Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü. *Yapı Teknolojileri Dergisi*8, 1, 12-25.
- Canbaz, M., ve Topçu, İ. B.** (2008). Alkali Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Harçlarda Asit Etkisi. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 016, 69-80.

- 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.
- Dakman, M. H.** (2017). *Köpük betonda yüksek sıcaklık etkisi* [Yüksek lisans tezi]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- De Toledo Pereira, D. S., Da Silva, F. J., Porto, A. B. R., Candido, V. S., Da Silva, A. C. R., Garcia Filho, F. D. C., ve Monteiro, S. N.** (2018). Comparative analysis between properties and microstructures of geopolymeric concrete and portland concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(4), 606-611.
- Deb, P. S., Nath, P., ve Sarker, P. K.** (2014). The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Materials ve Design (1980-2015)*, 62, 32-39.
- Deb, P. S., Nath, P., ve Sarker, P. K.** (2015). Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Procedia Engineering*, 125, 594-600.
- Durgun, M. Y., ve Sevinç, A. H.** (2019). High temperature resistance of concretes with GGBFS, waste glass powder, and colemanite ore wastes after different cooling conditions. *Construction and Building Materials*, 196, 66-81.
- Emiroğlu, M., Koçak, Y., ve Subaşı, S.** (2011). Yüksek Fırın Cürufunun Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 1, 113-117.
- Ganesh, C. A., ve Muthukannan, M.** (2018). A review of recent developments in geopolymer concrete. *International Journal of Engineering ve Technology*, 7(4.5), 696. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.5.25061>
- Gök, S. G., ve Kılınç, K.** (2017). Mechanical Properties of Fly Ash and Blast Furnace Slag Based Alkali Activated Concrete. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 3(2), 123-131.
- Guignone, G. C., Vieira, G. L., Zulcão, R., Degen, M. K., de Moraes Mittri, S. H., ve Baptista, G.** (2020). Incorporation of glass powder and metakaolin as cement partial replacement to improve concrete mechanical properties and increase service life. *Journal of Composite Materials*, 54(21), 2965-2983.
- Guo, P., Meng, W., Nassif, H., Gou, H., ve Bao, Y.** (2020). New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure. *Construction and Building Materials*, 257, 119579. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119579>
- Güçlüer, K.** (2019). Investigation of High Temperature Behaviors of Different Cure Applied Concretes. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(3), 126-134.
- Hasanuzzaman, M., Rafferty, A., Sajjia, M., ve Olabi, A. G.** (2016). Properties of glass materials. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*.

- Hassan, A., Arif, M., ve Shariq, M.** (2019). Use of geopolymers for a cleaner and sustainable environment—A review of mechanical properties and microstructure. *Journal of Cleaner Production*, 223, 704-728.
- He, P., Zhang, B., Lu, J.-X., ve Poon, C. S.** (2021). Reaction mechanisms of alkali-activated glass powder-ggbs-CAC composites. *Cement and Concrete Composites*, 104143.
- Jahangiri, N., Koseoglu, K., ve Cengizler, H.** (2017). Concrete with by-products and waste materials as aggregate or cement. *Dicle University Institute of Natural and Applied Science Journal*, 6, 29-38.
- Kalakada, Z., Doh, J.-H., ve Chowdhury, S.** (2019). Glass powder as replacement of cement for concrete—an investigative study. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-18.
- Kantarci, F.** (2013). *Elazığ ferrokrom cürufundan alkali aktivasyon metoduyla üretilen geopolimer çimentolu betonların yangın dayanımının araştırılması* [Yüksek lisans tezi]. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Karasu, B., Bereket, O., Biryan, E., ve Sanoğlu, D.** (2017). The latest developments in glass science and technology. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 4(2), 209-233.
- Kavas, T., Çelik, M. Y., ve Evcin, A.** (2004). Cam atıklarının çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, 5. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 13-14.
- Kaya, T., Karakurt, C., ve Dumangöz, M.** (2014). Mineral katkılı kendiliğinden yerleşen betonların porozite ve basınç dayanımlarına yüksek sıcaklığın etkisi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1(1), 39-44.
- Kazmi, D., Williams, D. J., ve Serati, M.** (2020). Waste glass in civil engineering applications—A review. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 17(2), 529-554.
- Kılıçoğlu, C.** (2013). *Cam atıklarının betonda agrega ve çimento yerine kullanımı* [Doktora tezi]. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kurt, A.** (2012). *Betonda yüksek sıcaklık etkisinin, mineral katkı çeşitlerine göre değişimi/High temperature effects in concrete, mineral additive variation of varieties* [Yüksek lisans tezi]. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kürklü, G.** (2016). Oda Sıcaklığında Kür Edilen Granüle Yüksek FırınCürufuGeopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 356-367.
- Lu, J.-X., ve Poon, C. S.** (2018). Use of waste glass in alkali activated cement mortar. *Construction and Building Materials*, 160, 399-407.
- Mahmoud, A. Sh., Hama, S. M., ve Ubeid, H. S.** (2019). *Some Mechanical and Thermal Properties of Concrete Incorporating Waste Glass Powder Subjected to Compression Load*.
- Malik, M. I., Bashir, M., Ahmad, S., Tariq, T., ve Chowdhary, U.** (2013). Study of concrete involving use of waste glass as partial replacement of fine aggregates. *IOSR Journal of Engineering*, 3(7), 8-13.

- Mehta, A., ve Ashish, D. K.** (2020). Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review. *Journal of Building Engineering*, 29, 100888.
- Mehta, A., ve Siddique, R.** (2018). Sustainable geopolymer concrete using ground granulated blast furnace slag and rice husk ash: Strength and permeability properties. *Journal of Cleaner Production*, 205, 49-57.
- Nadeem, M., ve Pophale, A.** (2013). Granular Slag-Potential Sustainable Material Alternative to Fine Aggregate in Construction Applications. *Gazi University Journal of Science*, 26(2), 269-278.
- Nahi, S., Leklou, N., Khelidj, A., Oudjit, M. N., ve Zenati, A.** (2020). Properties of cement pastes and mortars containing recycled green glass powder. *Construction and Building Materials*, 262, 120875. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120875>
- Ng, C., Alengaram, U. J., Wong, L. S., Mo, K. H., Jumaat, M. Z., ve Ramesh, S.** (2018). A review on microstructural study and compressive strength of geopolymer mortar, paste and concrete. *Construction and Building Materials*, 186, 550-576. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.075>
- Niveditha, M., ve Koniki, S.** (2020). Effect of Durability properties on Geopolymer concrete—A Review. *E3S Web of Conferences*, 184, 01092.
- Ogundairo, T. O., Adegoke, D. D., Akinwumi, I. I., ve Olofinnade, O. M.** (2019). Sustainable use of recycled waste glass as an alternative material for building construction—A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 640(1), 012073.
- Olivia, M., ve Nikraz, H.** (2013). Properties of fly ash geopolymer concrete in seawater environment. *Proceedings of the 13th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, EASEC 2013*.
- Orhan, E., ve Esen, Y.** (2017). Öğütülmüş atık Cam Tozu Katkılı Betonun Puzolanik Aktivitesi ve Yarmada Çekme Dayanımının Belirlenmesi. *Engineering Sciences*, 12(2), 108-116.
- Orhan, E., ve Şahin, M.** (2016). Öğütülmüş Atık Cam Tozu Katkılı Betonun Basınç Dayanımına Yüksek Sıcaklığın Etkisi. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5(1).
- Özcan, A.** (2018). *Ferrokrom cürufu ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların asit, tuz ve sülfat etkilerine karşı dayanıklılığının araştırılması* [Yüksek lisans tezi]. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Rodier, L., ve Savastano Jr, H.** (2018). Use of glass powder residue for the elaboration of eco-efficient cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 184, 333-341.
- Saha, S., ve Rajasekaran, C.** (2017). Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 146, 615-620.
- Sethi, H., Bansal, P. P., ve Sharma, R.** (2019). Effect of addition of GGBS and glass powder on the properties of geopolymer concrete. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 43(4), 607-617.

- Shehata, N., Ali, E. T. S., ve Abdelkareem, M. A.** (2020). Recent progress in environmentally friendly geopolymers: A review. *Science of The Total Environment*, 143166.
- Shi, C., ve Zheng, K.** (2007). A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(2), 234-247.
- Si, R., Dai, Q., Guo, S., ve Wang, J.** (2020). Mechanical property, nanopore structure and drying shrinkage of metakaolin-based geopolymer with waste glass powder. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118502.
- Singh, N. B., Saxena, S. K., Kumar, M., ve Rai, S.** (2019). Geopolymer cement: Synthesis, characterization, properties and applications. *Materials Today: Proceedings*, 15, 364-370.
- T.C. Milli Eğitim Bakanlığı.** (2012). Cam Analizleri. İçinde *Kimya Teknolojisi*.
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, ve TÜBİTAK-MAM.** (2019). *Cam ve Cam Ürünleri İmalatı Kaynak Verimliliği Rehberi*.
- Thamilselvi, P., Siva, A., ve Oyejobi, D.** (2017). Geopolymer concrete: Overview. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, 8(6), 10-14.
- Topal, Ö.** (2020). *Yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların yangın dayanımına geri dönüştürülmüş agreganın etkisinin araştırılması* [Yüksek lisans tezi]. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Tuyan, M., Boyacı, O., Andiç-Çakır, Ö., ve Ramyar, K.** (2017, Nisan 13). *Uçucu kül esaslı geopolimer betonların mekanik özellik ve yüksek sıcaklık dirençlerinin araştırılması*.
- Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği.** (2012). *Türkiye Cam ve Cam Ürünleri Sanayi Meclisi Sektör Raporu* (s. 72). Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği.
- Ubeid, H. S., Hama, S. M., ve Mahmoud, A. S.** (2020). Mechanical Properties, Energy Impact Capacity and Bond Resistance of concrete incorporating waste glass powder. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 745(1), 012111.
- Uzun, M., Çöğürçü, M. T., ve Keskin, Ü. S.** (2018). Cam Tozunun Beton Basın Dayanımına Etkisi. *Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(2), 42-51.
- Vijayakumar, G., Vishaliny, H., ve Govindarajulu, D.** (2013). Studies on glass powder as partial replacement of cement in concrete production. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(2), 153-157.
- Yassen, M. M., Hama, S. M., ve Mahmoud, A. S.** (2018). Reusing of glass wastes as Powder as partial of cement in Production of Concrete. *2018 11th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*, 330-334.
- Yazıcıoğlu, S., Tuğla, R. K., Demirel, B., ve Ay, S.** (2019). Determination of Mechanical Properties of the Concrete Affected by High Temperature by Destructive and Non-Destructive Test Methods. *Turkish Journal of Science and Technology*, 14(2), 91-99.

- Yüksel, C.** (2009). *Atık cam agregasının beton özelliklerine etkisi* [Yüksek lisans tezi]. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Zakka, W. P., Lim, N. H. A. S., ve Khun, M. C.** (2020). A scientometric review of geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 124353.
- Zerfu, K., ve Ekaputri, J. J.** (2016). Review on alkali-activated fly ash based geopolymer concrete. *Materials Science Forum*, 841, 162-169.
- Zhang, H., Li, L., Yuan, C., Wang, Q., Sarker, P. K., ve 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.
- Zhang, Y., Xiao, R., Jiang, X., Li, W., Zhu, X., ve Huang, B.** (2020). Effect of particle size and curing temperature on mechanical and microstructural properties of waste glass-slag-based and waste glass-fly ash-based geopolymers. *Journal of Cleaner Production*, 273, 122970.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Aslıhan Nida DERİNPINAR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR:

- **Derinpınar, A.N., Karakoç, M.B., Özcan, A., (2021, June)** Effect of Glass Powder Substitution of Compressive Strength and Sorptivity of GGBS Based Geopolymer Concrete., International Congress on the Phenomenological Aspects of Civil Engineering, (PACE) (pp. 425-428).