

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

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KULLANILARAK ÜRETİLEN GEOPOLİMER
BETONLARIN YANGIN DAYANIMINA GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ
AGREGANIN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özge TOPAL

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

MART 2020

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

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KULLANILARAK ÜRETİLEN GEOPOLİMER
BETONLARIN YANGIN DAYANIMINA GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ
AGREGANIN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özge TOPAL

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

MART 2020

İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KULLANILARAK ÜRETİLEN GEOPOLİMER
BETONLARIN YANGIN DAYANIMINA GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ
AGREGANIN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

DANIŞMAN

Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

HAZIRLAYAN

Özge TOPAL

Jürimiz tarafından 13/03/2020 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda bu tez oybirliği /oyçokluğu ile başarılı bulunarak İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Tezi olarak kabul etmiştir.

Jüri Üyelerinin Unvanı Adı Soyadı

1. Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ
İnönü Üniversitesi, Müh. Fak., İnşaat Müh. Bölümü
2. Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN
İnönü Üniversitesi, Müh. Fak., İnşaat Müh. Bölümü
3. Doç. Dr. Mehmet KARATAŞ
Fırat Üniversitesi, Müh. Fak., İnşaat Müh. Bölümü

İmza

.....
.....
.....

O N A Y

Bu tez, İnönü Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca yukarıdaki jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun .../.../20... tarih ve 20.../..... sayılı Kararıyla da uygun görülmüştür.

Prof. Dr. Kazım TÜRK

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEŞEKKÜR

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

Çalışmama FYL-2018-1575 numaralı proje ile maddi destek sağlayan İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi'ne,

Çalışmama yardımcı olan Sayın Araş. Gör. Ahmet ÖZCAN, Sayın İnş. Müh. Ayşe İlayda UĞURLU ve laboratuvar sorumlusu Sayın İlhami BAYSAL'a

teşekkür ederim.

Ayrıca hayatımın her aşamasında olduğu gibi, yüksek lisans eğitimim boyunca da maddi ve manevi olarak bana destek olan aileme çok teşekkür eder, bu tez çalışmasının literatüre katkı sunmasını dilerim.

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların yangın dayanımına geri dönüştürülmüş agreganın etkisinin 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.

Özge TOPAL



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	iv
ONUR SÖZÜ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1.Geopolimer	3
2.1.1.Geopolimerlerin çevresel açıdan etkisi	5
2.1.2. Geopolimer Beton	7
2.2.Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik	10
2.2.1. Geri dönüştürülmüş agrega	10
2.3.Yüksek Sıcaklığın Betona Etkisi	15
2.4.Yüksek Fırın Cürufu (YFC).....	27
2.5.Alkali Aktivasyon Çözeltileri	28
3. MATERYAL ve YÖNTEM	32
3.1. Materyal	32
3.1.1. Yüksek fırın cürufu ve özellikleri	32
3.1.2.Agrega	32
3.1.3.Aktivatörler	32
3.1.4.Aletler.....	34
3.1.4.1.Elekler	34
3.1.4.2. Çelik kalıplar	34
3.1.4.3.Beton karıştırma mikseri	34
3.1.4.4.Çeneli Kırıcı	35
3.1.4.5. Etüv	36
3.1.4.6. Hassas terazi.....	36
3.1.4.7. Ultrases geçiş hızı (UPV) ölçüm cihazı	37
3.1.4.8. Basınç dayanım cihazı.....	37

3.1.4.9. Yüksek sıcaklık fırını	38
3.2. Yöntem.....	39
3.2.1. Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler.....	39
3.2.2. Geopolimer beton karışım oranlarının belirlenmesi.....	40
3.2.3. Geopolimer beton üretilmesi, numunelerin bakımı ve kür edilmesi.....	41
3.2.4. Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler.....	42
3.2.4.1. Basınç dayanımı	42
3.2.4.2. Su emme oranı tayini.....	43
3.2.4.3. Ultrases geçiş hızının (UPV) belirlenmesi	43
3.2.4.4. Ağırlık kaybı	44
3.2.4.5. Kılcal geçirimsizlik deneyi.....	44
3.2.4.6. Yangın dayanımı	45
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	48
4.1. Agrega Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma	48
4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma.....	49
4.2.1. Geopolimer beton kontrol numunelerin basınç dayanımı	49
4.2.2. Geopolimer beton kontrol numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri	51
4.2.3. Geopolimer beton kontrol numunelerde kılcal geçirimsizlik.....	52
4.2.4. Geopolimer beton kontrol numunelerin su emme oranı.....	54
4.2.5. Geopolimer beton numunelerin yangın sonrası basınç dayanımı	55
4.2.6. Geopolimer beton numunelerde yangın sonrası UPV ölçüm değerleri.....	61
4.2.7. Geopolimer beton numunelerin yangın sonrası su emme oranı.....	64
4.2.8. Geopolimer beton numunelerde yangın sonrası kılcal geçirimsizlik	66
4.2.9. Geopolimer beton numunelerde yangın sonrası ağırlık kaybı	71
4.2.10. Geopolimer beton numunelerde yangın sonrası görsel incelemeler	76
4.3. Mikro Yapı Analizi.....	80
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	84
6. KAYNAKLAR.....	86
ÖZGEÇMİŞ	93

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Kullanılan yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi.....	32
Çizelge 3.2. Sodyum hidroksit ve sodyum silikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	33
Çizelge 3.3. Geopolimer karışımlarda kullanılan malzeme miktarları (1 m ³ geopolimer beton için).....	40
Çizelge 4.1. Doğal agreganın özgül ağırlık ve su emme oranı.....	48
Çizelge 4.2. Geri dönüştürülmüş agreganın özgül ağırlık ve su emme oranı	48
Çizelge 4. 3. Geopolimer kontrol numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri	49
Çizelge 4. 4. Geopolimer kontrol numunelerin 28 günlük kürün ardından UPV ölçüm değerleri.....	52
Çizelge 4. 5. Geopolimer beton kontrol numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri	53
Çizelge 4. 6. Kontrol numunelerin su emme oranları	54
Çizelge 4. 7. Yangın sonrası havada soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri.....	56
Çizelge 4. 8. Yangın sonrası suda soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri.....	57
Çizelge 4. 9. Yangın sonrası fırında soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri.....	58
Çizelge 4. 10. Yangın sonrası havada soğumaya bırakılan numunelerin UPV ölçüm değerleri.....	61
Çizelge 4. 11. Yangın sonrası suda soğumaya bırakılan numunelerin UPV ölçüm değerleri	62
Çizelge 4. 12. Yangın sonrası fırında soğumaya bırakılan numunelerin UPV ölçüm değerleri.....	63
Çizelge 4. 13. Geopolimer numunelerde yangın sonrası su emme oranı	65
Çizelge 4. 14. Numunelerin yangın sonrası kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri.....	67
Çizelge 4. 15. Havada soğumaya bırakılan numunelerin yangın sonrası ağırlık kaybı	71
Çizelge 4. 16. Suda soğumaya bırakılan numunelerin yangın sonrası ağırlık kaybı.....	72
Çizelge 4. 17. Fırında soğumaya bırakılan numunelerin yangın sonrası ağırlık kaybı.....	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1. Sıcaklığın artması ile çimento hamurunun basınç dayanımındaki değişim.....	16
Şekil 2. 2. Yüksek fırının şematik gösterimi	28
Şekil 2. 3. O ₂ 'nin demir oksitten ayrıştırılması	28
Şekil 2. 4. Demir cevherinden SiO ₂ 'nin uzaklaştırılması.....	28
Şekil 3. 1. Geri dönüştürülmüş agrega	33
Şekil 3. 2. Doğal agrega	33
Şekil 3. 3. Çelik kalıplar.....	34
Şekil 3. 4. Beton karışım mikseri	35
Şekil 3. 5. Çeneli kırıcı.....	35
Şekil 3. 6. Etüv	36
Şekil 3.7. Hassas terazi.....	37
Şekil 3.8. UPV ölçüm aleti.....	37
Şekil 3. 9. Basınç dayanım cihazı.....	38
Şekil 3.10. Yüksek sıcaklık fırını	38
Şekil 3.11. Numunelerin kür edilmesi.....	41
Şekil 3.12. Geopolimer numuneler	42
Şekil 3.13. Kılcal geçirimsizlik deneyi düzeneğindeki numuneler	45
Şekil 3. 14. Havada soğumaya bırakılan numuneler	46
Şekil 3. 15. Suda soğumaya bırakılan numuneler	46
Şekil 3.16. Fırında soğumaya bırakılan numuneler.....	47
Şekil 4. 1. Geopolimer kontrol numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri.....	50
Şekil 4. 2. Geopolimer kontrol numunelerin 28 günlük kür sonrası UPV ölçüm değerleri.....	52
Şekil 4.3. Farklı oranlarda geri dönüştürülmüş agrega içeren karışımlarda zamana bağlı kılcal geçirimsizlik katsayısının değişimi.....	53
Şekil 4. 4. Kontrol numunelerin su emme oranları.....	54
Şekil 4. 5. Yangın sonrası havada soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri.....	56
Şekil 4. 6. Yangın sonrası suda soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri.....	57
Şekil 4. 7. Yangın sonrası fırında soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri.....	59
Şekil 4. 8. 800°C'lik sıcaklıktan sonra suda soğumaya bırakılan numunelerin görünümleri.....	60
Şekil 4. 9. Yangın sonrası havada soğumaya bırakılan numunelerin UPV ölçüm değerleri.....	62

Şekil 4. 10. Yangın sonrası suda soğumaya bırakılan numunelerin UPV ölçüm değerleri	63
Şekil 4. 11. Yangın sonrası fırında soğumaya bırakılan numunelerin UPV ölçüm değerleri.....	64
Şekil 4. 12. Geopolimer numunelerde yangın sonrası su emme oranı.....	65
Şekil 4. 13. 5 dakikalık ölçüm için, 5 farklı geopolimer karışım tipinin sıcaklığa bağlı olarak kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.....	68
Şekil 4. 14. 15 dakikalık ölçüm için, 5 farklı geopolimer karışım tipinin sıcaklığa bağlı olarak kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim	68
Şekil 4. 15. 30 dakikalık ölçüm için, 5 farklı geopolimer karışım tipinin sıcaklığa bağlı olarak kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.....	69
Şekil 4. 16. 60 dakikalık ölçüm için, 5 farklı geopolimer karışım tipinin sıcaklığa bağlı olarak kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.....	69
Şekil 4. 17. 1440 dakikalık ölçüm için, 5 farklı geopolimer karışım tipinin sıcaklığa bağlı olarak kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.....	70
Şekil 4. 18. 800°C sonrası kılcal geçirimlilik deneyi uygulanan numunelerin görünüşleri.....	70
Şekil 4. 19. Havada soğumaya bırakılan numunelerin yangın sonrası ağırlık kaybı.....	72
Şekil 4. 20. Suda soğumaya bırakılan numunelerin yangın sonrası ağırlık kaybı.....	73
Şekil 4. 21. Fırında soğumaya bırakılan numunelerin yangın sonrası ağırlık kaybı.....	74
Şekil 4. 22. 23°C'lik ortam sıcaklığında bekletilmiş numunelerin görünüşleri.....	76
Şekil 4. 23. 100°C'lik sıcaklıktan sonra numunelerin görünüşleri.....	77
Şekil 4. 24. 200°C'lik sıcaklıktan sonra numunelerin görünüşleri.....	77
Şekil 4. 25. 400°C'lik sıcaklıktan sonra numunelerin görünüşleri.....	78
Şekil 4. 26. 600°C'lik sıcaklıktan sonra numunelerin görünüşleri.....	78
Şekil 4. 27. 800°C'lik sıcaklıktan sonra numunelerin görünüşleri.....	79
Şekil 4. 28. 23°C'lik ortamda bekletilmiş geopolimer numuneler.....	80
Şekil 4. 29. 100°C'lik sıcaklık sonrası geopolimer numuneler.....	81
Şekil 4. 30. 400°C'lik sıcaklık sonrası geopolimer numuneler.....	81
Şekil 4. 31. 600°C'lik sıcaklık sonrası geopolimer numuneler.....	82
Şekil 4. 32. 800°C'lik sıcaklık sonrası geopolimer numuneler.....	82

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials
BFS	: Blast furnace slag
CaO	: Kalsiyum oksit
CH	: Kalsiyum hidroksit
K	: Potasyum
K₂SiO₃	: Potasyum silikat
KOH	: Potasyum hidroksit
Na	: Sodyum
Na₂O	: Sodyum oksit
Na₂SiO₃	: Sodyum silikat
NaOH	: Sodyum hidroksit
PÇ	: Portland çimentosu
PVA	: Polivinilalkol lifi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SiO₂	: Silisyum oksit
TS	: Türk Standartları
UK	: Uçucu kül
UPV	: Ultrases geçiş hızı
XRD	: X ışını kırınımı
YFC	: Yüksek fırın cürufu

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KULLANILARAK ÜRETİLEN GEOPOLİMER BETONLARIN YANGIN DAYANIMINA GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ AGREGANIN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Özge TOPAL

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

96 + xii sayfa

2020

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

Bu çalışmada bağlayıcı malzeme olarak kullanılan yüksek fırın cürufu (YFC) alkali aktivatörlerle (Na_2SiO_3 ve NaOH) aktive edilerek geopolimer beton numuneler üretilmiştir. Üretilen bu geopolimer betonların yangın dayanıklılığına geri dönüştürülmüş beton agregalarının etkisini incelemek amacıyla geri dönüştürülmüş agrega içeriği %0, %25, %50, %75 ve %100 olmak üzere 5 grup geopolimer karışım hazırlanmıştır. Geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları, ultrases geçiş hızları (UPV), su emme oranı, kılcal geçirimsizlik ve ağırlık değişimi gibi çeşitli özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar görsel inceleme ve mikro yapı analizi ile desteklenmiştir. Elde edilen bu değerler yüksek sıcaklıklara (100, 200, 400, 600 ve 800°C) maruz bırakılan numunelerin deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca üç farklı (havada, suda, fırında) soğutma şekli uygulanmıştır. Deney sonuçları, oda sıcaklığında ve yangın sonrasında geopolimer beton numunelere geri dönüştürülmüş agrega eklemenin, numunelerin basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızını azalttığını, su emme oranı, kılcal geçirimsizlik katsayısı ve ağırlık değişimini ise artırdığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer beton, yangın etkisi, geri dönüştürülmüş agrega, yüksek fırın cürufu, geçirimsizlik

ABSTRACT

Master of Science Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF RECYCLED AGGREGATE TO FIRE RESISTANCE OF GEOPOLIMER CONCRETE PRODUCED BY USING BLAST FURNACE SLAG

Özge TOPAL

Inönü University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

96 + xii pages

2020

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

In this study, geopolymer concrete samples were produced by used blast furnace slag (BFS) activating with alkali activators (Na_2SiO_3 and NaOH) as binder. In order to examine the effect of the recycled concrete aggregates on the fire resistance of these produced geopolymer concretes, 5 groups of geopolymer concrete mixes with recycled aggregate content of 0%, 25%, 50%, 75% and 100% were prepared. Various properties of geopolymer concrete samples such as compressive strength, ultrasonic pulse velocity (UPV), water absorption rate, capillary permeability and weight change have been examined. The results were supported by visual inspection and microstructure analysis. These values were compared with the test results of samples exposed to high temperatures (100, 200, 400, 600 and 800°C). In addition, three different types of cooling (air, water, oven) have been applied. The experimental results showed that adding recycled concrete aggregate to geopolymer concrete samples at room temperature and after fire reduces compressive strength and UPV values of the samples, and increases the water absorption rate, capillary permeability coefficient and weight change.

Keywords: Geopolymer concrete, fire effect, recycled aggregate, blast furnace slag, permeability

1. GİRİŞ

Beton düşük maliyet, yüksek dayanıklılık, kolay şekil verilebilmesi gibi nedenlerle dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Betonun bileşenleri arasında olan, portland çimentosu (PÇ), agregaları birbirine bağlayan ana bileşendir. Ancak, portland çimentosunun üretim prosesi çok fazla enerji gerektiren bir süreçtir ve bu süreç küresel ısınmanın temel nedeni olan sera etkisini, atmosfere % 5'lik CO₂ salınımı yaparak daha da arttırmaktadır. Bir başka hipotez ise şöyledir; bir ton PÇ üretilmesi yaklaşık bir ton CO₂ gazının atmosfere salınması demektir (Malhotra ve Mehta, 2002).

Küresel nüfus ve kentleşmenin artması nedeniyle, yakın gelecekte inşaat artan beton kullanımı kaçınılmaz olacaktır. Bu endişe beton için sürdürülebilir bir çözüm olarak daha az PÇ bağlayıcı kullanımına yol açmıştır. Yıllık beton kullanımı arttığından, doğal agregaların ekstraksiyonu doğal ekosistemi olumsuz yönde etkilemektedir. Öte yandan, inşaat ve yıkım atıklarının bertaraf edilmesi, aynı zamanda doğal agrega ve minerallere olan mevcut bağımlılığı azaltmak ve mevcut atık depolama alanı sorununa pratik çözüm getirilmesi açısından bir araç olarak, dünya çapında birçok araştırmacıya, yeni geri dönüşüm araçlarını araştırmaya iten önemli bir çevresel sorun haline gelmektedir (Kou vd., 2012; Tabsh ve Abdelfatah, 2009; Zaharieva vd., 2003).

Bu çalışmanın amacı, alkali aktivatörlerle birlikte yüksek fırın cürufu (YFC) aktif hale getirilerek ve geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak üretilen geopolimer beton numunelerin dayanım, geçirimsizlik ve yangına dayanıklılık değerlerini tespit etmektir. Bu çalışmayla elde edilecek olan bulgularla hem sürdürülebilir, çevre dostu bir beton üretmek hem de betonun yüksek sıcaklık maruziyetine karşı göstereceği performansın iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Kaynakların verimli kullanılmasına, atıkların geri kazanımına yönelik bir çalışmadır. Yeni projelerin üretilmesine temel oluşturabilme özelliğine sahiptir. Araştırma ile atık malzemeler değerlendirilmek suretiyle çevre kirliliğinin azaltılması amaçlanmaktadır. Bu projede YFC'nin bağlayıcı madde yapımında kullanılmasıyla literatüre katkı sağlayacağı beklenmektedir.

Bu çalışmada bağlayıcı malzeme olarak YFC, hazırlanan geopolimer karışımları aktif hale getirmek için sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltileri kullanılmıştır. Geopolimer betonda kullanılan YFC dozajı 400 kg/m³, silis modülü 1.5, su/bağlayıcı oranı 0.43, NaOH çözeltisi konsantrasyonu 10 molar olarak belirlenmiştir. Agregalar olarak, doğal agrega ve geri dönüştürülmüş agrega olmak üzere iki çeşit agrega kıyaslamalı olarak kullanılmıştır.

Geri dönüştürülmüş agregalar ağırlıkça %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında doğal agrega yerine ikame edilecek şekilde toplamda 5 adet geopolimer karışım hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlarda hacimce iri agrega yüzdesi %40, ince agrega yüzdesi %60 olarak belirlenmiştir. Geopolimer karışımları yerleştirmek üzere 50x50x50 mm boyutlarında çelik kalıplar kullanılmıştır. Beton karıştırma mikserinde döküme hazır hale getirilen geopolimer beton karışımları çelik kalıplara yerleştirilip, alüminyum folyo ile kalıplar sarılmıştır. Kalıplar ilk önce 80°C'lik fırın kürüne tabi tutulmak üzere 24 saat süreyle etüvde bekletilmiştir. Daha sonra kalıptan çıkarılan numuneler 23±1°C sıcaklığa ayarlanmış kirece doygun suda 27 gün bekletilmek üzere kür edilmiştir. 28. gün sudan çıkarılan numuneler yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmadan önce 23°C'lik referans sıcaklığındaki özelliklerin belirlenmesi amacıyla numunelerin basınç dayanımı, UPV, kılcal geçirimsizlik ve su emme oranı değerlerini elde etmek üzere deneyler yapılmıştır. Yapılan her deney sonucu karışımlardaki %0, %25, %50, %75 ve %100 oranında değişen geri dönüştürülmüş agregalar açısından karşılaştırılarak incelenmiştir. Ardından numuneler sırasıyla 100, 200, 400, 600 ve 800°C'lik yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. 23°C referans sıcaklığında numunelere uygulanan deneyler yüksek sıcaklık sonrasında da uygulanarak elde edilen deneysel sonuçlar referans sıcaklığındaki değerler ile karşılaştırılmıştır. Yüksek sıcaklık sonrasında ortaya çıkan deneysel veriler hem numunelerin içerdiği geri dönüştürülmüş agrega oranına bağlı olarak hem de yüksek sıcaklığın numunelerde meydana getirdiği değişiklikler bağlamında ele alınarak incelenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Geopolimer

Portland çimentosu bağlayıcılı beton, inşaat sektöründe en çok kullanılan malzemedir. Portland çimentosu (PÇ) üretimi sırasında fosil yakıtın yanması ve kireçtaşının kalsinasyonu nedeniyle oluşan CO₂, NO₂ ve SO₂ gibi zararlı gazlar ve çeşitli tozlar atmosfere deşarj olmaktadır. PÇ üretimi, çevresel etkilerinin yanı sıra çelik ve alüminyumdan sonra kayda değer miktarda enerji gerektiren aşamalar içerir (Antoni ve Hardjito, 2015).

Geopolimerler, endüstriyel yan ürünlerden elde edilip beton için geliştirilmiş olan alternatif bağlayıcılardır. Geopolimer bağlayıcı, alkali bir sıvının genelde sodyum silikat (Na₂SiO₃) ve sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisinin bir karışımının, uçucu kül (UK), YFC ve metakaolin gibi silis ve alüminyum açısından zengin endüstriyel atık malzemelerle reaksiyonu sonucu üretilir (Kong ve Sanjayan, 2010; Fernandez-Jimenez ve Palomo, 2006; Van Deventer vd.,2006; Neupane vd.,2014).

Çevre dostu ve inorganik polimer olan geopolimerler alüminosilikat içeren malzemelerin oda sıcaklığı veya biraz daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen alkalın aktivasyonunun ürünü olan amorf veya yarı kristalli bağlayıcılardır (Luna-Galiano vd., 2016).

Kömür yakıtlı elektrik santralleri tarafından üretilen fazla miktarda uçucu kül, beton üretiminden kaynaklı karbon ayak izini en aza indirmek için geopolimer üretiminde verimli bir şekilde kullanılabilir. Granüle YFC dünya çapında bol miktarda bulunan bir başka atık maddedir ve metalurji endüstrisinin bir yan ürünü olan bir malzemedir. Granüle cürufun geopolimer betonda çimento yerine bağlayıcı malzeme olarak kullanılması CO₂ emisyonunu azaltmaktadır (Bakharev vd.,2001). Geopolimerizasyon işlemi esnasında, alümino-silikat kaynaklı malzemeler ile alkali polisialatları arasında geliştirilen reaksiyon, -Si-O-Al-O- bağından oluşan 3-D polimerik zincirli ve halka-benzeri yapının gelişmesine neden olur (Duxon vd.,2007; Divya ve Rubina, 2007).

Alkalın çözeltisinde kolayca çözünebilen herhangi bir puzolanik bileşik veya silikat ve alüminat içerikli materyal, bir geopolimer öncü türünün kaynağı olarak görev yapar ve böylece kendi geopolimerizasyonunu sağlamış olur (Xu ve Van Deventer, 2000).

Bir alkali bileşen aktivatör, periyodik tablodaki birinci grup elementini içeren bir bileşiktir, bu yüzden bu malzemeye alkali aktif alümino-silikat bağlayıcılar veya alkali aktif

çimentolu malzeme de denir (Xiong vd., 2004). Silisyum ve alüminyum atomları, doğal kayaları oluşturan moleküllerle kimyasal ve yapısal olarak karşılaştırılabilir düzeyde moleküller oluşturmak üzere reaksiyona girerler (Hermann vd., 1999). İnorganik polimerik malzeme, jeolojik feldispatların amorf bir eşdeğeri olarak kabul edilebilir, ancak termoset organik polimerlere benzer bir şekilde sentezlenebilir. O nedenle, bu malzemeler “organik polimerler” olarak adlandırılır (Hos ve McCormick, 2002).

Geopolimer malzeme, fazla miktarda atık malzemenin dengelenmesi açısından basit endüstriyel uygulamalar ışığında cazip bir seçenek sunar (Hermann vd.,1999).

1978'den önce incelenen literatür ve patentler, bu mineral kimyasını bir mineral polimerinin geliştirilmesi için kullanma fikrinin tamamen ihmal edildiğini göstermiştir. İlkel malzemelerin kimyasal bileşiminin bir fonksiyonu olarak, alkali çimentolar iki gruba ayrılır:

- Alkali çözelti ile aktive edildiğinde kalsiyum silisyum hidrat (C-S-H) jeli üreten YFC gibi kalsiyum bakımından zengin malzemelerden sentezlenen bağlayıcılar.
- Sentezlenen malzeme geri çekilmesi kalsiyum oranı silikat ve alüminat açısından zengin olan metakaolin gibi malzemeler. Alkali çözelti ile aktive edildiğinde bu malzemeler, amorf bir yapı (alkali alüminosilikat) oluştururlar, uygulanan sıcaklık küründen sonra ise erken yaşlarda yüksek mekanik dayanım kazanırlar (Alonso ve Palomo, 2001).
- Bu malzemeler yapısal bütünlüğü elde etmek için tamamen farklı reaksiyon süreci izledikleri için normal portland çimentosundan büyük ölçüde farklılık gösterirler. Puzolanik çimento, matris oluşumu için kalsiyum-silikat-hidratın (C-S-H) varlığına ve geopolimerlerin silikat ve alüminat öncüllerinin polimerizasyonu sonucu yapısal mukavemeti elde etmek için yüksek bir alkali içeriğini kullandığı bu matrisin dayanımına bağlı olarak elde edilmektedir (Van Jaarsveld vd., 2002).

Geopolimerizasyon, Purdon tarafından rastlantısal olarak keşfedilen alkaliyle aktifleştirilmiş inorganik bağlayıcıların kimyasına dayanmaktadır (Van Jaarsveld vd.,1998)

Yapılan bir çalışmada, silikon ve/veya alüminyum içeren çeşitli mineraller ve camlar üzerinde NaOH etkisi incelenmiş ve iki adımda özetlenmiştir:

1. silikat, alüminat ve kireç salınımı,
2. NaOH çözeltisinin yenilenmesinin yanı sıra hidratasyon sonucu kalsiyum silikatların ve alüminatların oluşumu.

Sonuç olarak, alkaliyle aktive edilmiş alümino-silikat bağlayıcısının sertleşme mekanizmasının, NaOH varlığında Si veya Al'nin çözünmesini içerdiği ve yeniden NaOH üretilmesiyle kalsiyum silikat veya alüminat olarak oluştuğu belirlenmiştir (Davidovits ve Sawyer, 1985).

Uçucu kül, geopolimer için önemli kaynak malzemelerden biridir. UK, toz haline getirilmiş kömürün elektrik santrallerinde yakılması ile açığa çıkan ince bölünmüş partiküllerden oluşur. Kimyasal bileşimi kömürün inorganik kısmının mineral bileşimine bağlı olarak değişir. İçerdiği silikat miktarı genellikle %40-60 arasındadır ve alüminat içeriği ise %20 ile %30 arasında değişir. Demir içeriği oldukça değişkenlik gösterebilir. CaO içeriği %20'den büyük olduğunda, çimentolu malzeme olarak sınıflandırılır. CaO içeriği %10-20 arasında değiştiğinde, çimentolu ve puzolanik malzeme olarak sınıflandırılır. Bir puzolanik malzemeye güç kazandıran yani puzolanik aktiviteyi sağlayan ürünler oluşturmak için ortamda kalsiyum hidroksit (CH) bulunması gerekir. Genellikle, bu malzemelerdeki CaO içeriği puzolanik reaksiyon için yeterli değildir. Bu yüzden, hidratasyonu sonucu CH oluşan PÇ ile birlikte kullanılırlar (Papadakis ,2000; Moropoulou vd., 2004).

Geopolimerizasyon için, reaksiyona giren malzemedeki silisyum ve alüminyum atomlarının çözünüp geopolimer hamurun oluşması için alkali aktivasyon çözeltileri kullanılır (Hardjito vd., 2004).

2.1.1.Geopolimerlerin çevresel açıdan etkisi

Beton endüstrisinin de küresel ısınmaya katkıda bulunan temel faktörler arasında yer aldığı düşünülmektedir. Bu durum bağlayıcı malzeme olarak PÇ kullanımıyla ilişkilidir. Çimento üretiminin, 2014 yılı üretim verilerine dayanarak küresel anlamda CO₂ emisyonunun yaklaşık %8'inden sorumlu olduğu anlaşılmaktadır (Olivier vd., 2015).

Yaklaşık 10 yıl öncesine kadar, bir dizi çimento karışımının çevresel sürdürülebilirliği karşılaştırmalı olarak incelenmemiş ve alternatif çimentoların PÇ'nin tamamen yerini alma potansiyeli hakkında kapsamlı bir analiz yapılmamıştır (Imbabi vd., 2012).

Günümüz teknolojisinde ise beton endüstrisinin çevresel etkilerini azaltmak amacıyla, PÇ'ye alternatif bulma çabaları hızlı bir şekilde sürmektedir. Alümino-silikat kaynaklı

materyalleri (metakaolin, uçucu kül ve cüruf gibi) aktive eden alkalın çözeltisi ile türetilen yeni çevre dostu inorganik bağlayıcı olan geopolimer, son yıllarda PÇ için pratik bir alternatif olarak büyük ilgi görmüştür (Shaikh,2013; Davidovits ,1989; Duxson vd.,2007; Bernal vd.,2011).

PÇ üretimi sırasında kireçtaşının 1500°C'deki fırında kil ile kalsine edilerek üretilmesiyle oluşan klinker genellikle "CO₂ eşdeğeri" bazen de "gömülü karbon" olarak adlandırılan önemli bir sera gazı emisyonu kaynağıdır (Salas vd., 2016). Mevcut uygulamalarla üretilen her ton çimento için yaklaşık 900 kg CO₂ eşdeğeri serbest bırakılır (Hasanbeigi vd., 2010).

Klinker üretimi sırasında doğrudan kalsinasyondan oluşan CO₂ emisyonu, çimento üretiminden kaynaklanan emisyonların %50'sinden sorumludur. Kalan emisyonların çoğu, kalsinasyon için fosil yakıtların yakılmasından ve ayrıca hafriyat yani ham maddenin elde edilmesi, paketlenme ve öğütme işlemlerinden kaynaklanmaktadır. Tehlikeli iklim değişikliği etkilerini azaltmak amacıyla CO₂ emisyonlarını azaltmak anlamında küresel olarak çaba gösterilmesi gerekir (Hienola et al., 2017).

Klasik betona kıyasla geopolimer beton, gömülü enerji ve betonun karbonunu büyük ölçüde azaltmasının yanı sıra, uçucu kül ve cüruf dahil olmak üzere endüstriyel yan ürünlerden yararlanarak inşaat sektöründe sürdürülebilirliğin artırılmasına önemli katkı sağlayabilir. Ancak, geopolimer betonun çevre dostu-yeşil beton olarak nitelendirilmesinden önce geopolimer beton ile bağlantılı olanağın önemli çevresel etkilerin de derinlemesine araştırılması gerekmektedir. Örneğin, her gün üretilen devasa beton atık miktarıyla uğraşmak, son 30 yılda yapılan araştırmaların ana odağı olmuştur. Beton atıkları, dünya genelinde üretilen toplam atığın büyük bir kısmını teşkil etmektedir, hatta bazı ülkelerde toplam atık miktarının neredeyse %40'ı kadarını beton atıklar oluşturmaktadır (Coelho ve Brito,2012; Oikonomou, 2005).

Marie ve Quiasrawi (2012) yaptıkları çalışmada geri dönüştürülmüş beton agregalarının %20'lere varan oranında doğal agregaların yerine kullanılmasının doğal kaynakların ve çevrenin sürdürülebilirliğini koruduğunu ve kabul edilebilir kalitede beton üretimine izin verdiği sonucuna varmışlardır.

Turner ve Collins (2013) yaptıkları çalışmada, normal dayanımlı betonlar için sodyum silikat bazlı bir geopolimerin CO₂ ayak izinin PÇ ile üretilen betondan yaklaşık olarak %9 daha az miktarda olduğunu ortaya koymuşlardır.

Hienola vd., (2017) yaptıkları çalışmada, PÇ üretiminden gelen CO₂ emisyonunun esas olarak iki mekanizmayla oluştuğunu öne sürmüşlerdir. CO₂'nin %50'si doğrudan kalkerin kalsinasyonundan oluşmaktadır, kalan %35'i ortamdaki yakıt ve enerji tüketiminden kaynaklanmaktadır.

2.1.2. Geopolimer Beton

Geopolimer bağlayıcılar alümino-silikat içeriği yüksek olan malzemelerin inorganik polimer karışım elde etmek suretiyle alkali aktivatörler ile reaksiyonu sonucunda oluşan malzemelerdir. YFC, uçucu kül (UK) ve silis dumanı gibi sanayi atıkları hem kolay temin edilebilmeleri hem de düşük maliyetleri sayesinde alümino-silikat kaynağı olarak çokça kullanılmaktadır. Geopolimer bağlayıcılar içeriğinde başka endüstri atıklarının da kullanımıyla beraber PÇ'ye kıyasla çevreye yayılan CO₂ miktarını yaklaşık %80 oranında düşürebilme özelliğine sahiptirler (Castel ve Foster 2014).

Karakoç vd., (2014) yaptıkları çalışmada ferrokrom cürufu esaslı geopolimer hamur ve harçların çeşitli mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Karışımların silis modülü 0.50, 0.60 ve 0.70 olmak üzere üç farklı oranda tutulmuştur. Na₂O molaritesi ise %4, %7, %10 ve %12 olarak 4 farklı oranda belirlenmiştir. Alkali aktivatör olarak NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltileri kullanılmıştır. Geopolimer harç numunelere 60°C ve 80°C'lik sıcaklıkta 20 saat kürlemek üzere ve diğer harç numunelere ise laboratuvar ortamında kür etmek üzere farklı kür koşulları uygulanmıştır. Ayrıca harçların su/bağlayıcı oranı 0.30, 0.35 ve 0.40 olarak üç farklı şekilde belirlenmiştir. Üretilen geopolimer hamur numunelerin 28 günlük en yüksek basınç dayanımı Na₂O konsantrasyonu değeri %7 ve silis modülü 0.70 olan numunelerde elde edilmiştir. Geopolimer harçlar için 28 günlük en yüksek dayanım değerinin su/bağlayıcı oranı 0.3 olan ve laboratuvar koşullarında küre maruz bırakılan harçlarda meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca su/bağlayıcı oranındaki artışın numunelere olumsuz etki yaparak basınç dayanımını düşürdüğü sonucuna varılmıştır.

Khalaj vd., (2015) çelik liflerle güçlendirilmiş cüruf bazlı geopolimer kompozitler üretmişlerdir. Su kürü rejimi (3, 7 ve 14 gün), NaOH molaritesi (12, 14 ve 16 molar), alkali aktivasyon çözeltilisinin çimento ağırlığına oranı (0.24, 0.26 ve 0.28) ve çelik lifin ağırlıkça yüzdesini (%1, %3 ve %5) içeren dört ana parametre göz önüne alınarak deneyler yapılmıştır. En yüksek dayanım değeri 8.87±1.71 MPa olarak, 14 gün kür edilen, 14 molar NaOH konsantrasyonuna sahip, alkali aktivasyon çözeltilisinin çimento ağırlığına oranının

%0.24 olduğu ve ağırlıkça %5 oranında çelik lifin kullanıldığı numunelerde ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

Sarker ve Mcbeath (2015), yaptıkları çalışmada yangının, uçucu kül içerikli geopolimer beton üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bir çelik ağ tabakası içeren 125, 150 ve 175 mm kalınlığındaki geopolimer ve portland çimentolu beton panelleri iki saat boyunca yüksek sıcaklığa maruz bırakmışlardır. Deney sonucunda, geopolimer beton panellerde çatlama olmadığı ve yangında normal beton panellerinden daha az çatlak gözlemlendiği tespit edilmiştir. Eğilme dayanımları geopolimer için %61 ile %71 arasında olurken normal beton paneller için %50-53 arasında olmuştur. Böylece, güçlendirilmiş geopolimer beton elemanlar, normal beton emsallerine göre daha yüksek yangın dayanımı göstermiştir.

Al Majidi vd., (2017) yaptıkları çalışmada öğütülmüş YFC ve silis dumanı oranının lif takviyeli geopolimer beton özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çekme dayanımı, yüksek YFC içeriği ve normal miktarda silis dumanı kullanılarak önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Ayrıca, gelişmiş lif-matris arayüzey bağı SEM analizi ile doğrulanmıştır.

Mermerdaş vd., (2017), yaptıkları çalışmada agrega içeriğinin ve tane büyüklüğünün geopolimer harçların su emme oranı ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Bütün numuneler üretimden 24 saat sonra 90°C'lik sıcaklık kürü kalıplarından çıkartılmış ve deney gününe kadar 25°C sıcaklıktaki su içinde kür edilmiştir. Agrega olarak ezilmiş kireçtaşı ve doğal nehir kumu karşılaştırmalı şekilde kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak UK kullanılmıştır. Deney sonuçları, doğal kum içeren geopolimer harçların diğer harçlara oranla daha iyi akıcılık sağladığını göstermiştir. %50 doğal nehir kumu ve %50 kırılmış kireçtaşı içeren agregaların olduğu harçlar, diğer harçlara göre daha düşük su emme oranına sahip olmuştur. Agrega granülometrisindeki farklılıklar da, harçların akıcılığında farklı sonuçlar ortaya koymuştur. Tane çapı büyük olan agregaların kullanıldığı harçlarda özgül yüzey daha küçük olduğu için akıcılık daha fazla olmuştur. En yüksek basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı ezilmiş kireçtaşı kullanılan harçta elde edilmiştir.

Zhang vd., (2018), geopolimer betonun betonarme yapılarda yangın direnci açısından PÇ içeren normal betonun pratik bir alternatifi olabileceğini araştırmışlardır. Üretilen portland çimentolu numuneler 28 gün boyunca 22°C sıcaklıkta suda kür edilirken, geopolimer beton numuneler 7 gün süresince 22°C sıcaklıkta kür edilmiştir. Daha sonra 25°C'den başlayarak sırasıyla 100, 300, 500 ve 700°C olmak üzere tüm numuneler yüksek sıcaklığa maruz bırakılıp mekanik özellikleri incelenmiştir. Geopolimer numuneleri aktif hale getirmek için potasyum hidroksit (KOH) ve potasyum silikat (K_2SiO_3) çözeltileri kullanılmıştır. Deney

sonuçlarına göre, geopolimer betonun PÇ'li betona kıyasla hem ortam sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra daha iyi aderans özelliklerine sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, geopolimer beton 300°C sıcaklıklara maruz kalana kadar dikkate değer bir deformasyon göstermemişken, bu sıcaklığın üzerine çıkıldıkça ciddi aderans zayıflıkları gösterdiği gözlenmiştir.

Mehta ve Siddique (2018), yaptıkları çalışmada sürdürülebilir geopolimer beton üretimi açısından endüstriyel yan ürün olan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve pirinç kabuğu külü kullanımının etkisini araştırmışlardır. Üretilen numuneler 24 saat boyunca 80°C'lik fırın kürüne tabi tutulmuştur. Deney sonuçları, geleneksel çimento betonunun yerini alabilen ve böylece CO₂ salınımını azaltabilen, yaklaşık 60 MPa'lık 3 günlük yüksek basınç dayanımı ile granüle YFC ve pirinç kabuğu külü kullanarak geopolimer betonun gelişimini göstermektedir. Granüle YFC, yüksek kalsiyum içeriğine ve düşük silika okside sahipken, pirinç kabuğu külü yüksek silika oksit içeriğine sahiptir. Dolayısıyla daha fazla pirinç kabuğu külünün eklenmesi, içeriğindeki yüksek miktardaki silisyum oksit (SiO₂)'den ötürü hidrasyon reaksiyonlarının daha hızlı gerçekleşmesine ve beton özelliklerinin iyileşmesine katkıda bulunmuştur. Granüle YFC'nin temel bağlayıcı olarak kullanılıp, giderek azaltılan miktarının yerine ağırlıkça yaklaşık %15'lik pirinç kabuğu külü ekleninceye kadar; numunelerin basınç, yarmada çekme dayanımında artış ve kılcal geçirimsizlik durumunda ise azalış olduğu görülmüştür. Bu %15'lik optimum içeriğin ötesinde, pirinç kabuğu külü eklenmesi negatif sonuçlar göstermiştir.

Mucsi vd., (2018) yaptıkları çalışmada lif takviyeli geopolimer betonun çeşitli dayanıklılık parametrelerini (su emme yüzdesi, aşınma direnci, kimyasal saldırıya karşı direnç, ıslanma-kuruma etkisi ve klorür iyonlarına karşı direnç) araştırmışlardır. Sonuçlar lif takviyeli geopolimer betonun, klasik betona göre üstün dayanıklılık özelliklerine sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Portland çimentosu kullanılarak üretilen normal betonun dayanımı ile karşılaştırılabilir ölçüde bir dayanım elde etmek için, geopolimer betonun en az 6 saat süreyle 40°C ile 80°C arasında yüksek sıcaklıkta kür edilmesi gerekir (Duxson vd., 2007; Palomo vd., 1999; Hardjito vd., 2005).

2.2.Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik

Sürdürülebilirlik kavramı “daimi olma yeteneği” olarak isimlendirilir. Bu terim çevre biliminde ekolojinin, çeşitliliğinin ve sürekliliğinin sağlanması anlamına gelmektedir (Kerestecioğlu, 2001).

Bir ürünün elde edildiği ham maddesinden başlamak üzere bir hizmet ömrü vardır. Ayrıca ürünün öngörülen dayanıklılığını koruyabildiği bir durabilite ömrü de bulunmaktadır. Son aşama olarak da, kullanım ömrünü bitiren ürün, endüstride yeniden kullanılmak amacıyla geri dönüşüm işlemine maruz bırakılmalıdır (Penttala, 1997).

2.2.1. Geri dönüştürülmüş agrega

Agregalar beton yapısının yaklaşık %60-80'ini oluşturur ve bu nedenle betonun termal tepkisi üzerinde, agregalar büyük bir etkiye sahiptir. Örneğin; farklı agregalardan formüle edilmiş birkaç betonun termal deformasyonu karşılaştırılmıştır ve beton için ısıl genleşme katsayısının esas olarak agrega tipine bağlı olduğu görülmüştür (Piasta vd., 1984).

Agregaların mineralojisindeki potansiyel farklılıklara ek olarak; geri dönüştürülmüş beton agregaları, içerisinde bir önceki harcı ihtiva ederler ve böylece doğal agregalardan çok farklı özelliklere sahiptirler. Örneğin; daha gözenekli yapıdadırlar, daha yüksek su emme katsayısına sahiptirler ve hidratlar içerirler. Geri dönüştürülmüş agrega içeren betonlar, genel olarak iki kat daha fazla arayüzey geçiş bölgesine sahiptir. Çünkü geri dönüştürülmüş agregalar, harç ve orijinal agregaları birbirine bağlayan ara-yüzey bölgelerini içerir. Bu ara yüzey geçiş bölgeleri mekanik açıdan zayıf alanlar olarak bilinir (Behera vd., 2014).

Kullanılabilir agrega kaynaklarının giderek azalması, doğal çevrenin bozulmaya başlaması, çevre kirliliği sorunu ve kullanılabilir agrega eldesindeki yüksek maliyetler inşaat sektörünü farklı çözüm yolları bulmaya sevk etmiştir. Bu bağlamda, atık betonların kırılıp geri dönüştürülmüş beton agregası olarak kullanılması hem çevresel kirlenmeyi azaltmak hem de ülke ekonomisine katkıda bulunmak açısından önem arz etmektedir. Atık malzemeye ekonomik anlamda değer kazandırmak üzerinde durulan bir konudur. Ayrıca, yapılan araştırmalar inşaat sektöründeki malzeme temininin %50'sinin doğal kaynaklardan elde edildiğini belirtmektedir (Demirel ve Şimşek, 2014; Durmuş vd.,2009; Nik, 2005).

Atık betonların kırılması ile üretilen geri dönüştürülmüş agregalar ile yapılan araştırmalarda, agreganın kullanılabilirliğinin elde edilen atık betonun kalitesinden dikkate değer şekilde etkilendiği öne sürülmektedir. Örneğin; geri dönüştürülmüş agreganın çimento hamuru ile daha iyi aderans sağladığı, daha düşük yoğunluğa sahip olduğu, su emme yüzdesinin normal agregaya kıyasla daha yüksek olduğu belirtilmektedir. Buna ek olarak, geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak üretilen betonun mekanik özelliklerinin kırılan betonun dozajına, agregaların kalitesine, su/çimento oranına, betondaki poroziteye ve çimento hamurunun agrega ile arasındaki aderansa bağlı olduğu görülmektedir (Demirel ve Şimşek, 2014; Durmuş vd.,2009; Özturan,1988).

Birçok araştırmacı tarafından, geri dönüştürülmüş agreganın hem çevresel açıdan hem de ekonomik açıdan beton üretiminde doğal agregaya iyi bir alternatif agrega olabileceği tespit edilmiştir (Nuaklong vd., 2016).

Malešev vd., (2010) yaptıkları çalışmada betonun basınç ve çekme dayanımlarının esas olarak geri dönüştürülmüş agreganın kalitesine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Yeni beton üretiminde yüksek dayanımlı betonun kırılması ile elde edilen kaliteli agrega kullanılırsa, geri dönüştürülmüş agreganın doğal agrega ile hangi oranda ikame edildiğinin elde edilen betonun basınç dayanımı üzerinde negatif bir etkisi yoktur. Çünkü agregayı üretmek için kullanılan beton yüksek dayanımlıdır ve dolayısıyla da ortaya çıkan agrega dayanımı yüksek bir agrega çeşidi olur. Bu durum geri dönüştürülmüş agrega üretmek için kullanılacak ana beton özelliklerinin elde edilen betonun kalitesi üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Shaikh (2016), yaptığı çalışmada geri dönüştürülmüş agrega içeren geopolimer betonların bazı mekanik ve durabilite özelliklerini incelemiştir. %15, %30 ve %50 oranlarında doğal iri agregayla ikame edilmiş geri dönüştürülmüş agrega bulunduran geopolimer beton örnekleri hazırlanmıştır. Üretilen numuneler 24 saat süresince 60°C'de buharlı küre tabii tutulmuştur. Numunelerin basınç dayanımı, elastisite modülü, yarmada çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerinin yanı sıra klorür iyon penetrasyon derinliği, su emme oranı ve kılcal su emme gibi bazı fiziksel özellikleri de incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre %100 oranında doğal iri agrega kullanılarak üretilmiş olan betonun basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülü değerlerinin diğer numunelere oranla fazla olduğu tespit edilmiştir.

Nuaklong vd., (2016) geri dönüştürülmüş agregaların uçucu kül içerikli geopolimer beton özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Tüm örneklerde dere agregası ince agrega

olarak kullanılmıştır ve iri agrega olarak; ezilmiş kireçtaşı ile geri dönüştürülmüş beton agregası birbirinin yerine ikame edilmiştir. Alkali aktivatör olarak ise 8, 12 ve 16 molarlık farklı oranlarda sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi kullanılmıştır. Deneyden elde edilen bulgulara göre 12 ve 16 molarlık NaOH çözeltisinin kullanılması 8 molarlık NaOH çözeltisine oranla hem numunelerin dayanım değerlerinde hem de durabilite değerlerinde artış sağlamıştır. Ayrıca, geri dönüştürülmüş beton agregaları ile üretilen beton örneklerinin hem dayanım hem durabilite özelliklerinin, ezilmiş kireçtaşı ile hazırlanan numunelere oranla çok az bir farkla daha düşük çıktığı tespit edilmiştir.

Kathirvel ve Kaliyaperumal (2016), geri dönüştürülmüş beton agregalarının alkaliyle aktifleştirilmiş cüruf içeren betonun eğilme özelliklerine etkisini araştırmışlardır. İri agrega olarak doğal ve geri dönüştürülmüş agrega birbiriyle karşılaştırmalı şekilde kullanılmıştır. Hazırlanan karışımı aktifleştirmek için Na_2SiO_3 ve NaOH çözeltileri kullanılmıştır. Üretilen numuneler üzerinde eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına dayanarak, geri dönüştürülmüş agregaların betonun eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve diğer mekanik özellikleri üzerinde etkisi olduğu saptanmıştır.

Arulrajah vd., (2016) yaptıkları çalışmada geri dönüştürülmüş agregaların UK ve cüruf öncüllerini içeren geopolimerlerle stabilizasyonunu değerlendirmişlerdir. 8 M Na_2SiO_3 ve NaOH çözeltileri aktivatör olarak kullanılmıştır. Üretilen numunelerin elastisite modülü ve basınç dayanımı değerleri incelenmiştir. Deney sonuçları, geri dönüştürülmüş agrega kullanımının basınç dayanımı değerlerinde ve elastisite modülünde düşüşe neden olduğunu göstermiştir.

Topgül (2016) yaptığı çalışmada, hazırlanan beton karışımlarına farklı oranlarda ilave edilen doğal ve geri dönüştürülmüş agregaların taze ve sertleşmiş betona kazandırdığı özellikleri araştırmıştır. Mineral katkı olarak beton karışımına ilave edilen öğütülmüş granüle YFC ise %0, %15 ve %30 oranlarında çimento ile ikameli olarak kullanılmıştır. Bütün numuneler üretildikten 24 saat sonra kalıptan çıkartılmış ve deney gününe (7, 28 ve 90 gün) kadar $20\pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıkta kirece doymuş suda kür edilmiştir. Geri dönüştürülmüş agregaların doğal agregalara kıyasla, YFC'nin ise PÇ'ye kıyasla düşük özgül ağırlığı olmasından ötürü karışımdaki ikame oranı arttıkça taze ve sertleşmiş betonun yoğunluğunda azalma meydana geldiği görülmüştür. Geri dönüştürülmüş agrega ve YFC içeren beton karışımı örneklerinin, normal agrega içeren beton serisine göre daha az miktar da hava içeriğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Fakat işlenebilirlik değerlerinin geri

dönüştürülmüş agregalı beton karışımlarında az farkla da olsa daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Parthiban ve Mohan (2017), geri dönüştürülmüş agregaların alkali çözeltiyle aktifleştirilmiş cüruf içeren betonun çeşitli mühendislik ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Tüm numuneler oda sıcaklığında 26-30°C'lik sıcaklıkta ve % 55-71'lik bağıl nem aralığında kürlenip sertleştirilmiştir. YFC çimentonun yerine ikameli olarak kullanılmıştır. 14 molarlık sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve NaOH çözeltileri alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. İri agrega olarak parçalanmış beton atığı ve ezilmiş granit kıyaslamalı şekilde, ince agrega olarak ise kum kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre çökme değeri PÇ'li numuneler için için 120 mm, alkaliyle aktifleştirilmiş cüruf içerikli numuneler için ise, geri dönüştürülmüş agregalar ile doğal agregaların %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarındaki ikamesiyle çökme değerleri sırasıyla 117, 116, 112, 109 ve 106 mm olarak ölçülmüştür. Geri dönüştürülmüş agrega içeriğindeki artışla birlikte çökme değerindeki ani düşüş büyük ölçüde önlenmiştir. YFC'li karışımın eğilme, yarmada çekme ve basınç dayanımı değerleri PÇ'li karışımından daha yüksek çıkmıştır. %50 oranında geri dönüştürülmüş agrega içeriğiyle alkaliyle aktifleştirilmiş cüruf içerikli karışımları en yüksek dayanım özelliklerini ortaya çıkarmıştır ve daha sonra giderek dayanım azalmıştır. Buna karşın %100 geri dönüştürülmüş agrega içerikli olan alkaliyle aktifleştirilmiş cüruf karışımları ise PÇ'li karışımlarından daha üstün dayanım özellikleri göstermiştir.

Ren ve Zhang (2018), yaptıkları çalışmada geopolimer bağlayıcı hamur ile geri dönüştürülmüş agrega arasındaki aderansı incelemişlerdir. Deneylerden önce, hamur örnekleri oda sıcaklığında 7 gün ve 14 gün olmak üzere standart küre tabii tutulmuştur. Agregalar olarak atık beton parçaları kullanılırken, alkali aktivatör olarak ise 10 molarlık NaOH ve Na_2SiO_3 solüsyonu kullanılmıştır. Üç farklı oranda su/bağlayıcı oranı (0.30, 0.35 ve 0.40) olmak üzere çeşitli numune örnekleri hazırlanmıştır. Deney sonuçları, su/bağlayıcı oranı arttıkça hamur ile agrega arasındaki aderansın azaldığını göstermiştir.

Hu vd., (2019) yaptıkları çalışmada geri dönüştürülmüş agrega içeren uçucu kül ve öğütülmüş granüle YFC kombinasyonu tabanlı geopolimer kompozitlerin özelliklerini araştırmışlardır. Mikro yapı karakterizasyonu hakkında kapsamlı bir fikir vermek için numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi yapılmıştır. Sonuçlar, geri dönüştürülmüş agrega kullanımının işlenebilirlik ve priz süresi üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olduğunu göstermiş, buna karşın fiziksel ve mekanik özelliklerde azalmaya neden

olduğunu ortaya koymaktadır. Granüle YFC eklenmesi işlenebilirliği ve priz süresini azaltmıştır. Geri dönüştürülmüş agrega içeriği normal agreganın ağırlıkça %0, %50 ve %100'ü oranında ikame edilmiştir. Bağlayıcı dozajı 420 kg/m³ olarak belirlenmiştir ve granüle YFC uçucu külün ağırlıkça %0, %10, %20 ve %30'u oranında ilave edilmiştir. Alkali aktivasyon çözeltilisi olarak 12 M NaOH ve Na₂SiO₃ kullanılmıştır. Hazırlanan geopolimer karışımlar 20°C'lik sıcaklıkta 1 saat bekletildikten sonra, 24 saat süreyle 75°C'lik sıcaklık kürüne tabi tutulmuşlardır. Daha sonra, numuneler kalıptan çıkarılıp ve plastik filmlerle sarılmış ve deney gününe kadar 15°C ile 20°C arasındaki ortam sıcaklığında bekletilmiştir. Su emme oranı, geri dönüştürülmüş agrega içeriğinin artmasıyla birlikte önemli ölçüde artmıştır. Bu artışın esas olarak geri dönüştürülmüş agreganın doğal agrega ile karşılaştırıldığında daha yüksek su emme özelliğinden kaynaklandığı literatürde belirtilmiştir. Geri dönüştürülmüş agrega içeriği arttıkça su emme oranının arttığı görülmüştür. Buna paralel olarak kılcal geçirimsilikte de artış beklenmiştir ve bu artış geri dönüştürülmüş agreganın gözenekli yapısına atfedilmiştir. Basınç dayanımı geri dönüştürülmüş agrega değişiminden olumsuz etkilenmiştir ve geri dönüştürülmüş agreganın artan içeriğiyle azaldığı görülmüştür. SEM analizi sonuçları incelendiğinde, geopolimer matrisin yoğun olmayan kusurlu bir yapıya sahip olmasından dolayı çatlakların öncelikle matriste meydana geldiği gözlenmiştir.

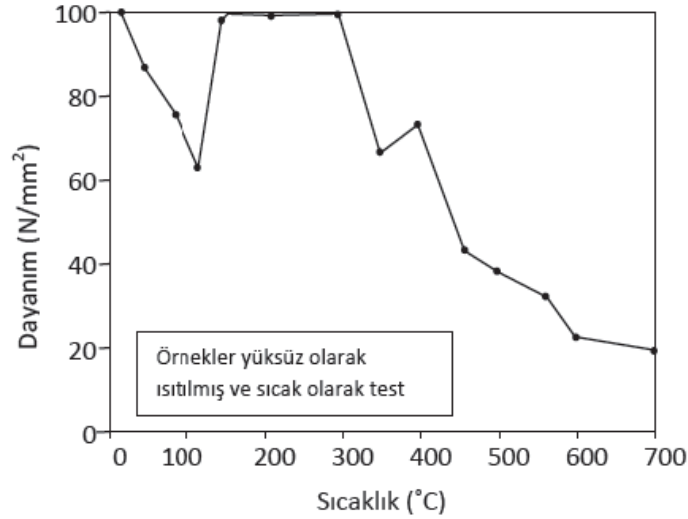
Xie vd., (2019) inşaat ve yıkım atıklarının yeniden kullanımı, çevrenin korunması ve geri dönüştürülmüş malzemeler için sürdürülebilir bir yol için gerekli olduğu fikrinden yola çıkarak yaptıkları çalışmada, geri dönüştürülmüş agrega betonlarında portland çimentosu hamurunun yerini tamamen almak için granüle YFC/metakaolin bazlı geopolimer matrisi içeren karışımlar üretmişlerdir. Kullanılan doğal iri agrega granitten yapılmış ve geri dönüştürülmüş iri agrega ise, 20-30 MPa gücünde eski beton binalardan elde edilen kırılmış atık betondan üretilmiştir. 8 adet karışım grubu hazırlanmıştır. 1 grup portland çimentosu bazlı normal agrega içeren beton, 1 grup portland çimentosu bazlı geri dönüştürülmüş agrega içeren beton ve 6 grup geri dönüştürülmüş agrega içeren geopolimer beton olmak üzere karışımlar hazırlanmıştır. Karışımların su/bağlayıcı oranı 0.5 olarak belirlenmiştir. Kullanılan geri dönüştürülmüş agregalar doğal agregalara ağırlıkça %0, %50 ve %100 oranında ikame edilmiştir. Granüle YFC/metakaolin oranı 1:1 ve 7:3 olarak belirlenmiştir. Alkali aktivasyon çözeltilisi olarak NaOH ile Na₂SiO₃ çözeltilisi kullanılmış ve ayrıca literatürdeki çalışmalar referans alınarak Si/Al oranı 2.5/1 olacak şekilde ayarlanmıştır. Karışımların basınç dayanımı, CO₂ emisyonları ve SEM analizleri

incelenmiştir. Geri dönüştürülmüş agrega içeriğinin artmasıyla basınç dayanımı giderek azalmıştır. Geri dönüştürülmüş agregalar doğal agregaların tamamen yerini aldığı anda, geri dönüştürülmüş agregaların CO₂ emisyonları doğal agregalarınkinden önemli ölçüde daha az olmasına rağmen, geri dönüştürülmüş agrega kaynaklı geopolimer karışımlarda CO₂ emisyonlarında az miktarda bir azalma meydana geldiği gözlenmiştir. Bu durum NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltisinin CO₂ emisyonlarının yüksek olmasına atfedilmiştir. Bu nedenle, geri dönüştürülmüş agrega içeren geopolimer karışım üretimindeki CO₂ emisyonlarını azaltmak için bir potansiyel yöntem, uygun bir Si/Al oranı kullanarak NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltisi miktarını en aza indirmek olabileceği sonucuna varılmıştır. Geri dönüştürülmüş agrega içeriğinin artmasıyla geopolimer matrisindeki çatlakların azaldığı görülmüş, ancak agrega ile matris arasındaki ara yüzey geçiş bölgesindeki çatlakların arttığı gözlenmiştir.

2.3.Yüksek Sıcaklığın Betona Etkisi

Yüksek sıcaklığın hem beton hem de betonarme yapılara etkisi 1920'lerden günümüze kadar süregelen bir araştırma konusudur. Malzemenin yangına maruz kaldığı sırada ve yangın sonrasında sergilediği davranış ile yapının güvenliği ve bütünlüğü üzerine odaklanılmıştır. Bundan 10 yıl öncesine kadar yapılan çalışmalarda yüksek sıcaklık etkisinin daha çok normal dayanımlı betona olan etkileri araştırılmıştır (Kızılkant, 2010).

Beton, yüksek sıcaklık etkisinde çoğu yapı malzemesine nispeten, belirli bir süre aralığı boyunca ciddi zarar görmemesi ve zehirli duman yaymaması açısından yangına karşı direnci yüksek olan bir malzemedir. Fakat betonun göstermiş olduğu bu dayanıklılık, belli bir sıcaklık değerine kadar ve sınırlı süre zarfında geçerlidir (Baradan vd., 2002).



Şekil 2. 1.Sıcaklığın artması ile çimento hamurunun basınç dayanımındaki değişim (Baradan vd., 2002)

50-120°C sıcaklıkları arasında mukavemette oluşan azalmanın çimento hamurunda yer alan su tabakalarının genişmesi sebebiyle bağların zayıflaması sonucu oluştuğu düşünülmektedir. Bu sıcaklıklardan sonra dayanımın tekrar artması ise termal kurumunun sağladığı pozitif etkiden dolayı gerçekleşmektedir. Termal kurumadan kaynaklanan bu yararlı etki, mikro çatlakların belirginleşmeye başladığı 300°C'nin üzerindeki sıcaklık değerlerinde sona erer. 300°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda mekanik özelliklerin kötüleşmesi üzerinde porozitenin artmaya başlaması da önemli bir role sahiptir. C-S-H ara yüzeylerinde yer alan su sıcaklık 300°C'ye çıktığında, C-S-H ve sülfö-alüminattan kaynaklanan kimyasal bağ suyunun bir kısmının kaybedilmesiyle mikro çatlak oluşumuna sebep olmaktadır. Oluşan mikro çatlaklar ilk önce (yaklaşık 300°C'de) Ca(OH)₂'nin toplandığı kısımlarda ve ardından henüz hidratasyona uğramamış tanelerin bulunduğu kısımlarda (yaklaşık 400°C'de) görülmektedir. 400-600°C arasındaki yüksek sıcaklık maruziyeti çimento hamurunda yer alan hidratasyon ürünlerinin ayrışmasına ve C-S-H jellerinin parçalanmasına neden olur. 400°C'nin üzerindeki sıcaklık maruziyetlerinde soğutulmadan sonra numunelerin parçalanması, o sıcaklıkta Ca(OH)₂'nin ayrışması ve bu sıcaklıktan soğuma sonrası tekrar hidratasyona uğrayarak genişlemesine bağlanmaktadır (Mehta ve Monteiro,1997; Piasta,1984; Lin vd.,1996; Baradan vd., 2002).

Yangını söndürmek amacıyla kullanılan su, kalsiyum oksitlerin yeniden Ca(OH)₂'ye dönüşmesine sebep olur ve hacimde genişleme meydana gelir. Bu yüzden kısa süre

içerisinde hem büzülme hem de genişlemeye uğrayan betonda, zıt gerilmelerin etkisiyle giderek artan deformasyonlar oluşur (Akman, 2001).

Yüksek dayanımlı betonların geçirimsizlik özelliklerinin normal betonlara kıyasla daha iyi olmasından dolayı yüksek sıcaklık etkisi altında daha fazla hasara uğrarlar. Bu geçirimsiz yapı suyun buharlaşıp uzaklaşmasına engel olmakla beraber oluşan hidrostatik basınç etkisiyle de betonun patlayıp parçalanmasına sebep olur. Düşük dozajlı betonlarda polipropilen türü liflerin (hacimce %0.1-0.2) kullanılması bu tarz hasarların meydana gelmesine engel olur (Aydın vd., 2008).

Sıcaklık artışı ile birlikte oluşan genişmeden dolayı hacim artar, betonun boşluklarındaki suyun buharlaşması sonucu ise kütlede azalma meydana gelir. Kütle ve hacimde meydana gelen bu değişiklikler betonun birim hacim ağırlığında azalmalar meydana getirir. Beton yangına maruz kaldıktan sonra iki önemli değişkene bakılır; boşluk oranı ve su muhtevası. Betondaki sıcaklık değeri arttıkça, boşluk oranının artmasıyla beraber betonda kütle kaybı meydana gelir. Normal ve yüksek dayanımlı betonlar için porozitedeki bu artış ve kütle kaybı oluşumu doğrusal bir şekilde gerçekleşirken, yüksek dayanımlı betonlar için bu durum geçersizdir. Kapiler boşlukların hemen hemen hiç olmaması ile hidrate olmamış çimento tanelerinin bulunması betondaki su buharı salınımını güçleştirir, ancak betondaki boşluk oranını önemli ölçüde arttıran, kütle kaybı miktarının giderek artmasıdır (Kızılkant, 2010).

Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan geri dönüştürülmüş beton konusunda birkaç çalışma yürütülmüştür ve bunlardan şu sonuçlar çıkarılabilir (Cree vd., 2013, Zega ve Di Maio, 2006):

- Tıpkı doğal beton gibi yüksek sıcaklıklara maruz kalan geri dönüştürülmüş beton da, ısıtma işleminden önceki özelliklerle karşılaştırıldığında mekanik özelliklerinde büyük bir düşüş göstermektedir.
- Ancak, geri dönüştürülmüş betonlar, referans doğal betonlara kıyasla daha iyi mekanik özellikler göstermektedir.
- Düşük su/çimento oranlarına sahip geri dönüştürülmüş beton, daha yüksek su/çimento oranlarına sahip betonlardan daha iyi özelliklere sahip gibi görünmektedir.

- Kireçtaşı içerikli betondan elde edilen geri dönüştürülmüş betonun termal özellikleri kuvarsla üretilene kıyasla daha iyi termal özellik gösterebilmiştir.

Beton ısıtıldığında agregaların genleşmesi, çimento hamurunun büzülmesi gibi birçok olay meydana gelebilir. Anlamlı karşılaştırmalar yapabilmek için çalışmanın tüm betonları aynı orijinal agregadan oluşturulmuştur ve beton örneklerinde homojen bir sıcaklık sağlanmıştır. Fiziksel, termal ve mekanik özelliklerin daha iyi anlaşılması için araştırmalar yapılması, geri dönüştürülmüş agrega içerikli betonun binalarda yapısal beton olarak daha yaygın bir şekilde uygulanmasına yönelik önemli bir adımdır (Cree vd., 2013).

Kong vd.,(2007), oda sıcaklığından başlamak üzere 800°C sıcaklıklara maruz bırakılacak geopolimer metakaolin içerikli ve uçucu kül içerikli beton numunelerin karşılaştırmalı olarak fiziksel ve dayanım özelliklerini incelemiştir. Tüm örnekler 24 saat süresince 80°C'lik yüksek sıcaklık kürüne tabi tutulmadan önce, 24 saat süreyle oda sıcaklığında suda küre tabi tutulmuştur. Daha sonra numuneler oda sıcaklığından başlanarak 4.4°C /dk artış oranı ile 800°C'ye kadar sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Numunelerin taramalı elektron mikroskop analizleri (SEM) ile basınç dayanım değerlerine bakılmıştır. Alkali aktivatör olarak konsantrasyonu 7 M olan KOH çözeltisi kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre SEM analizleriyle UK ve metakaolin geopolimerleri arasındaki temel fark UK içeren geopolimer örneklerin mikro gözenekler içerdiği görülmüştür. Bu gözenekler numune ısıtıldığında nemin kaçmasını kolaylaştıran çok sayıda küçük gözeneklerdir ve geopolimer matrisine daha az zarar verirler. Ancak metakaolin içeren numunelerde bu gözeneklere rastlanmamıştır. Yüksek sıcaklığa maruz metakaolin ve UK içeren numunelerin basınç dayanımları, sıcaklığa maruz bırakılmayan numunelere göre farklı değerlerde olmuştur. Metakaolin içeren numunelerin dayanımında %34'lük düşüş olurken, UK içeren numunelerde %6'lık artış meydana gelmiştir. Bu durum, içerisindeki su miktarının çok fazla azalmayıp hidrate olamamış kısmın da hidrate olmasına bağlanabilir.

Tanyıldızı ve Yonar (2016), yaptıkları çalışmada farklı oranlarda polivinil alkol (PVA) lifli kullanılarak üretilmiş olan geopolimer betonun yüksek sıcaklık dayanımını incelemiştir. Kalıplardaki numuneler önce 24 saat süresince sırasıyla 60°C, 80°C ve 100°C'de fırın kürüne maruz bırakılmıştır. Daha sonra oda sıcaklığında 28 gün süreyle 20±2°C'lik kür havuzunda bekletilmiştir. Kürlenme aşamasından sonra geopolimer numuneler 400, 600 ve 800°C'lik yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Üretilen 100x100x100 mm boyutundaki küp numuneler ile 75x75x300 mm boyutundaki kiriş numunelerin eğilme ve basınç dayanımları test edilmiştir. PVA lifli UK'nin ağırlıkça %0, %1 ve %2 oranında

kullanılmıştır. Alkali aktivasyon çözeltisi olarak NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltileri kullanılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre, 60°C’de kürlenmiş örnekler 80°C ve 100°C sıcaklıkta kür edilenlerle karşılaştırıldığında, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı açısından en iyi sonuçları göstermiştir. Karışıma eklenen lif oranı arttıkça basınç dayanımı ve eğilme dayanımı da artış göstermiştir. 60°C’de kürlenmiş 20°C’ye maruz kalan %2 PVA lif içeren numunelerin basınç dayanımı, kontrol numunesine göre %90 oranında bir basınç dayanımı artışı gösterirken eğilme dayanımında ise %66 oranında bir artış sağlamıştır. 80°C’de kürlenmiş ve 20°C’ye maruz bırakılmış %2 oranında PVA lif içeren numunelerin basınç mukavemetindeki artış oranı kontrol numunelerine göre %37 kadar olmuştur. Aynı şekilde eğilme mukavemetindeki artış oranı ise %34 olarak saptanmıştır.

Shaikh ve Hosan (2016), yaptıkları çalışmada sodyum (Na) ve potasyum (K) bazlı alkali aktivatörlerin, çelik lif takviyesi ve yüksek sıcaklıkla birlikte geopolimer betonlar üzerindeki mekanik etkilerini karşılaştırarak incelemişlerdir. Numuneler 24 saatlik sürede 60°C’lik buhar küreine tabi tutulduktan sonra 105°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat boyunca kurumaya bırakılmışlardır. Daha sonra 200, 400, 600 ve 800°C’lik yüksek sıcaklıklara maruz bırakılıp numunelerin mekanik özelliklerine bakılmıştır. Her biri 8 M konsantrasyonda olmak üzere K₂SiO₃, KOH, NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltileri alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. UK, PÇ yerine ikame edilmiştir. Çelik lif uçucu külün ağırlıkça %0.5 ve %0.75’i oranında kullanılmıştır. Deney sonuçlarına bakıldığında, %0.5 oranında çelik lif içeren geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları her sıcaklıkta aynı oranda çelik lif içeren PÇ’li betonların dayanımından daha yüksek değerlerde çıkmıştır. %0.75 çelik takviye içeren geopolimer betonların dayanımında 400°C sıcaklığa kadar dikkate değer düşüş olmazken, bu sıcaklıktan sonraki sıcaklıklarda basınç dayanımında daha çok azalma meydana geldiği görülmüştür. Neredeyse tüm sıcaklık değerlerinde Na aktivatör içerikli geopolimerlerin elastisite modülü değerleri K aktivatör içerikli geopolimer numunelere oranla daha fazla olarak tespit edilmiştir.

Esen (2017), yaptığı çalışmada çeşitli mineral katkıları kullanılarak elde edilen betonların, bazı fiziksel özelliklerini ve yüksek sıcaklık etkisi altında basınç dayanımlarını deneysel olarak araştırmıştır. Üretilen beton numuneler sırasıyla 200, 400, 600 ve 800°C’lik yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış ve basınç dayanımları ölçülmüştür. PÇ ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 oranında azaltılıp, yerine aynı oranlarda diatomit tozu, barit tozu, uçucu kül ve silis dumanı ikame edilmiştir. Üretilen numunelere su emme oranı ve ultrases geçiş hızı (UPV) deneyleri uygulanmıştır.

Deney sonuçlarına göre; karışımlara eklenen mineral katkıların farklı oranları ve çeşitliliği numunelerin su emme miktarında farklı sonuçlar oluşturmuştur. %40 oranında diatomit katkı içeren beton numuneler %9.8'lik oranda en yüksek su emme oranına sahip olurken, onu sırasıyla silis dumanı, barit ve uçucu kül katkılı numuneler izlemiştir. Eklenen mineral katkı oranının artışına paralel olarak numunelerdeki su emme yüzdesinde artış olduğu gözlenmiştir. Diatomit katkı, sahip olduğu kütlenin hemen hemen %80-90'ı oranında su emebilme özelliğine sahiptir. Numunelere eklenen mineral katkı miktarının artması ile betondaki ultrases geçiş hız değerlerinde düşüş meydana geldiği görülmüştür. Sıcaklığın yükselmesi neredeyse tüm numunelerin basınç dayanımlarında 400°C'ye kadar önemli bir farklılık meydana getirmemiştir. Hatta bazı numunelerde bu sıcaklığa kadar basınç dayanımlarında artış meydana gelip, daha sonra dayanımın düşmeye başladığı kaydedilmiştir.

Baradaran-Nasiri ve Nematzadeh (2017), doğal iri agregaya yerine ağırlıkça %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında eklenen ezilmiş tuğlanın çeşitli yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan numuneler üzerinde dayanım ve ağırlık kaybı gibi özelliklerini araştırmışlardır. Bağlayıcı olarak CEM-I 42.5N tipi çimento kullanılmıştır ve alüminli çimento ise normal portland çimentosu yerine ağırlıkça %0 ve %100 oranlarında ilave edilmiştir. Numuneler dökümden 24 saat sonra kalıplardan çıkarılıp 28 gün süreyle 23°C sıcaklıkta suda kür edilmiştir. Her bir grup 7 termal kategoride sırasıyla 23, 110, 200, 400, 600, 800 ve 1000°C olmak üzere incelenmiştir. 23°C ve 110°C sıcaklıkları ortam (referans) sıcaklığı olarak ve diğer sıcaklıklar yüksek sıcaklık olarak kabul edilmiştir. PÇ ile üretilen numunelerin basınç dayanımı ise 400°C den sonra diğer sıcaklıklara oranla çok belirgin azalma göstermiştir. 800°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, ezilmiş tuğla agregası ve alüminli çimento içeren numuneler normal beton numuneleri ile karşılaştırıldığında daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir. Alüminatlı çimento içeren numuneler için basınç dayanımı kaybı oranı 110°C'de en yüksek olmuştur ve bu sıcaklığın üstündeki sıcaklıklarda ise bu dayanım kaybı oranı giderek azalmıştır. Ağırlık kaybı açısından ise, alüminatlı çimento ile hazırlanan numunelerde %0 oranında geri dönüştürülmüş agregaya katılan numunelerin 110°C'deki kütle kaybı %25, %50, %75 ve %100 oranlarında katılan agregaların olduğu numunelere göre daha az iken, içerisindeki geri dönüştürülmüş agregaya oranı arttıkça (400°C hariç) 110°C'nin üstündeki sıcaklıklarda ağırlık kaybının daha az olduğu tespit edilmiştir. PÇ ile hazırlanan numunelerde ise geri dönüştürülmüş agregaya içermeyen beton numunelerin 110°C sıcaklıktaki ağırlık kaybı en az olurken, daha yüksek sıcaklıklarda

maruz kalındıkça %100 oranında geri dönüştürülmüş agrega bulunan numunelerin ağırlık kaybı %0, %25, %50 ve %75 oranında bulunanlara göre daha az olmuştur.

Khaliq (2018), yaptığı çalışmada geri dönüştürülmüş iri agrega kullanılarak üretilen yüksek dayanımlı betonun 23 ile 800°C arası yüksek sıcaklıktaki mekanik özelliklerini incelemiştir. Doğal nehir agregası ince agrega olarak kullanılmıştır ve iri agrega olarak; doğal ezilmiş kireçtaşı ile geri dönüştürülmüş agrega karşılaştırmalı şekilde kullanılmıştır. Üretilen numuneler 23°C'lik ortalama sıcaklıkta 28 gün süreyle suda kür edilmiştir. Sonrasında numuneler sırasıyla 100, 200, 400, 600 ve 800°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık sonrası görsel incelemelerde geri dönüştürülmüş agrega içeren beton, normal agrega ile üretilen beton ile karşılaştırıldığında daha düşük termal çatlama ve daha az renk değişimi sergilediği görülmüştür.

Fan vd., (2018), yaptıkları çalışmada deneysel olarak F sınıfı UK, KOH ve Na₂SiO₃ kullanılarak hazırlanan geopolimerlerin termo-mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Bağlayıcı malzeme olarak UK kullanılmıştır. Numuneler 24 saat oda sıcaklığında kür edildikten sonra, 60°C ve 80°C'lik yüksek sıcaklık kürüne tabi tutulmuştur. Daha sonra tüm numuneler 500°C ve 800°C'lik yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Numunelerin su/bağlayıcı oranı çeşitli oranlarda (0.2, 0.25, 0.3 ve 0.35) tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre; su/bağlayıcı oranı 0.2 olan numunelerin hem normal sıcaklıktaki dayanımı hem de 500°C sıcaklıktaki dayanımı diğer numunelere göre daha fazla olmuştur. UK oranının düşük olmasının yüksek sıcaklıklarda betonun dayanımını olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Numunelerdeki su/bağlayıcı oranı 0.2 olduğunda 500°C'lik ısıtmadan sonra numunelerde boyuna %2.0 oranında kısalma olduğu görülmüştür. 800°C'lik ısıtmadan sonra ise numuneler %9.4 oranında enine genişleyip deforme olmuştur.

Das vd., (2018), hem doğal agrega içeren betonda hem de geri dönüştürülmüş agrega bulunduran betonda farklı oranlarda ilave edilen polipropilen liflerin betondaki çeşitli parametrelere etkisini incelemişlerdir. Numuneler, dökümden 24 saat sonra kalıplardan çıkarılıp, 28 gün boyunca 23°C'lik sıcaklıkta suda kür edilmiştir. Hem doğal agrega içeren numunelerde hem de geri dönüştürülmüş agrega bulunduran beton numunelerde ağırlıkça üç farklı (%0.5, %0.75 ve %1) oranda polipropilen lif fraksiyonları eklenmiştir. Deney sonuçları, geri dönüştürülmüş agrega içeren numuneler için basınç dayanım değerlerinin doğal agrega içeren numuneler ile benzer bulunduğunu ortaya koymaktadır. Basınç dayanımı hem doğal agrega içeren numunelerde hem de geri dönüştürülmüş agregalı numunelerde, lif içeriği %0.5 iken artmıştır, ancak daha fazla eklenmesi durumunda düşüşe

geçmiştir. Bunun nedeni, dağınık çimento matrisinde gerilme yoğunluğunun tüm lif uzunluğu boyunca aynı olmamasıdır. Lif içeriğinin basınç dayanımı üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi vardır. Bununla birlikte, lifler betonun yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımını belirlemede önemli bir rol oynar. Her seri için elde edilen deney sonuçlarına dayanarak, optimum lif içeriğinin %0.5 olduğu sonucuna varılabilir. Doğal agrega içeren beton numunelerde geri dönüştürülmüş agrega içeren beton numunelere kıyasla liflerin gerilim artışı üzerindeki etkisinin daha belirgin olduğu sonucuna varılmıştır. %1'lik durum hariç, tüm lif içeriklerinde geri dönüştürülmüş agrega bulunduran numunelerdeki gerilme miktarının hep yüksek değerlerde elde edildiği belirtilmiştir.

Bui vd.,(2018), mineral katkı maddelerinin yüksek sıcaklıkta geri dönüştürülmüş agregaiçeren betonun özelliklerine etkisini incelemiştir. Numuneler yaklaşık 20°C'de su içinde kür edilmiştir. Numuneler 28 günlük kürün ardından, elektronik bir fırında ısıtılmıştır. Fırının ortalama ısı 5°C/dk. olmak üzere 500°C'lik en yüksek sıcaklığa maruz bırakılma süresi 1 saat olarak ölçülmüştür. İnce agrega olarak kum kullanılmıştır, iri agrega olarak ise geri dönüştürülmüş agrega ve kırmataş karşılaştırmalı olarak kullanılmıştır. Tüm mineral katkıları iki yöntemle kullanılmıştır. 1.si çimentoyle ikameli olarak, 2.si ise çimento miktarı sabitken eklenmiştir. Silis dumanı, uçucu kül, atık kağıt külü ve metakaolin olmak üzere ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında mineral katkıları kullanılmıştır. Üretilen numunelerin UPV, basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri incelenmiştir. Deney sonuçları, mineral katkı maddelerinin geri dönüştürülmüş agregalı betonun yüksek sıcaklığa karşı direncini önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. Çimento miktarı sabit iken mineral katkı ekleme yöntemi geri dönüştürülmüş agrega içeren betonun yüksek sıcaklığa olan direncini çimentoyle ikame etme yönteminden daha iyi arttırmıştır. Mineral katılardan 20°C'de en büyük dayanım, çimentoya ağırlıkça %10 oranında silis dumanının eklendiği durumdaki basınç dayanımıdır. Ancak, aynı oranda (%10) silis dumanının çimento çıkarılıp onun yerine ikameli olarak katıldığı durumdaki dayanım ise daha düşüktür. Bu sıcaklıktaki düşük dayanım ise ikame metoduyla ağırlıkça %15 oranında atık kağıt külünün eklendiği durumdur. 500°C'deki en yüksek dayanımın gözlemlendiği durum, çimentoya ağırlıkça %5 oranında UK'nin eklendiği durumdaki dayanımdır. Yine aynı sıcaklıktaki en düşük dayanımın gözlemlendiği durum ise ikame metoduyla ağırlıkça %15 oranında eklendiği durumdur. Hem 20°C'de hem 500°C'de maksimum UPV değerine ve basınç dayanımına mineral katkı içermeyen doğal agregalı betonun sahip olduğu gözlenmiştir.

Kong ve Sanjayan (2008), yaptıkları çalışmada termal hasara bağlı mukavemet kaybını değerlendirmek için 800°C'ye kadar ısıtılan numunelerin, yüksek sıcaklık etkisindeki davranışlarını incelemişlerdir. Numuneler 24 saatlik süre boyunca oda sıcaklığındaki kürlenme rejimine tabi tutulduktan sonra 80°C'lik fırın kürüne maruz bırakılmıştır. Tüm numuneler oda sıcaklığından başlanarak 5°C/dk. olarak kademeli artan oranlarda 800°C'ye kadar sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Tüm karışımlarda 7 molarlık Na₂SiO₃ ve NaOH çözeltisi kullanılarak aktifleştirme işlemi sağlanmıştır. Deney sonuçları agregaların sıcaklık ile sürekli olarak genleştiğini ve 800°C'de yaklaşık %1.5–2.5 genleşmeye ulaştığını göstermektedir. Aynı doğrultuda, geopolimer matrisi de 200°C ile 300°C arasında yaklaşık %1 oranında ve 700°C ile 800°C arasında yaklaşık %0.6 oranında büzülme göstermiştir. Bu belirgin uyumsuzluğun gözlemlenen dayanım kaybının sebebi olduğu sonucuna varılmıştır.

Kong ve Sanjayan (2010), yaptıkları çalışmada yüksek sıcaklıkların UK içerikli geopolimer hamur, harç ve betona etkisini çeşitli parametreler (agrega boyutları, numune boyutları, agrega çeşidi, süper akışkanlaştırıcı vs.) açısından araştırmışlardır. Üretilen numuneler, önce oda sıcaklığında 24 saat boyunca kürlenmeye bırakılmıştır, daha sonra 80°C'de ve bağıl nemi %93 olan fırın kürüne tabi tutulmuştur. Kürleme rejiminin sonunda, numuneler kalıplarından çıkarılmıştır ve ilk fiziksel özellikler kaydedilmeden önce soğumaya bırakılmıştır. 25×25×25 mm boyutlu küp numuneler ile 35/70 mm boyutlu ve 100/200 mm boyutlu silindirik numuneler üzerinde sırasıyla hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıktaki basınç mukavemetleri kaydedilmiştir. Numuneler oda sıcaklığından itibaren dakikada 4.4°C'lik bir artış oranında 800°C'ye kadar yüksek sıcaklıklara tabi tutulmuştur. Deney sonuçları, agregaların boyutunun yüksek sıcaklıklarda geopolimer beton davranışını belirlemede önemli bir faktör olduğunu göstermiştir. Daha büyük boyutlu agregalar içeren (>10 mm) geopolimer betonlar yüksek sıcaklıklarda nispeten dahastabil iken, daha küçük boyutlu agregalar (<10 mm), geopolimer betonda genleşmeye sebep olmuştur. 10 mm'den büyük agrega boyutları, hem ortam sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda iyi dayanım performansları sağlamıştır. Portland çimentosu ile yaygın şekilde kullanılan geleneksel süper akışkanlaştırıcı, bağlayıcıya bir katkı maddesi olarak uygulandığında, karışımın genel işlenebilirliğini önemli ölçüde geliştirmez. Tam aksine geopolimer matrisinin gücünü bozar. O nedenle süper akışkanlaştırıcıların kullanımı, yüksek sıcaklık performansı açısından geopolimer betonda faydalı değildir. Bu çalışma geopolimerlerin yüksek sıcaklıklarda davranışını belirleyen iki ana faktör olarak numune

boyutları ve agrega boyutunun olduğunu göstermektedir. Geopolimer betonda yüksek sıcaklıklarda mukavemet kaybı, geopolimer matrisi ile agregalar arasındaki termal uyumsuzluk faktörüne bağlanır. Numune boyutları açısından ise; yüksek sıcaklık mukavemeti, geopolimer hamur örneklerinin büyüklüğüne bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Nitekim, oda sıcaklığındaki numunelerin dayanımları arasında çok fazla fark olmazken, yüksek sıcaklığa maruz numunelerin dayanımında özellikle de büyük boyutlu numunelerin dayanımında %55'lere varan oranlarda bir düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir. Hatta 100/200 mm boyutlu silindir numunelerde %75 oranında bir dayanım düşüşü kaydedilmiştir.

Pan vd., (2012), yaptıkları çalışmada agrega tane büyüklüğünün yangın sırasında hem normal betonun hem de geopolimer betonun parçalanması üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Üretilen geopolimer numuneler 24 saat süreyle 60°C sıcaklıkta fırında kür edilmiştir. PÇ içeren beton numuneler ise 28 gün boyunca 22°C'de kirece doygun suda küre bırakılmıştır. Hazırlanan numuneler 200, 400, 600 ve 800°C'lik yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Deney sonuçları, agrega boyutunun yüksek sıcaklıklara maruz betonun parçalanması üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Maksimum agrega boyutu 10 mm'nin altında olduğunda, tüm betonlarda yangın esnasında betonu patlatıcı etkide olan, bir dökülüp parçalanma durumu meydana gelir. Öte yandan, 14 mm'lik maksimum agrega boyutuna sahip olan betonlarda ise bu parçalanma önlenmiş olur. Sonuç olarak, kırılma cephesine ulaşabilen kinetik enerji azalır ve büyük agregaya sahip betonların çürümeye karşı direnci artar.

Kantarıcı (2013) yaptığı çalışmasında Elazığ ferrokrom cürufu kullanarak hazırladığı karışımı Na_2SiO_3 ve NaOH ile aktif hale getirerek geopolimer beton numuneler elde etmiştir. Hazırlanan geopolimer karışımında silis modülü 1.35 olarak belirlenmiştir. Üretilen numunelere 72 saat süreyle %60 nem ortamında ve 75°C sıcaklıkta buhar kürü uygulanmıştır. Ayrıca numunelerin yangın dayanımlarını belirlemek amacıyla tüm numuneler sırasıyla 100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700°C olmak üzere yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmışlardır. Hazırlanan geopolimer numunelerin özellikleri kontrol numunelerinin özellikleriyle karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, geopolimer karışımlarda 100°C ve 300°C sıcaklıklarda kontrol karışımına nispeten basınç dayanımında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Üretilen tüm numunelerdeki minimum basınç dayanımı değeri ise 700°C'de tespit edilmiştir. Sonuç olarak geopolimer beton örneklerinin normal beton örneklerine kıyasla yangın dayanımlarının daha iyi olduğu belirlenmiştir.

Laneyrie vd., (2016), yaptıkları çalışmada geri dönüştürülmüş agregaların harç-agrega arayüzlerindeki kirliliklerden ve çatlamalardan etkilendiğini araştırıp ve yüksek sıcaklığa maruz geri dönüştürülmüş agregalı betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Üretilen numuneler dökümden 24 saat sonra kalıplardan çıkarılıp, plastik torbalarda nemli bir bezde bekletilmiştir. Daha sonra 90 gün boyunca neme doymuş bir şekilde $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de küre tabii tutulmuşlardır. 3 çeşit iri agregası (silika kalkerli doğal iri agregası, geri dönüştürülmüş iki çeşit beton agregası) kıyaslamalı şekilde kullanılmıştır. Tüm numuneler 20, 150, 300, 450, 600 ve 750°C olmak üzere farklı sıcaklıklara maruz bırakılmışlardır. Su/bağlayıcı oranı 0.3 ve 0.6 olmak üzere iki şekilde ayarlanmıştır. Deney sonuçları 20°C 'de su/bağlayıcı oranı 0.3 olan numunelerin, bu oranın 0.6 olduğu numunelere oranla daha yüksek basınç dayanımı, elastisite modülü ve yarmada çekme dayanımı gösterdiğini doğrulamıştır. Geri dönüştürülmüş agregası bulduran betonların, 300°C 'ye kadarki sıcaklıklar için referans betonlar için ölçülenlerden %10-20 daha düşük termal iletkenlik değerlerine sahip olduğu saptanmıştır.

Luhar vd., (2018), yaptıkları çalışmada kauçuk lif içeren UK bazlı geopolimer betonun termal dayanıklılığını araştırmışlardır. Numuneler 90°C sıcaklıkta 48 saat süreyle fırın kürüne tabii tutulmuştur. Alkali aktivasyon çözeltisi olarak ise 14 molarlık Na_2SiO_3 ve NaOH çözeltileri karışımı kullanılmıştır. Kauçuk lif dozajı ince agreganın ağırlıkça %10'u oranında tutulmuştur. Üretilen numuneler oda sıcaklığından başlamak kaydıyla sırasıyla $200, 400, 600$ ve 800°C 'lik yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Numunelerin basınç dayanımı, termogravimetrik analiz ve X ışını kırınımı (XRD) gibi değerlerine bakılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde, basınç dayanımı değerleri (7, 14 ve 28 günlük) hem kontrol grubunda hem de lif içeren grupta sıcaklık değeri oda sıcaklığından başlayarak 600°C 'ye doğru arttıkça giderek azalma göstermiştir. Ancak 800°C 'de hem kontrol numunelerinin hemde lifli numunelerin dayanımında artış olduğu belirtilmiştir. Her iki tip geopolimer beton amorf faz içeriğini arttırarak başlangıçta reaksiyona girmemiş malzemenin polimerizasyonundan dolayı 600°C 'den daha fazla güç kazanır. Bu faz içeriği, kauçuk parçacıkların yüksek sıcaklıklarda ayrışmasından dolayı kauçuklu geopolimer beton söz konusu olduğunda daha azdır ve bu beton matrisindeki boşlukların oluşumuna yol açar. Bu boşluklar, gözenek basıncını arttırır ve matriste oluşan çatlakları hızlandırır. Her iki tip geopolimer betonun 600°C 'nin üzerinde bir güç kazandığını gösterir, çünkü reaksiyona girmemiş kristal malzemenin polimerleşmesinden dolayı amorf içeriği artmıştır. Hem kontrol numunelerinde hem de kauçuk lif içeren numunelerde kütle kaybı

200°C'ye maruz kaldığında minimum düzeyde iken sıcaklık 400, 600 ve 800°C'ye doğru arttırıldığında kütle kaybı giderek artmıştır. Ayrıca kauçuk lif içeren numuneler, içermeyen (kontrol grubu) grupla kıyaslandığında her sıcaklıktaki kütle kaybı miktarı daha fazla olmuştur. 800°C sıcaklıktaki kütle kaybı değeri ise dikkate değer derecede fazla olmuştur. Bu değer kontrol grubunda %15'lere çıkarken, kauçuk lif içeren grupta %17'lere çıktığı saptanmıştır.

Luna-Galiano vd., (2018) YFC kullanılarak elde edilmiş geopolimer kompozitlerin özelliklerinin, uçak endüstrisinden gelen karbon fiber atıkların takviyesiyle birlikte değerlendirilmesini araştırmışlardır. Numuneler 24 saat oda sıcaklığında kür edildikten sonra, üç saat süreyle sırasıyla 100, 300, 500 ve 700°C'lik yüksek sıcaklıklara tabi tutulmuştur. Karbon fiber atık YFC'nin azaltılan miktarı oranında olmak üzere %0, %20 ve %40 oranında hazırlanan karışımlara ilave edilmiştir. Numuneleri aktif hale getirmek için kullanılan aktivasyon çözeltileri konsantrasyonu 8M Na_2SiO_3 ve KOH çözeltisi karışımıdır. Deney sonuçlarına göre, cürufun azaltılan miktarı oranında karbon fiber atık eklenirken numunelerdeki gözeneklerin arttığı ve buna paralel olarak da basınç dayanımlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Kullanılan aktivasyon çözeltilerinin basınç dayanımı üzerindeki etkisinin direkt olarak geçirimsizlikle bağlantılı olduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklığa maruz numunelerde içerdeki su buharlaştığından dolayı kütlede bir azalma meydana gelmektedir ve bu durum basınç dayanımına negatif etki yaparak dayanımı düşürmektedir.

Salahuddin vd., (2019), yüksek sıcaklığın geri dönüştürülmüş iri agrega içeren beton performansına etkisini araştırmışlardır. Üretilen silindirik numuneler 25°C sıcaklıkta 28 gün süreyle suda kür edilmiştir. Numunelerdeki geri dönüştürülmüş agrega, normal agreganın ağırlıkça %0, %30, %60 ve %100'u oranında ikame edilmiştir. Bütün numuneler 25, 200, 400 ve 600°C olmak üzere yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmışlardır. Ayrıca cam tozu, mermer tozu ve pirinç kabuğu külü, %100 geri dönüştürülmüş agregalarla hazırlanan beton karışımlarının dayanım ile ilgili özelliklerini arttırmak için PÇ'nin % 20'sinin yerini almak üzere bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Atık çelik teller, geri dönüştürülmüş agrega betonunun mekanik özelliklerinin iyileştirilme olasılığını keşfetmek için bir takviye olarak kullanılmıştır. Herhangi bir sıcaklıkta, kontrol numunesindeki ağırlık kaybının geri dönüştürülmüş agrega içeren beton karışımlarından daha düşük olduğu tespit edilmiştir. %100 oranında geri dönüştürülmüş agrega içeren betonda çimento yerine %20 oranında cam tozu ikamesi, bağlayıcı olarak yalnızca PÇ içeren ve agrega olarak %100 geri

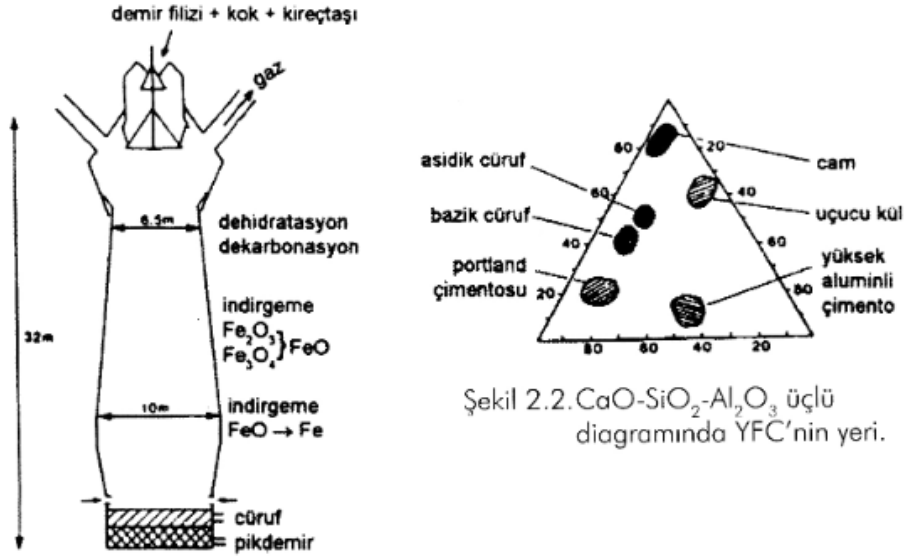
dönüştürülmüş agrega bulunduran beton karışımlarına kıyasla hem basınç dayanımında, hem de yarmada çekme kuvvetlerinde artış sağlamıştır. %100 geri dönüştürülmüş agregalı beton karışımlarında %0.5 atık çelik tel içeren karışımlar çelik telsiz beton karışımlarına kıyasla artan yarmada çekme dayanımı ve basınç dayanımı göstermiştir. %100 geri dönüştürülmüş agrega bulunan betonda %20 çimento yerine mermer tozu ve pirinç kabuğu külü ilavesi ile hem basınç dayanımı hem de yarmada çekme dayanımında azalma meydana geldiği görülmüştür. %30 geri dönüştürülmüş agrega içeriği olan beton karışımları kontrol karışımına kıyasla neredeyse %35 daha yüksek yarmada çekme dayanımı sergilemiştir. Aynı karışım oranına sahip numunelerde geri dönüştürülmüş agregaların giderek artması yarmada çekme dayanımını azaltsa da, nihai dayanımın kontrol karışımınıniki ile karşılaştırılabilir seviyede olduğu sonucunu göstermiştir.

2.4.Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Endüstriyel bir yan ürün olan YFC, demir-çelik endüstrisinde üretim sırasında oluşan atık bir malzemedir. Ham madde olarak kok kömürü, kalker ve (silis, alümin, kükürt, demir oksit içeren) demir cevherinin kullanıldığı demir endüstrisinde yüksek fırında gerçekleşen reaksiyonlar sonucu kireçtaşı ile beraber bu maddeler ayrışmaya uğrar. Gerekli yakıtı ise kullanılan kok kömürü sağlar. Sıcaklığın yaklaşık 1600°C'ye ulaştığı yüksek fırınlardaki işlem sonucunda üst kısımda cüruf, fırının alt tarafında ise ergimiş demir (pik veya ham demir) toplanmaktadır. Daha sonra oluşan cüruf ve demir toplandıkları yerden alınır. Elde edilen YFC'ye kullanım alanını belirlemek üzere çeşitli soğutma teknikleri uygulanır (Erdoğan, 2004).

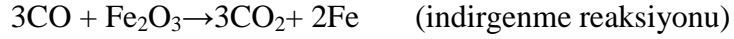
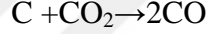
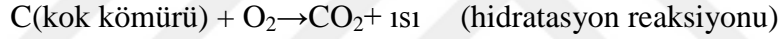
Eriyik halde fırından çıkarılan cüruf, havada yavaş soğuma işlemine maruz bırakılırsa, kristal yapıya bürünmektedir; fakat eğer suya dökülerek ya da başka bir şekilde çok hızlı soğutulursa, amorf (reaktif) yapıda ve kum tanesi çapında granül hale dönüşmektedir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

YFC'nin soğutulma işlemi iki yöntemle gerçekleştirilmektedir. Bu işlemler, Granülasyon Yöntemi ve Peletleme Yöntemidir. YFC'nin granülasyon yöntemiyle soğutulması esnasında fazla miktarda su kullanımı gerekmektedir. Bu işlem sonucunda üretilen YFC'nin özellikleri pahalı olmasından kaynaklanan sınırlı kullanıma rağmen diğer yöntemle üretilen cürufa kıyasla daha üstün olmaktadır (Tokyay ve Erdoğan, 2009).

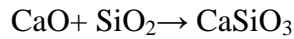
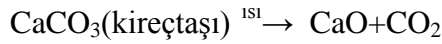


Şekil 2.1. Yüksek fırının şematik gösterimi (Tokyay ve Erdoğan, 2009)

Fırında gerçekleşen reaksiyonlar Şekil 2.3'te ve Şekil 2.4'te gösterilmiştir (Engin, 2015).



Şekil 2.2. Oksijenin demir oksitten ayrıştırılması (Engin, 2015)



Şekil 2.3. Demir cevherinden SiO₂'nin uzaklaştırılması (Engin, 2015)

2.5. Alkali Aktivasyon Çözeltileri

Sata vd., (2013) yaptıkları çalışmada UK bağlayıcılı geopolimer beton üretiminde geri dönüştürülmüş agrega kullanımının farklı konsantrasyonlarda ilave edilen NaOH (10, 15 ve 20 molar) çözeltisi ile birlikte etkisini araştırıp, doğal agregayla üretilen numunelerle dayanım ve geçirgenlik özellikleri açısından kıyaslamışlardır. İri agrega olarak sırasıyla;

doğal agrega, geri dönüştürülmüş beton parçaları ve kırık tuğla parçası birbiri ile karşılaştırmalı şekilde kullanılmıştır. Her üç agrega da 4.5–9.5 mm tane çap aralığında kullanılmıştır. Numuneler 1 saat boyunca kontrollü bir şekilde 25°C’de tutulmuştur. Daha sonra 48 saatlik 60°C sıcaklıktaki fırın kürüne tabi tutulmuştur. Sıcaklık küründen sonra numuneler soğumaya bırakılarak laboratuvara konulmuştur. Deneylemlerin sonuçlarına göre, %100 geri dönüştürülmüş agrega bulunan geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı doğal agregayla üretilen numunelere kıyasla daha düşük değerlerde çıkmıştır. Boşluk oranı ve geçirimsizlik katsayıları ise büyük ölçüde NaOH çözeltisinin konsantrasyonundan etkilenmiştir. 15M ve 20M NaOH içeren geopolimer numunelerde geçirimsizliğin arttığı gözlemlenmiştir.

Posi vd., (2015) yaptıkları çalışmada geri dönüştürülmüş ambalaj köpükleri içeren hafif geopolimer betonların özelliklerini incelemiştir. Hem doğal ince agrega hem de ambalaj köpüğü (2.36–4.75mm boyutlarına ufalanıp) karşılaştırmalı şekilde ince agrega olarak kullanılmıştır. Geopolimer karışımları aktif hale getirmek için 5, 10 ve 15 molarlık NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Deney sonuçları, numuneler içindeki ambalaj köpüğü miktarı arttıkça basınç dayanım değerlerinde düşüş meydana geldiğini göstermiştir. En ideal dayanımın ise 10 molarlık NaOH çözeltisi kullanımında elde edildiği tespit edilmiştir.

Mahmut (2015) yaptığı çalışmada silis dumanı ve uçucu kül gibi puzolanların geopolimer karışım elde etmede, birlikte kullanımının geopolimer karışımlar üzerindeki bazı fiziksel ve mekanik özelliklere etkisini araştırmıştır. Yapılan çalışmada bağlayıcı madde olarak Elazığ ferrokrom cürufu kullanılmıştır. Karışımlardaki su/bağlayıcı oranı 0.3 olarak belirlenmiştir. Ayrıca oluşan karışım farklı molaritedeki NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltileri ile aktif hale getirilerek geopolimer harçlar üretilmiştir. Üretilen harçların priz başlangıç ve priz sona erme süreleri incelenmiştir. Sertleşmiş harç numunelerinin ise birim ağırlık, kılcal su emme ve basınç dayanımı gibi değerlerine bakılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda NaOH ve Na₂SiO₃ gibi aktivasyon çözeltilerinin hazırlanan karışımda tepkime oluşturup, bağlayıcılık kazanarak geopolimer oluşumunu sağladığı tespit edilmiştir. Kapiler su emme değerinin minimum çıktığı durum 12 mol aktivasyon çözeltisi kullanılan örneklerde tespit edilmiştir. Karışımlardaki aktivatörlerin molaritesinin artması ile geopolimer harçların basınç dayanımlarında genel olarak artış görüldüğü tespit edilmiştir. Üretilen geopolimer harçlardaki birim ağırlık değerlerinin ise aktivatörlerin konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak azalma sergilediği gözlemlenmiştir.

Mohseni (2018), yaptığı çalışmada $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının polipropilen lif takviyeli geopolimer kompozitlerin performansına etkisini incelemiştir. Numuneler, dökümden 24 saat sonra kalıplardan çıkarılıp 22°C 'lik kirece doymuş su kürüne tabi tutulmuştur. Bağlayıcı olarak metakaolin kullanılmıştır. Polipropilen lif hazırlanan karışımlara metakaolinin ağırlıkça %0.3, %0.5 ve %1'ine tekabül eden oranlarda ilave edilmiştir. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı ise 2, 2.5 ve 3.0 olmak üzere üç farklı oranda ayarlanmıştır. Üretilen numunelerin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su emme oranı ve elektrik direnci değerlerine bakılmıştır. Deney sonuçlarına göre $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının 2'den 3'e çıkarılması, örneklerin basınç dayanımını %10 oranında arttırmıştır. Ağırlıkça %1 oranında katılan polipropilen liflerin varlığı ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının 3 olduğu durumda, geopolimer betonun mekanik özellikleri, mikroyapısı ve durabilite özelliklerinin arttığı tespit edilmiştir. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının 2'den 2.5'e yükseltilmesiyle, su emme yüzdesi %17, %15 ve %13'e kadar belirgin bir şekilde azalmıştır. Deneysel özelliklerdeki değişiklikler, SEM görüntüleri ile desteklenmiştir. %0.3, %0.5 ve %1 polipropilen lif içeren ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının 2.5 olduğu numunelerin elektriksel direnci, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 2 olan numunelere benzer şekilde, sırasıyla %94, %91 ve %80 oranında artmıştır.

Peng vd., (2019) yaptıkları çalışmada geopolimer betonun performansını daha iyi anlamak için, geopolimerik betondaki ara yüzey bölgesinin mikroyapısını ve özelliklerini incelemiştir. Geopolimer sentezi için ham madde olarak ağırlıkça %60 oranında metakaolin ve %40 oranında öğütülmüş granüle YFC kullanılmıştır. Aktivasyon çözeltileri olarak NaOH ve Na_2SiO_3 solüsyonu kullanılmıştır. Hazırlanan geopolimer karışımların silis modülü 1.4, 1.6, 1.8 ve 2.0 olmak üzere 4 farklı oranda tutulmuştur. Geopolimer karışımlardaki agrega tane çapı 10, 15, 20 ve 25 mm olacak şekilde 4 farklı şekilde kullanılarak, yapılan deneylere etkisi araştırılmıştır. Geopolimer hamur ile agrega arasındaki ara yüzey geçiş bölgesinin geopolimer ve granit agrega arasındaki morfolojisi ve mekanik özellikleri taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Deney sonuçları, geopolimer hamur ve agrega arasındaki bağ kuvvetinin, çimento hamuru ve agrega arasındakinden daha güçlü olduğunu göstermiştir.

Koushkbaghi vd., (2019) yaptıkları çalışmada, alümino-silikat kaynağı olarak metakaolin kullanarak doğal agreganın ise geri dönüştürülmüş agregayla ikame edilmesi ile elde edilen sonuçları araştırmışlardır. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranındaki ve geri dönüştürülmüş agrega yüzdesindeki artışın geopolimer betonun mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi

incelenmiştir. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 2, 2.5, 3.0 olarak ayarlanmıştır. Geri dönüştürülmüş agrega içeriği normal agreganın ağırlıkça %10, %20 ve %30'u oranında ilave edilmiştir. Geri dönüştürülmüş agrega kullanımının basınç dayanımını %28'e kadar azalttığını göstermiştir. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranındaki azalmanın geopolimer numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı ve su emme oranında azalmaya sebep olduğu deneylerle tespit edilmiştir.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Yüksek fırın cürufu ve özellikleri

Geopolimer beton üretiminde kullanılan YFC Karabük ilinden temin edilmiş olup, yeterli inceliğe sahip olduğundan dolayı öğütülmesine gerek kalmadan kullanılmıştır. Kullanılan YFC'nin özgül ağırlığı 2.86 g/cm^3 'tür. Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Kullanılan 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

3.1.2. Agregalar

Geopolimer beton numunelerin üretiminde doğal agregalar ve geri dönüştürülmüş agregalar olmak üzere iki çeşit agregalar kullanılmıştır. Kullanılan agregaların maksimum tane çapı her iki agregalar için 8 mm olarak seçilmiştir. Agregaların betondaki hacimce yüzdeleri ince agregalar için %60, iri agregalar için %40 olarak TS 802 (2016)'da yer alan optimum bölgeye uygun şekilde belirlenmiştir. (Şekil 3.1-3.2).

Bu tez çalışmasında kullanılan agregalardan alınan çeşitli numuneler üzerinde yapılan deneyler ve elde edilen sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

3.1.3. Aktivatörler

Yapılan deneylerle üretilen geopolimer karışımları aktive etmek için sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) çözeltileri kullanılmıştır. Seçilen konsantrasyonda (10 mol) NaOH çözeltisi elde edebilmek için, saf su ile katı NaOH birlikte karıştırılarak

çözelti hazırlanmıştır. Deneylerde kullanılan aktivatörlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 1. Geri dönüştürülmüş agrega



Şekil 3. 2. Doğal agrega

Çizelge 3.2. Sodyum hidroksit ve sodyum silikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellikler	Sodyum Hidroksit	Sodyum Silikat
Molekül formülü	NaOH	Na ₂ SiO ₃
Molekül kütlesi (g/mol)	40.00	122.06
Renk	Beyaz	Beyaz
pH	13-14	-
Bağıl yoğunluk (g/cm ³)	2.13	1.38
Na ₂ O içeriği (%)	-	8.9
SiO ₂ içeriği (%)	-	27.5
H ₂ O içeriği (%)	-	63.6

3.1.4.Aletler

3.1.4.1.Elekler

Geopolimer beton karışımlarında kullanılan agregalar TS ISO 3310-2 (2015)'ye uygun olacak şekilde 4 mm ve 8 mm göz açıklıklı elekler yardımıyla elenerek kullanılmıştır.

3.1.4.2. Çelik kalıplar

Elde edilen geopolimer numune örneklerini yerleştirmek üzere, Şekil 3.3'de gösterilmiş olan 50x50x50 mm boyutlu çelik kalıplar kullanılmıştır.



Şekil 3. 3. Çelik kalıplar

3.1.4.3.Beton karıştırma mikseri

Şekil 3.4'te gösterilen UTEST markalı, çeşitli hızlarda karıştırma özelliklerine sahip beton karışım mikseri geopolimer beton örneklerini üretmek için kullanılmıştır.



Şekil 3. 4. Beton karışım mikseri

3.1.4.4.Çeneli Kırıcı

Geri dönüştürülmüş agrega elde etmek üzere kullanılmış beton parçaları laboratuvar ortamında; ilk önce çeneli kırıcıdan geçirilerek daha ufak hale getirilmiş, sonra istenilen boyutlarda elde etmek üzere 4 mm ve 8 mm çaplı eleklerden elenmiştir. Kullanılan çeneli kırıcı Şekil 3.5’te gösterilmektedir.



Şekil 3. 5. Çeneli kırıcı

3.1.4.5. Etüv

Geopolimer karışımları hazırlamak için kullanılan doğal ve geri dönüştürülmüş agregaların hem özgül ağırlık değerlerinin belirlenmesi amacıyla, hem de su emme oranı deneylerinde etüv kullanılmıştır. Ayrıca üretilen geopolimer numunelerin kür edilmesi sürecinde (80°C'lik sıcaklık kürü) numuneler etüvde 24 saat süreyle tutulmuştur. Şekil 3.6'da gösterilen etüv kullanılmıştır.



Şekil 3. 6. Etüv

3.1.4.6. Hassas terazi

Karışımlarda kullanılan agregaların ve eklenen diğer malzeme ağırlıkları için ve numunelere uygulanan deney aşamalarında ağırlık değişimi, kılcal geçirimsizlik, su emme oranı gibi parametrelerin belirlenmesi için geopolimer numunelerin ağırlık ölçümlerinde Şekil 3.7'de görülen 0.01 g hassasiyetteki terazi kullanılmıştır.



Şekil 3. 7. Hassas terazi

3.1.4.7. Ultrases geçiş hızı (UPV) ölçüm cihazı

Şekil 3.8’de gösterilen UPV ölçüm cihazı hazırlanan geopolimer örneklerin nispeten düz olan karşılıklı iki yüzeyine jel sürüldükten sonra ses dalgası gönderilerek tahribatsız yöntemle dayanım belirleme yönteminde araç olarak kullanılmıştır.



Şekil 3.8. UPV ölçüm aleti

3.1.4.8. Basınç dayanım cihazı

50x50x50 mm boyutundaki geopolimer beton örneklerinin basınç dayanımlarını belirlemek üzere Şekil 3.9’da verilen 3000 kN yükleme kapasitesine sahip tek eksenli basınç dayanım cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.9. Basınç dayanım cihazı

3.1.4.9. Yüksek sıcaklık fırını

Üretilen geopolimer beton numunelerin yangın dayanımını belirlemek üzere sırasıyla numuneler 100, 200, 400, 600, 800°C'lik yüksek sıcaklıklara 1 saat süreyle maruz bırakılmıştır. Bu amaçla Şekil 3.10'da gösterilmiş olan yüksek sıcaklık fırını kullanılmıştır.



Şekil 3.10. Yüksek sıcaklık fırını

3.2. Yöntem

Bu bölümde; kullanılan agregaların özelliklerinin belirlenmesi açısından kullanılan çeşitli yöntemlerden söz edilmiştir. Ayrıca hazırlanan geopolimer numunelerin karışım oranlarının belirlenmesi, numunelerin bakımı ve kür edilmesi süreci ile sertleşmiş beton deneylerinde kullanılan yöntemler ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

3.2.1. Agregada deneylerinde uygulanan yöntemler

Geopolimer beton karışımı elde etmek üzere doğal agrega olarak maksimum tane çapı 8 mm olan dere agregası ve maksimum tane boyutu 4 mm olan doğal kum kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan dere agregası için agrega özelliklerini belirlemek açısından numune alınmasında TS EN 932-2 (1999)'de belirtilen çeyrekleme yöntemi kullanılmıştır.

Çeyrekleme metodunda belirtildiği şekilde, kullanılacak tüm malzemeyi temsil etmesi açısından malzeme yığınının tümünden alınan numuneler düz yüzeyli bir zemine çapı yüksekliğinin dört katı kadar olacak şekilde bir daire oluşturularak yerleştirilmiştir. Oluşturulan dairesel malzeme yığını kürek yardımıyla dört eşit parçaya bölünerek karşılıklı iki parçası atılmış ve yapılacak deneyler için yeterince numune kalıncaya dek çeyrekleme işlemi sürdürülmüştür. Karışımlarda kullanılan dere agregasının tane çapı dağılımı TS EN 933-1 (2015)'e göre seçilmiştir.

Geri dönüştürülmüş agregalar ise, basınç dayanımı bilinen normal beton numunelerin deneyleri yapıldıktan sonra çeneli kırıcı ile kırılıp istenilen çapta olması için 8 mm ve 4 mm delik çaplı eleklerden elenerek doğal agregalarla aynı granülometriye getirilmesi sağlanmıştır.

Hazırlanan geopolimer karışımlarda kullanılan doğal ve geri dönüştürülmüş agreganın en büyük tane büyüklüğü 8 mm'dir. 0-4 mm arası ince agrega olarak, 4-8 mm arası kaba agrega olarak seçilmiştir. Agregaların geopolimer betondaki hacimce yüzdeleri iri agrega için %40, ince agrega için %60 olarak TS 802 (2016)'ya uygun şekilde belirlenmiştir.

Agrega numunelerine uygulanan deneyler 3'er kez yapılarak elde edilen sonuçların aritmetik ortalamaları alınmıştır. Deney sonuçları Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

3.2.2. Geopolimer beton karışım oranlarının belirlenmesi

Hazırlanan geopolimer beton karışımları için bağlayıcı olarak YFC seçilmiştir. YFC dozajı ise 400 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Karışımlarda agregalar olarak, doğal agregalar ve geri dönüştürülmüş agregalar kullanılmıştır. Doğal agregalar yerine %0, %25, %50, %75 ve %100 oranında geri dönüştürülmüş agregalar kullanılan geopolimer numunelere sırasıyla G0, G25, G50, G75 ve G100 kodları verilmiştir. 5 grup geopolimer beton karışımı hazırlanmıştır.. Literatür çalışmaları ve laboratuvarda yapılan kontrol deneyleri sonucu optimum silis modülü 1.5, NaOH çözeltisinin molaritesi 10M ve ağırlıkça sodyum oksit miktarı %10 olarak belirlenmiştir. Bu değerler çerçevesinde aktivatörlerin miktarı belirlenmiştir. Aktivatörler ve bağlayıcı hacimlerinin toplamının 1 m^3 'den çıkarılması ile toplam agregalar hacmi saptanmıştır. Çizelge 3.3'te hazırlanan geopolimer beton karışımlarındaki 1 m^3 geopolimer beton için malzeme miktarları gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Geopolimer karışımlarda kullanılan malzeme miktarları

Karışımlar		G0	G25	G50	G75	G100
YFC (kg)		400	400	400	400	400
Na ₂ SiO ₃ (kg)		218.18	218.18	218.18	218.18	218.18
NaOH (kg)		13.28	13.28	13.28	13.28	13.28
Su (kg)		33.2	33.2	33.2	33.2	33.2
Doğal agregalar, (kg)	0-4 mm	952.45	714.324	476.21	237.188	0
	4-8 mm	676.06	507.064	338.03	168.388	0
Geri dönüştürülmüş agregalar, (kg)	0-4 mm	0	223.81	447.29	670.944	894.61
	4-8 mm	0	161.346	323.9	485.85	647.8
Teorik Birim Hacim Ağırlık, kg/ m ³		2293.17	2271.20	2250.09	2227.03	2207.07

3.2.3.Geopolimer beton üretilmesi, numunelerin bakımı ve kür edilmesi

Geopolimer beton karışımında kullanılacak tüm malzemeler 0.1 g hassasiyetli terazide tartılmıştır. İlk başta alkali aktivatörler 5 dakika boyunca karıştırılıp sonrasında sırasıyla bağlayıcı madde olan YFC, ince agrega ve iri agrega beton karıştırma mikserine eklenerek karıştırılmıştır.

Üretilen geopolimer karışımlar 50x50x50 mm boyutlu kalıplara döküldükten sonra, karışımların kalıba düzgün bir şekilde yerleşmesi sağlanmıştır. Daha sonra kalıplar alüminyum folyo ile sarılarak 24 saat süreyle 80°C'lik sıcaklıktaki etüve yerleştirilmiştir. Bir sonraki aşama olarak kalıplardan çıkartılan numuneler 27 gün süreyle 23±1°C sıcaklıktaki kür havuzuna yerleştirilmiştir (Şekil 3.11). Hazırlanan geopolimer numuneler Şekil 3.12'de gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Numunelerin kür edilmesi



Şekil 3.12. Geopolimer numuneler

3.2.4. Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler

Bu tez çalışması kapsamında üretilen geopolimer beton numuneler üzerinde basınç dayanımı, su emme oranı, ağırlık kaybı, kılcal geçirimsizlik ve yangın dayanımı değerleri incelenmiştir. Elde edilen deney verileri, kontrol numunelerinin ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

3.2.4.1. Basınç dayanımı

Geopolimer beton numunelerin basınç dayanımının belirlenmesi amacıyla TS EN 12390-3 (2019) test metodu kullanılmıştır. Numuneler test cihazına yerleştirilmeden önce cihazdaki yükleme başlıklarının yüzeyleri silinip temizlenmiştir. 50x50x50 mm boyutlu geopolimer numuneler basınç dayanım cihazına, numunelere uygulanacak yükün yönü beton döküm yönüne dik olacak biçimde yerleştirilmiştir. Numuneler cihaza yerleştirildikten sonra cihaz ekranından yükleme hızı 1.40 kN/s olarak seçilmiştir.

Numunelerin basınç dayanımı Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Basınç dayanımını belirlemek için her numuneden üç adet üretilmiştir ve bu üç numunenin aritmetik ortalaması alınarak dayanım değerleri bulunmuştur.

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

F_c : Basınç dayanımı, MPa.

P : Kırılma anındaki en büyük yük, N.

A_c : Numunenin, yük uygulanan yüzeyinin en kesit alanı, mm².

3.2.4.2. Su emme oranı tayini

Su emme oranı deneyi, TS 12390-7(2010)'da belirtilen şekilde yapılmıştır. Deney sonuçları karışımlardaki her 3 numunenin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. İlk olarak geopolimer numunelerin 24 saat boyunca etüvde kuru ağırlığa gelmesi sağlanmış ve daha sonra oda sıcaklığına gelen numunelerin ağırlıkları ölçülmüştür. Ağırlıklar arasındaki fark en küçük olan ağırlığın %0.2'sinden az olduğu takdirde numunenin etüv kurusu ağırlıkta olduğu kabul edilir. Ardından etüv kurusu halindeki numuneler 23±1°C sıcaklıktaki kür havuzunda bekletilip, sudan çıkarıldıktan sonra üzerindeki su havlu yardımıyla alınıp tartılarak ıslak ağırlığı belirlenmiştir. Sonrasında numuneler tekrar 24 saat süre ile kür havuzunda bekletilerek havuzdan çıkarılıp yüzeyi kurulanmıştır. Numuneler tartılıp birbirini izleyen iki ölçüm arasındaki fark büyük olan ağırlığın %0.2'sinden az olduğunda numunelerin doymun kuru yüzey ağırlığa geldiği kabul edilmektedir.

Geopolimer numunelerin yangın sonrasındaki su emme oranı belirlenirken de yukarıda gösterilen metot kullanılmıştır. Yalnızca fırından çıkarılan numuneler tekrar etüvde kurutulmak yerine oda sıcaklığına getirilerek ağırlıklarına bakılmıştır.

Numunelerin ağırlıkça su emme oranı (m_1), etüv kurusu ağırlık (A) ve doymun kuru yüzey ağırlık (B) olmak üzere Denklem 3.2 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$m_1 = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (3.2)$$

3.2.4.3. Ultrases geçiş hızının (UPV) belirlenmesi

Ultrases geçiş hızı deneyi ASTM C597'de belirtilen şekilde yapılmıştır. Ölçüm yapmadan önce UPV cihazının kalibrasyonu yapılmaktadır. Numunelerin karşılıklı düzgün olan yüzeylerine ultrason jeli sürüldükten sonra cihazın uçları vasıtasıyla ses dalgası

gönderilerek ölçüm yapılır. Her numune için 3 defa UPV ölçümü yapılarak bu sonuçların aritmetik ortalaması alınmaktadır. Yapılan UPV ölçümleri Denklem 3.3 kullanılarak belirlenmiştir.

$$v=l/t \quad (3.3)$$

v: Ses dalga hızı, (m/s).

l: Pundit yüzeyleri arası mesafe, (m).

t: Geçiş süresi, (s).

3.2.4.4.Ağırlık kaybı

Numunelerde yüksek sıcaklık etkisi ile meydana gelen deformasyonları belirlemek amacıyla parametrelerden biri olarak ağırlık kaybı deneyi seçilmiştir. Bir numunenin ağırlık kaybını bulmak için yüksek sıcaklık öncesi ve sonrasında 0.01 g hassasiyetteki terazide tartılmış ve bu iki ağırlık arasındaki farkın 100'e oranlanmasıyla ağırlık kaybı hesaplanmıştır.

Deney sonuçları her 3 numunenin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Birim ağırlık kaybı, Denklem 3.4 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{Ağırlık kaybı (\%)} = \left[\frac{(W-W_0)}{W_0} \right] \times 100 \quad (3.4)$$

W_0 : Numunenin başlangıçtaki ağırlığı, g.

W: Numunenin yangına maruziyet sonrası ağırlığı, g.

3.2.4.5.Kılcal geçirimsizlik deneyi

Kılcal geçirimsizlik deneyi ASTM C1585'e uygun şekilde yapılmıştır. Deney için numuneler 24 saat boyunca etüvde $105 \pm 5^\circ\text{C}$ bekletilmiştir. Ardından numunelerin yan yüzeylerinin su geçirmemesi için suya dayanıklı bir bantla numunelerin kenarları iyice sarılmıştır ve numuneler alt yüzeylerinden 5 mm suya temas edecek şekilde hazırlanan düzeneğe konulmuştur (Şekil 3.13). Aynı anda kronometre başlatılıp numuneler 5, 15, 30, 60 ve 1440 dakikalık süreler sonrasında yüzeylerindeki su bir havlu ile silinip 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 3.5 kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca deney sonuçları her üç numunenin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Geopolimer beton numunelerin yangın sonrasındaki kılcal geçirimlilik değerleri belirlenirken yukarıda verilen yöntem kullanılmıştır.

$$Q^2 = k \cdot t \quad (3.5)$$

Q: birim alanda emilen su miktarı, ($\text{cm}^3 / \text{cm}^2$).

k: kılcal geçirimlilik katsayısı, (cm^2 / s).

t: süre, (s).



Şekil 3.13. Kılcal geçirimlilik deneyi düzeneğindeki numuneler

3.2.4.6. Yangın dayanımı

Geopolimer numuneler 28. gün kür havuzundan çıkarıldıktan sonra yangın dayanımlarını belirlemek amacıyla her grup karışımdan 45 numune alınarak fırında bir saat süreyle bekletilmek üzere 100, 200, 400, 600 ve 800°C sıcaklıklara kadar ısıtılmıştır. Yüksek sıcaklık fırınından çıkarılan numuneler havada, suda ve fırında soğutma olmak üzere üç farklı şekilde soğutmaya maruz bırakılmıştır. Havada soğutmada, her numunenin tüm yüzeyinin havayla temasını sağlamak amacıyla numuneler fırından çıkarılıp dışarda soğumaya bırakılmıştır (Şekil 3.14). Suda soğutmada, fırından çıkarılan numuneler içerisinde su bulunan kaba konulmuş ve oda sıcaklığına gelene kadar su içinde bırakılmıştır (Şekil 3.15). Fırında soğutmada ise, numuneler yüksek sıcaklık sonrası

fırından çıkarılmayıp, fırının düşen sıcaklığıyla birlikte kendiliğinden yavaş yavaş soğumaya bırakılmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3. 14. Havada soğumaya bırakılan numuneler



Şekil 3. 15. Suda soğumaya bırakılan numuneler



Şekil 3.16. Fırında soğumaya bırakılan numuneler

Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan geopolimer numuneler yukarıda verilen üç soğutma işlemi uygulanıp oda sıcaklığına getirildikten sonra basınç dayanımı, UPV, kılcal geçirimsizlik, su emme ve ağırlık kaybı deneylerine tabii tutulmuşlardır. Elde edilen deney verileri aynı karışım oranına sahip olan ve geri dönüştürülmüş agrega içermeyen numunelerle karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Agregada Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma

Geopolimer karışımları hazırlamak için kullanılan hem doğal agregada, hem de geri dönüştürülmüş agregaların özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde kuru özgül ağırlık, görünen özgül ağırlık, doymuş yüzey kuru özgül ağırlık, ve su emme oranı değerleri ince ve iri agregalar için ayrı ayrı belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçları doğal agregalar için Çizelge 4.1’de, geri dönüştürülmüş agregalar için ise Çizelge 4.2’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında geri dönüştürülmüş agreganın özgül ağırlık değerlerinin doğal agregaya göre daha az olduğu, su emme oranlarının ise daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. Doğal agreganın özgül ağırlık ve su emme oranı

Özellik	Agrega, (mm)	
	0-4	4-8
Kuru özgül ağırlık, (g/cm ³)	2.40	2.59
Doymuş, kuru yüzey özgül ağırlık, (g/cm ³)	2.47	2.63
Görünen özgül ağırlık, (g/cm ³)	2.52	2.66
Su emme oranı, (%)	2.43	1.54

Çizelge 4.2. Geri dönüştürülmüş agreganın özgül ağırlık ve su emme oranı

Özellik	Agrega, (mm)	
	0-4	4-8
Kuru özgül ağırlık, (g/cm ³)	2.12	2.42
Doymuş, kuru yüzey özgül ağırlık, (g/cm ³)	2.32	2.52
Görünen özgül ağırlık, (g/cm ³)	2.40	2.55
Su emme oranı, (%)	6.96	4.50

4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma

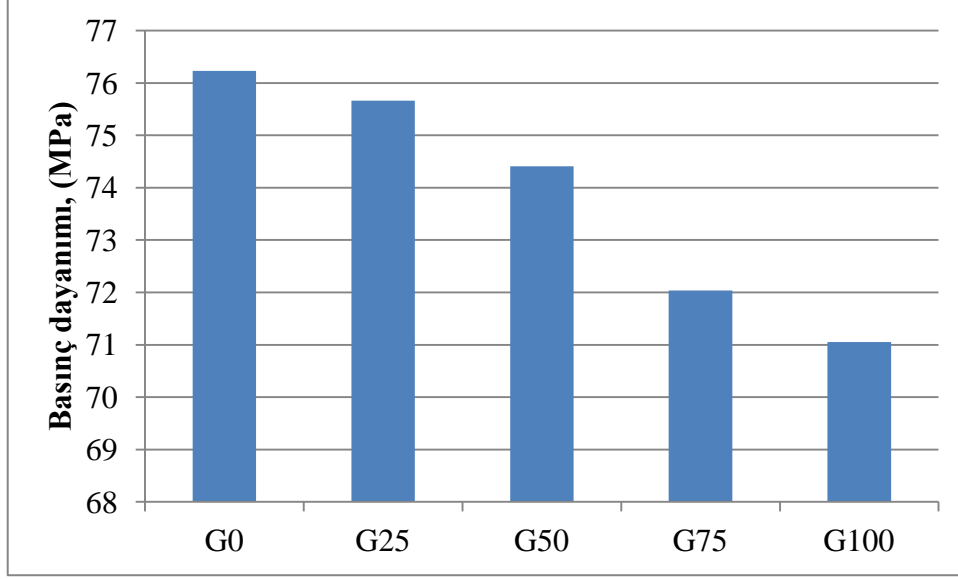
Hazırlanan geopolimer numunelerin materyal ve yöntem kısmında da bahsedildiği şekilde yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası basınç dayanımı ve UPV gibi bazı mekanik özellikleri ile kılcal geçirimsizlik, su emme oranı ve ağırlık kaybı gibi çeşitli fiziksel özellikleri incelenmiştir.

4.2.1. Geopolimer beton kontrol numunelerin basınç dayanımı

%0, %25, %50, %75 ve %100 olmak üzere 5 farklı oranda geri dönüştürülmüş agrega içeren geopolimer kontrol numunelerin 28 günlük basınç dayanımları ölçülmüştür. Numunelerin basınç dayanım değerleri Çizelge 4.3 ve Şekil 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4. 3. Geopolimer kontrol numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri

Karışım adı	Basınç Dayanımı, (MPa)
G0	76,23
G25	75,66
G50	74,41
G75	72,04
G100	71,05



Şekil 4. 1. Geopolimer kontrol numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri

28 günlük ve yangına maruz bırakılmamış geopolimer numunelerin basınç dayanım değerleri incelendiğinde, geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen geopolimer numuneler doğal agrega ile üretilmiş numunelere kıyasla %6,5-7'lere kadar varan oranda daha düşük basınç dayanımı göstermiştir. Dolayısıyla geopolimer numunelerdeki geri dönüştürülmüş agrega oranı arttıkça numunelerin basınç dayanımının azaldığı gözlenmiştir.

Aşağıdaki literatüre bakıldığında geri dönüştürülmüş agreganın basınç dayanımı üzerindeki etkisi görülmektedir. Sata vd.,(2013) tarafından yapılan deneylerin sonuçlarına göre, en düşük basınç dayanımı değerleri NaOH çözeltisinin 10M konsantrasyonda olduğu ve içerisinde geri dönüştürülmüş beton parçalarının bulunduğu numunelerde 7.0 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı değeri ise 15M NaOH çözeltisinin olduğu ve içerisinde normal agrega bulunan numunelerde 13.6 MPa olarak tespit edilmiştir. Nuaklong vd., (2016) geri dönüştürülmüş beton agregalarının geopolimerler üzerindeki etkisini inceledikleri deneysel çalışmaları sonucunda, geri dönüştürülmüş agrega içeren numunelerin basınç dayanım değerleri aynı karışım oranına sahip ve içerisinde geri dönüştürülmüş agrega olmayan numunelere kıyasla daha düşük çıkmıştır. Örneğin, 8M NaOH konsantrasyonuna sahip %100 oranında geri dönüştürülmüş agrega içeren ve içermeyen geopolimer numuneler sırasıyla 30.6 MPa ve 40 MPa dayanımda elde edilmiştir. Benzer şekilde, 16M NaOH çözeltisine sahip %100 geri dönüştürülmüş agrega içeren ve içermeyen geopolimer numunelerin dayanım değerleri sırasıyla 34.8 MPa ve 38.4 MPa olarak belirlenmiştir. Shaikh (2016), tarafından yapılan deneysel çalışma sonucunda 7

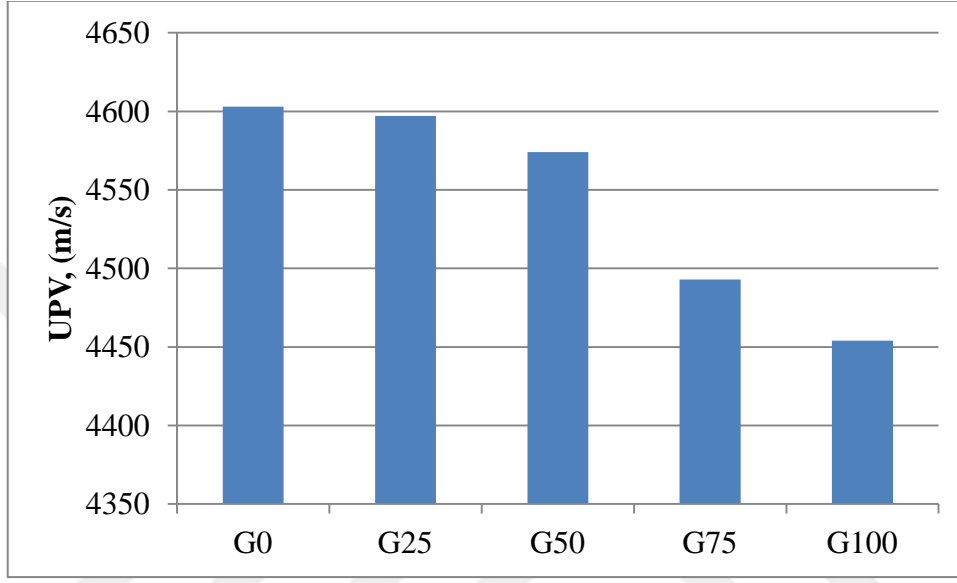
günlük maksimum basınç dayanımı 41.1 MPa olarak doğal agrega içeren numunelerde gözlenmiştir. Karışımdaki geri dönüştürülmüş agrega içeriği %15, %30 ve %50 olarak arttıkça basınç dayanım değerleri sırasıyla 40.6 MPa, 37.4 MPa ve 35 MPa olarak elde edilmiştir. Özcan (2018), yaptığı çalışmada bağlayıcı olarak YFC ve elazığ ferrokrom cürufu, karışımı aktif hale getirmek için NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltisi, agrega olarak ise dere agregası kullanmıştır. Hazırlanan geopolimer karışımın silis modülü 1.5, Na₂O içeriği %10 ve NaOH çözeltisi konsantrasyonu 10M olarak belirlenmiştir. Numunelerin basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, YFC oranındaki artışa bağlı olarak dayanım değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Meydana gelen bu artış YFC'nin yapısında bulunan silikat ve kalsiyum oranı içeriğinin fazla olmasına bağlanmıştır. Khaliq (2018), tarafından yapılan çalışmada geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen beton numuneleri aynı oda koşullarında normal agrega ile üretilmiş beton numunelere kıyasla %11 daha az basınç dayanımı göstermiştir. Hu vd., (2019) yaptıkları deneysel çalışmada uçucu külün ağırlıkça %30'u oranında granüle yüksek fırın cürufuyla ikame edilmiş geopolimer numuneler için; ağırlıkça %0, %50 ve %100 oranlarında geri dönüştürülmüş agrega içeren numunelerde basınç dayanımı değerlerini sırasıyla 52.3 MPa, 43.0 MPa ve 38.1 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu durum doğal agregayla karşılaştırıldığında geri dönüştürülmüş agreganın daha düşük dayanıma sahip olmasıyla ifade edilmiştir. Xie vd., (2019) yaptıkları çalışmada geri dönüştürülmüş agrega içeriğinin geopolimer numunelerin basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde, örneğin; granüle YFC/metakaolin oranı 1:1 olan grup için %0, %50 ve %100 oranında geri dönüştürülmüş agrega içeren karışımların basınç dayanımı değerleri sırasıyla 38.54 MPa, 35.6 MPa, 34.85 MPa olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, literatürde geri dönüştürülmüş agreganın basınç dayanımını azalttığı görülmektedir. Bu çalışmada da geri dönüştürülmüş agrega oranı arttıkça, basınç dayanımı değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.

4.2.2. Geopolimer beton kontrol numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri

Geopolimer numunelerin 28 günlük kür sonrası UPV değerleri ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda numunelerin ultrases geçiş hızı (UPV) değerleri tespit edilerek, Çizelge 4.4 ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 4. Geopolimer kontrol numunelerin UPV ölçüm değerleri

Karışım adı	G0	G25	G50	G75	G100
Kontrol	4603	4597	4574	4493	4454



Şekil 4. 2. Geopolimer kontrol numunelerin UPV ölçüm değerleri

UPV sonuçlarının numunelerin basınç dayanımı sonuçları ile paralellik gösterdiği görülmektedir. Maksimum UPV değeri G0 adlı geopolimer numunelerde 4603 m/s olarak ölçülürken, minimum UPV değeri ise G100 isimli numunelerde 4454 m/s olarak elde edilmiştir.

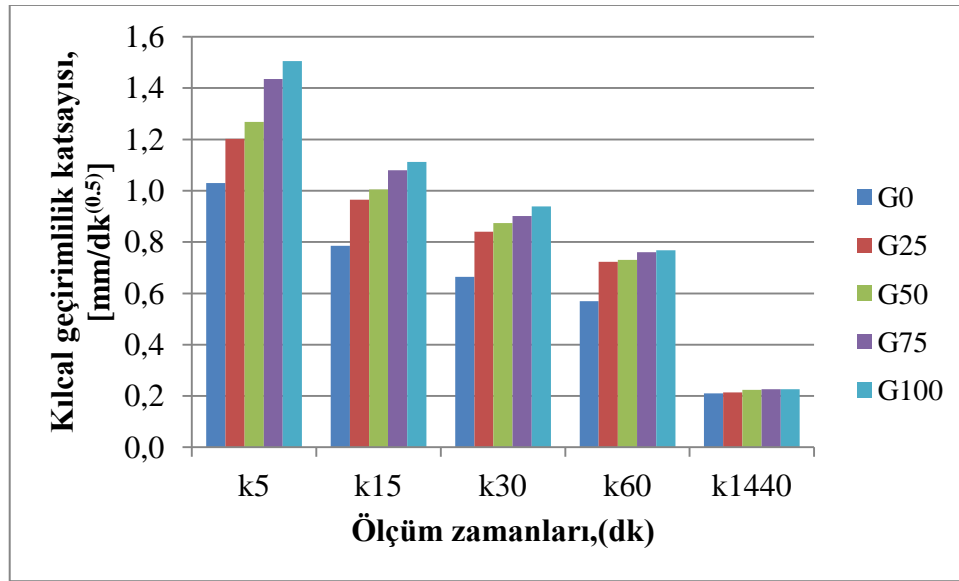
4.2.3. Geopolimer beton kontrol numunelerde kılcal geçirimlilik

Kılcal geçirimlilik deneyi sonucunda elde edilen veriler Çizelge 4.5’de gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre, kılcal su emme miktarlarının tüm karışımlar için 5, 15, 30, 60 ve 1440 dakikalık ölçüm zamanları boyunca toplamda giderek arttığı tespit edilmiştir. %0 oranda geri dönüştürülmüş agrega içeren G0 adlı numunelerde kılcal geçirimlilik katsayısının 5, 15, 30, 60 ve 1440 dakikalık ölçümler için sırasıyla 1.03, 0.79, 0.66, 0.57 ve 0.21 olmak üzere minimum değerlerde olduğu gözlenirken, içerdiği geri dönüştürülmüş

agrega oranı %100 olan G100 isimli numunelerde ise kılcal geçirimlilik katsayısının 5, 15, 30, 60 ve 1440 dakikalık ölçümler için sırasıyla 1.51, 1.11, 0.94, 0.77 ve 0.23 olmak üzere en yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Şekil 4.3'ten anlaşılacağı üzere karışımlara geri dönüştürülmüş agrega eklemenin kılcal geçirimlilik katsayısını arttırdığı söylenilebilir. Gözlenen bu durum, geri dönüştürülmüş agregaların doğal agregalara kıyasla daha fazla su emmesiyle açıklanabilir.

Çizelge 4. 5. Geopolimer beton kontrol numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısı değerleri

Karışım adı	Kılcal geçirimlilik katsayısı [mm/dk ^(0.5)]				
	k ₅	k ₁₅	k ₃₀	k ₆₀	k ₁₄₄₀
G0	1,03	0,79	0,66	0,57	0,21
G25	1,20	0,97	0,84	0,72	0,21
G50	1,27	1,00	0,87	0,73	0,22
G75	1,44	1,08	0,90	0,76	0,23
G100	1,51	1,11	0,94	0,77	0,23



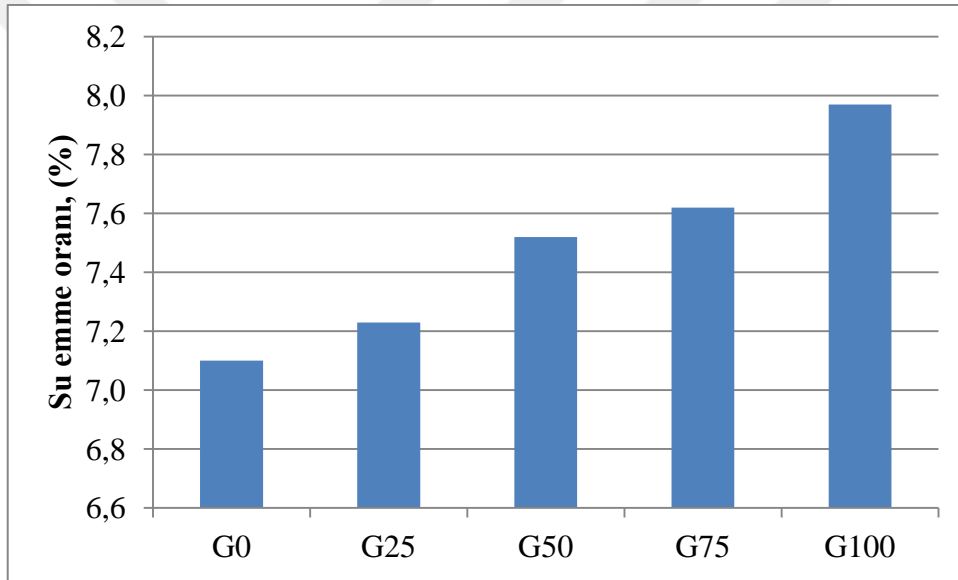
Şekil 4. 3. Farklı oranlarda geri dönüştürülmüş agrega içeren karışımlarda zamana bağlı kılcal geçirimlilik katsayısının değişimi

4.2.4. Geopolimer beton kontrol numunelerin su emme oranı

Geopolimer kontrol numunelerin su emme oranı değerleri Çizelge 4.6’da gösterilmektedir. Çizelgeden de anlaşılacağı gibi su emme oranı geri dönüştürülmüş agrega içeriğine paralel şekilde artış göstermektedir.

Çizelge 4. 6. Kontrol numunelerin su emme oranları

Karışım adı	G0	G25	G50	G75	G100
Kontrol	7,10	7,24	7,52	7,62	7,97



Şekil 4. 4. Kontrol numunelerin su emme oranları

Şekil 4.4’teki grafik incelendiğinde su emme oranının en düşük değeri, geri dönüştürülmüş agrega içermeyen geopolimer numunelerde %7,10 olarak elde edilirken, karışımlardaki geri dönüştürülmüş agrega oranının artmasıyla birlikte su emme oranı da artış göstermiştir. Örneğin; en yüksek su emme oranı %100 oranında geri dönüştürülmüş agrega içeren numunelerde %7,97 olarak tespit edilmiştir.

Shaikh (2016), çeşitli oranlarda geri dönüştürülmüş agrega içeren geopolimer betonların mekanik ve dayanıklılık özelliklerini incelediği deneysel çalışması sonucunda su emme oranı, kılcal geçirimsizlik ve klorür penetrasyon derinliği en fazla olan numunenin %50

oranında geri dönüştürülmüş agrega içeren geopolimer numunelerde olduğunu belirlemiştir. Nuaklong vd., (2018) yaptıkları çalışmada kırılmış laboratuvar numunelerinden elde edilen geri dönüştürülmüş iri agrega (%0 ve %100) içeren betonlarda, metakaolin ikamesinin uçucu kül bazlı geopolimerlerin özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Eşit oranda metakaolin içeren geopolimer karışımlarda porozite ve su emme oranı değerleri geri dönüştürülmüş agregayla üretilen numunelerde doğal agregayla üretilenlere kıyasla daha fazla olmuştur. Çünkü sertleşmiş betonda geçirgen gözeneklerin bulunmasının, betonun su emilimini güçlü bir şekilde tetiklediği gözlemlenmiştir. Hu vd., (2019) geri dönüştürülmüş agrega içeren uçucu kül ve öğütülmüş granüle YFC kombinasyonu tabanlı geopolimer karışımların özelliklerini araştırdığı deneysel çalışmalar sonucunda su emme oranının geri dönüştürülmüş agregadaki artışa paralel olarak arttığı gözlemlenmiştir. Örneğin; uçucu külün ağırlıkça %10'u oranında granüle yüksek fırın cürufuyla ikame edilmiş geopolimer numuneler için; ağırlıkça %0, %50 ve %100 oranlarında geri dönüştürülmüş agrega içerenlerde su emme oranı %5.76, %7.63 ve %9.41 olarak tespit edilmiştir.

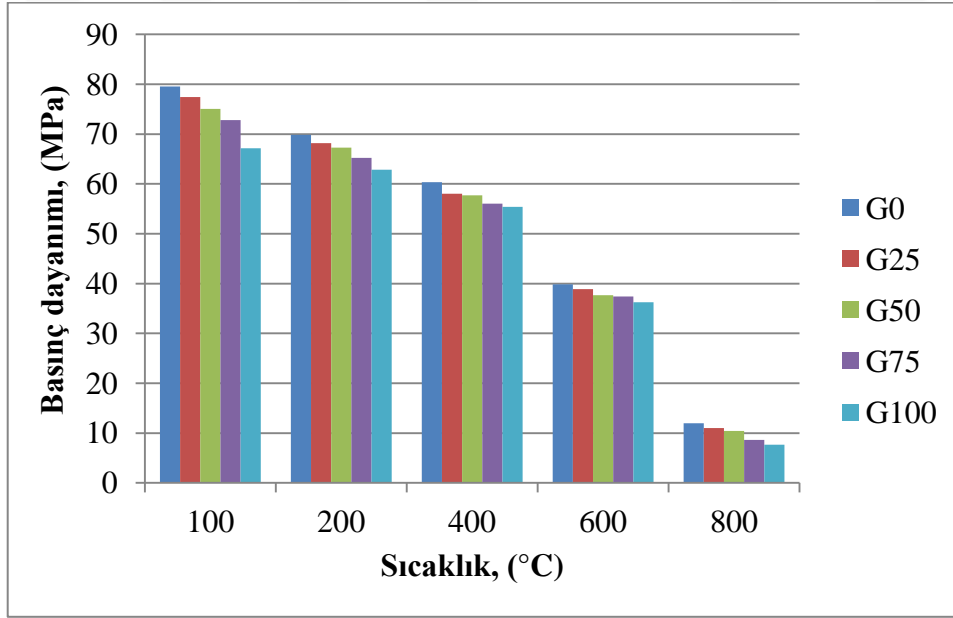
4.2.5. Geopolimer beton numunelerin yangın sonrası basınç dayanımı

Geopolimer numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı değerlerindeki değişimler, numunelere uygulanan üç farklı soğutma koşulu (havada, suda ve fırında soğutma olmak üzere) göz önünde bulundurularak yorumlanmak üzere Çizelge 4.7-9'da verilmiştir ve Şekil 4.5-7 'deki grafikte belirtilerek gösterilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde havada soğumaya bırakılan numunelerdeki, en yüksek basınç dayanımı değeri G0 adlı numunelerde ve 100°C sıcaklıkta 71,10 MPa olarak elde edilirken, en düşük basınç dayanımı değeri ise G100 adlı numunelerde 800°C'de 6,35 MPa olarak tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklığın dayanım üzerindeki negatif etkisi havada soğuyan numunelerde 600°C sıcaklıktan sonra belirgin olarak ortaya çıkmıştır.

Çizelge 4. 7. Yangın sonrası havada soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri

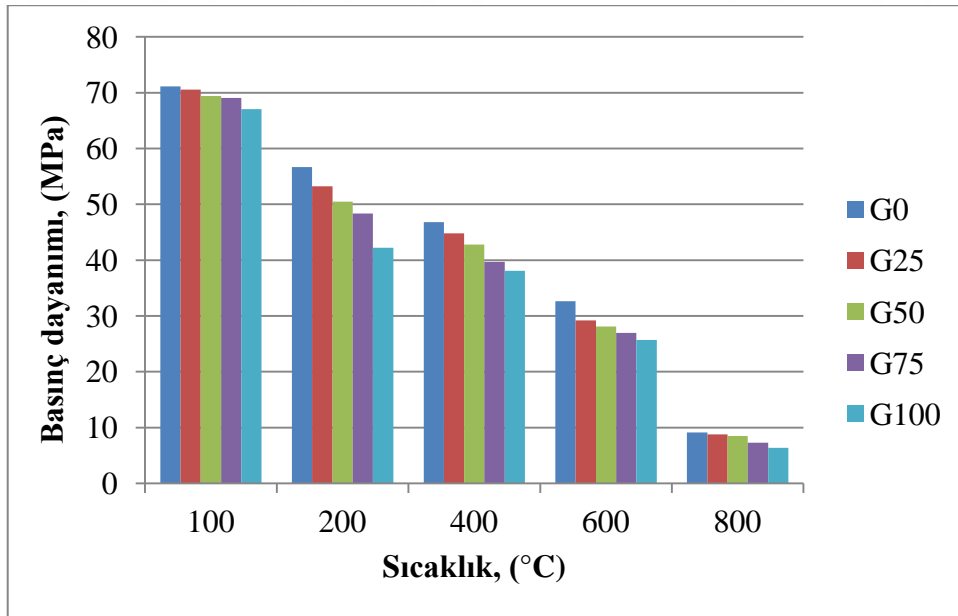
Havada soğuyanlar	Basınç Dayanımı, (MPa)				
Sıcaklık (°C)	G0	G25	G50	G75	G100
100	79,52	77,43	75,05	72,79	67,14
200	69,85	68,17	67,30	65,24	62,85
400	60,32	58,04	57,71	56,05	55,36
600	39,86	38,87	37,63	37,42	36,25
800	11,93	11,02	10,42	8,63	7,65



Şekil 4. 5. Yangın sonrası havada soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri

Çizelge 4. 8. Yangın sonrası suda soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri

Suda soğuyanlar	Basınç Dayanımı, (MPa)				
	G0	G25	G50	G75	G100
Sıcaklık (°C)					
100	71,10	70,53	69,42	69,08	67,05
200	56,64	53,20	50,46	48,33	42,21
400	46,80	44,80	42,80	39,70	38,10
600	32,65	29,20	28,10	26,95	25,70
800	9,13	8,79	8,47	7,26	6,35



Şekil 4. 6. Yangın sonrası suda soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri

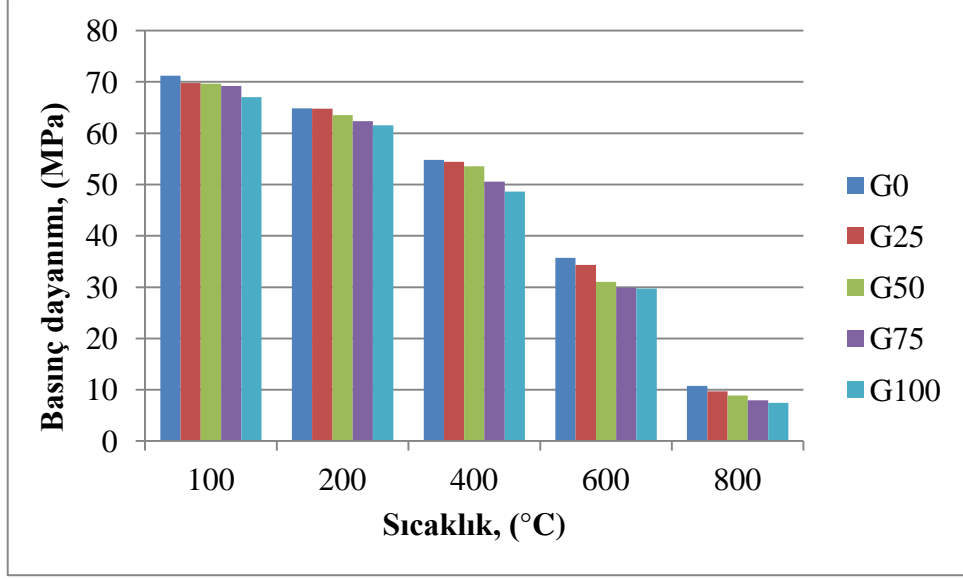
Suda soğumaya bırakılan numunelerde, en yüksek basınç dayanımı değeri G0 adlı numunelerde 100°C sıcaklıkta 71,10 MPa olurken, buna karşın en düşük basınç dayanımı

değeri ise G100 adlı numunelerde 800°C sıcaklıkta 6,35 MPa olarak tespit edilmiştir. Grafikteki verilere dayanarak, suda soğuyan numunelerin hidrate olmuş kısmı bozulmaya uğradığı için basınç dayanımı değerlerinin, aynı sıcaklıkta her grup numune için havada soğutulan numunelere kıyasla daha düşük değerlerde olduğu belirlenmiştir.

Ayrıca, 800°C sıcaklık etkisinden sonra suda soğumaya bırakılan numunelerde numune içeriğindeki geri dönüştürülmüş agrega yüzdesi arttıkça, numunelerde çatlama ve dağılmalar gözlenmiştir. Özellikle G75 ve G100 adlı numunelerin bir kısmında, yüksek sıcaklık ve suda soğutma sonrası oluşan dağılmalar sonucu meydana gelen deformasyonlar ve numune bütünlüğünün tamamen bozulduğu görülmüştür.

Çizelge 4. 9. Yangın sonrası fırında soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri

Fırında soğuyanlar	Basınç Dayanımı, (MPa)				
Sıcaklık (°C)	G0	G25	G50	G75	G100
100	71,22	69,75	69,68	69,23	67,05
200	64,82	64,78	63,53	62,34	61,52
400	54,83	54,45	53,54	50,59	48,65
600	35,71	34,37	31,05	29,91	29,74
800	10,79	9,68	8,87	7,92	7,43

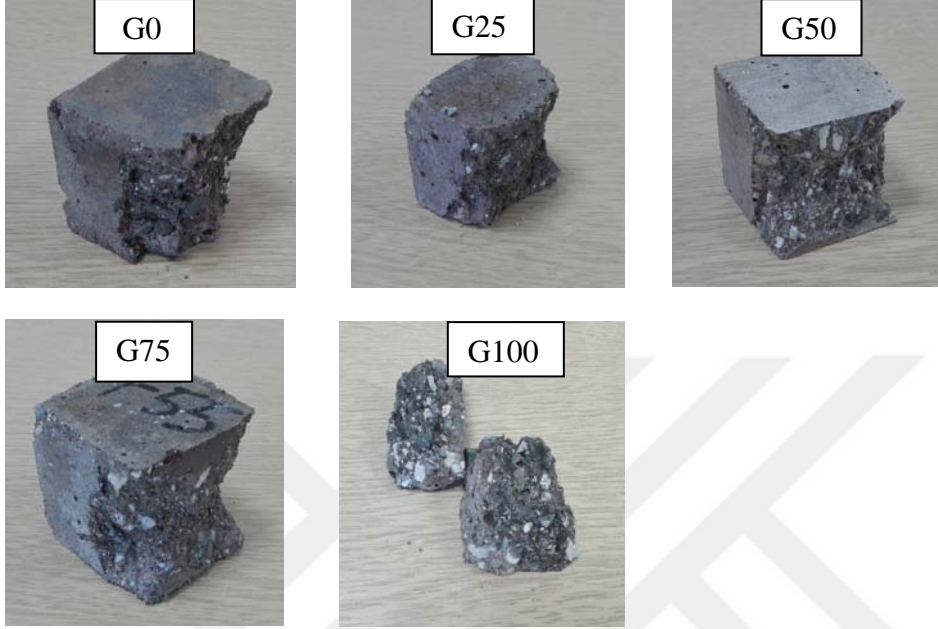


Şekil 4. 7. Yangın sonrası fırında soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri

Grafikteki veriler göz önüne alındığında, yangın sonrası fırında soğumaya bırakılan numuneler için en yüksek basınç dayanımı değeri diğer iki soğutma şekline paralel olarak 100°C sıcaklıkta G0 isimli numunelerde ve 71,22 MPa olarak elde edilmiştir. Sıcaklık yükseldikçe numunelerin dayanım değerlerinin giderek azaldığı tespit edilmiştir. Buna ilaveten yüksek sıcaklığın olumsuz etkisi 600°C'den itibaren meydana gelmiştir ve numunelerin dayanımlarında belirgin düşüşler meydana geldiği belirlenmiştir. Deney verilerine dayanarak, suda soğutulan numunelerin dayanım değerlerinin aynı karışım grupları için havada soğuyan ve fırında soğuyan numunelere göre, çoğunlukla daha düşük çıkması, suda soğutmanın numuneler üzerindeki ilk olumsuz etkisi olarak tanımlanabilir. İkinci olumsuz etkisi ise, suda soğuyan numunelerde sıcaklık yükseldikçe ve geri dönüştürülmüş agrega yüzdesi arttıkça numunelerin yüzeyinde gözlenen çeşitli deformasyonlardır.

Yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıkça ve geopolimer karışımlardaki geri dönüştürülmüş agrega yüzdesi arttıkça suda soğutulan numunelerde agregalar ile geopolimer hamur arasındaki termal uyumsuzluk nedeni ile oluşan çatlamlar sonucu numune bütünlüğü bozulmuş olup basınç dayanım değerleri azalmıştır. Geri dönüştürülmüş agregaların su emme yüzdesi nispeten daha fazladır. Bu nedenle de yangın sonrası suda soğumaya bırakılan numunelerde hidrasyona uğramış yapı bozulur ve geri dönüştürülmüş agregalar daha fazla su emerek betonda gözenekli yapı oluşturabilir. Bu durum betonda

birtakım büzülme ve genleşmeler meydana getirip dayanımı ve diğer mekanik özellikleri olumsuz etkiler. Dolayısıyla Şekil 4.8'deki gibi dayanım testi sonrasında numunelerde dağılma ve parçalanmalar oluşabildiği görülmüştür.



Şekil 4. 8. 800°C'lik sıcaklıktan sonra suda soğumaya bırakılan numunelerin görüntüleri

Kong ve Sanjayan (2008), yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda hazırladıkları geopolimer beton örneklerinin sıcaklığa maruz kaldıktan sonra yaklaşık olarak %65'lik oranda basınç dayanımı kaybı gösterdiğini belirtmişlerdir. Baradaran-Nasiri ve Nematzadeh (2017), tarafından yapılan deneysel çalışmalara göre geri dönüştürülmüş agrega ile hazırlanan tüm numune gruplarının basınç dayanımının sıcaklık artışı ile maksimum %61'lik orana kadar azaldığı sonucuna varılmıştır. Salahuddin vd., (2019), tarafından yapılan deney sonuçları geri dönüştürülmüş agrega içeren betonun basınç dayanımının, herhangi bir maruz kalma sıcaklığında geri dönüştürülmüş agrega yüzdesindeki artış ile azaldığı tespit edilmiştir.

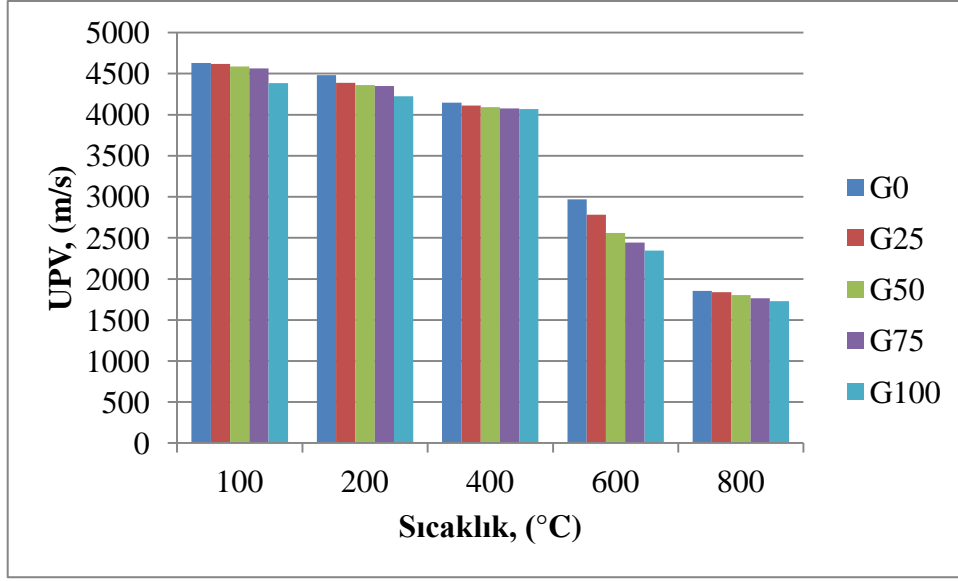
4.2.6.Geopolimer beton numunelerde yangın sonrası UPV ölçüm değerleri

Numunelerin yangına maruziyet sonrası UPV ölçüm değerleri, uygulanan üç soğutma koşulu (havada, suda ve fırında soğutma olmak üzere) göz önünde bulundurularak Çizelge 4.10-12 ve Şekil 4.9-11’de gösterilmiştir.

100°C’den 800°C sıcaklığa kadarki UPV değerleri incelendiğinde, aynı sıcaklıkta bulunan 5 grup karışım için UPV değerleri G0, G25, G50, G75 ve G100 adlı numuneler için sırasıyla giderek azalmıştır. Örneğin; sıcaklık 100°C’den 200°C’ye yükseldiğinde G0, G25, G50, G75 ve G100 isimli numuneler için sırasıyla UPV değerleri %3.19, %4.98, %4.90, %4.68 ve %3.62 oranında azalma göstermiştir.

Çizelge 4. 10. Yangın sonrası havada soğumaya bırakılan numunelerin UPV ölçüm değerleri

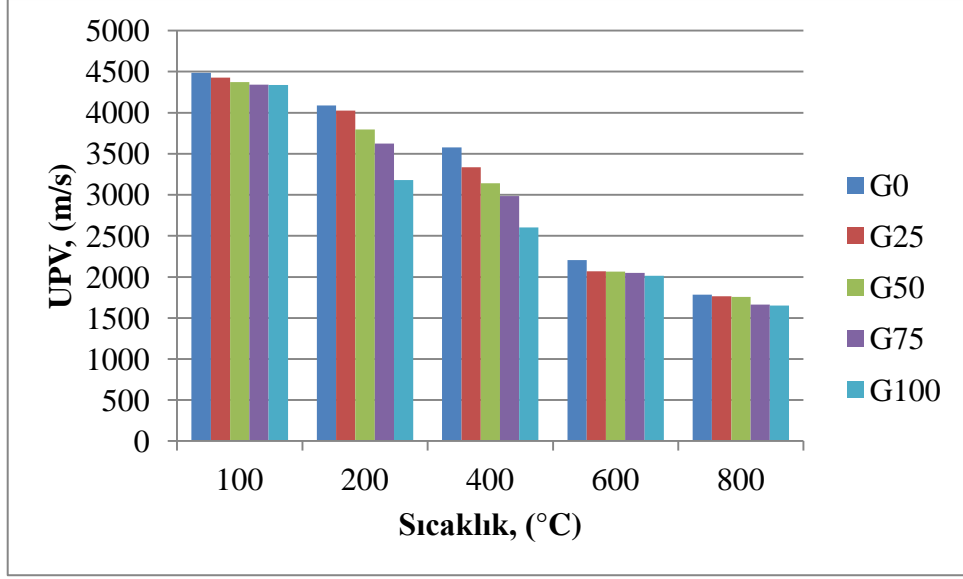
Havada soğuyanlar	UPV (m/s)				
Sıcaklık (°C)	G0	G25	G50	G75	G100
100	4630	4617	4588	4563	4384
200	4482	4387	4363	4349	4225
400	4146	4113	4091	4075	4069
600	2970	2782	2561	2441	2347
800	1852	1837	1805	1763	1730



Şekil 4. 9. Yangın sonrası havada soğumaya bırakılan numunelerin UPV ölçüm değerleri

Çizelge 4. 11. Yangın sonrası suda soğumaya bırakılan numunelerin UPV ölçüm değerleri

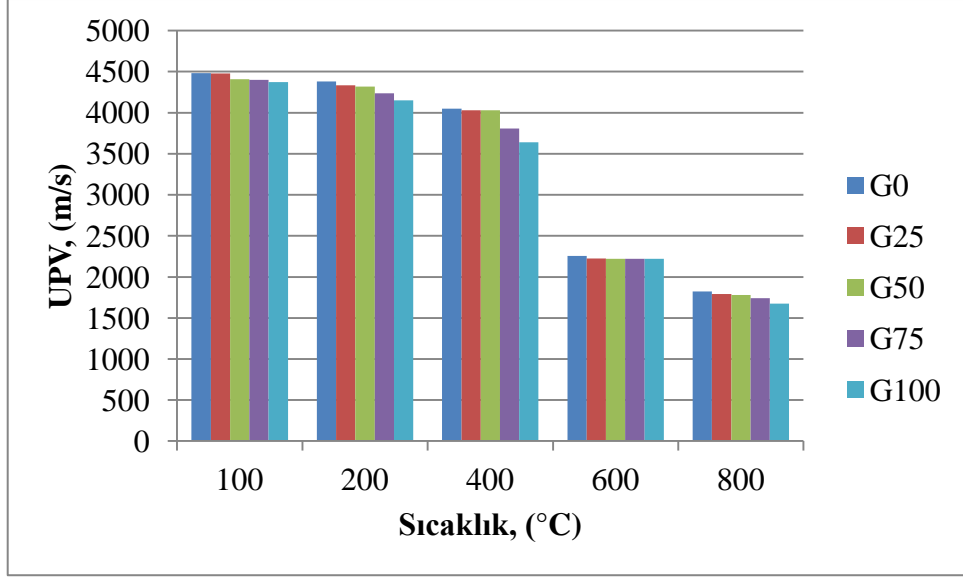
Suda soğuyanlar	UPV (m/s)				
	G0	G25	G50	G75	G100
Sıcaklık (°C)					
100	4485	4426	4372	4342	4336
200	4089	4024	3794	3625	3178
400	3578	3335	3141	2983	2601
600	2206	2069	2063	2051	2015
800	1784	1766	1758	1663	1650



Şekil 4. 10. Yangın sonrası suda soğumaya bırakılan numunelerin UPV ölçüm değerleri

Çizelge 4. 12. Yangın sonrası fırında soğumaya bırakılan numunelerin UPV ölçüm değerleri

Fırında soğuyanlar	UPV ölçüm değeri (m/s)				
	G0	G25	G50	G75	G100
Sıcaklık (°C)					
100	4482	4479	4406	4399	4371
200	4379	4332	4318	4237	4150
400	4050	4029	4030	3806	3639
600	2254	2224	2219	2221	2219
800	1821	1793	1778	1741	1674



Şekil 4. 11. Yangın sonrası fırında soğumaya bırakılan numunelerin UPV ölçüm değerleri

Şekil 4.11'de görüldüğü gibi, fırında soğumaya bırakılan her grup numunenin UPV değerlerinin sıcaklık yükseldikçe giderek azaldığı gözlenmiştir. Örneğin; sıcaklık 100°C'den 200°C'ye yükseldiğinde G0, G25, G50, G75 ve G100 isimli numuneler için sırasıyla UPV değerleri %2.29 %3.28, %1.99, %3.68 ve %5.05 oranında azalma göstermiştir. Yangın sonrası geopolimer numunelerde, suda soğutmanın zararlı etkisi fırında ve havada soğutmaya nazaran belirgin olarak ortaya çıkmıştır. Bu nedenle suda soğutulan numunelerin diğer iki soğutma şekline kıyasla numunelerin basınç dayanımı sonuçlarında olduğu gibi, UPV sonuçlarının da daha düşük değerlerde olduğu belirlenmiştir. UPV değerinin düşük olması o betonun gözenekli yapıda olduğunu göstermekte, buna bağlı olarak da betonun dayanımını ve kalitesini düşürmektedir. Çünkü doluluk oranı yüksek olmayan betonda ses dalgaları sağlıklı bir şekilde ilerleyemez ve o betondaki UPV değeri düşük olur.

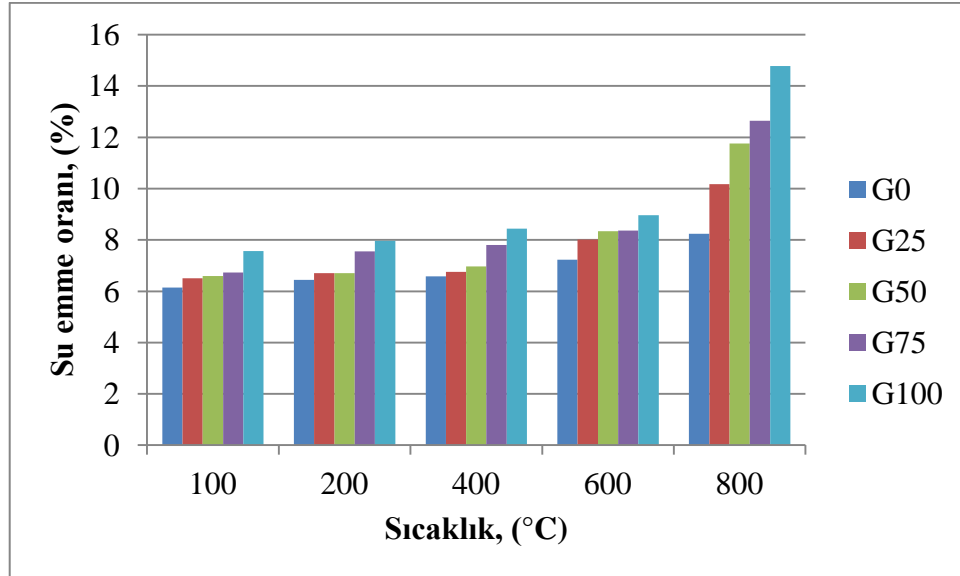
4.2.7. Geopolimer beton numunelerin yangın sonrası su emme oranı

Üretilen numunelerin yangın sonrası su emme oranı değerleri Çizelge 4.13'te verilmiştir ve Şekil 4.12'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde maksimum su emme oranı, 800°C sıcaklıkta G100 isimli numunelerde %14.78 olarak elde edilmiştir. Minimum su emme oranı değeri, 100°C'de ve G0 isimli numunelerde %6.14 olarak

kaydedilmiştir. Aynı sıcaklıkta geopolimer karışımlardaki geri dönüştürülmüş agrega yüzdesi arttıkça numunelerin su emme oranı da artış göstermiştir.

Çizelge 4. 13. Geopolimer numunelerde yangın sonrası su emme oranı

Sıcaklık (°C)	Su emme oranı (%)				
	G0	G25	G50	G75	G100
100	6,14	6,51	6,59	6,73	7,57
200	6,44	6,70	6,70	7,56	7,96
400	6,58	6,75	6,97	7,80	8,44
600	7,23	8,01	8,34	8,37	8,97
800	8,24	10,18	11,76	12,65	14,78



Şekil 4. 12. Geopolimer numunelerde yangın sonrası su emme oranı

Örneğin; sıcaklık 600°C'den 800°C'ye yükseldiğinde G0, G25, G50, G75 ve G100 isimli numuneler için sırasıyla su emme oranları %13.96 %27.09, %41.00, %51.13 ve %64.77 oranında artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durumun nedeni, geri dönüştürülmüş beton agregalarının normal agregalardan daha çok su emme kabiliyetine sahip olmasıyla ifade edilebilir. Aynı karışım grupları açısından yüksek sıcaklığın etkisi göz önünde bulundurulduğunda, sıcaklık yükseldikçe geopolimer karışımlar daha çok su emme oranına sahip olmuştur. Sonuç olarak, numunelerin su emme oranındaki en fazla artışın 800°C'lik sıcaklık etkisinden sonra meydana geldiği gözlenmiştir.

4.2.8. Geopolimer beton numunelerde yangın sonrası kılcal geçirimlilik

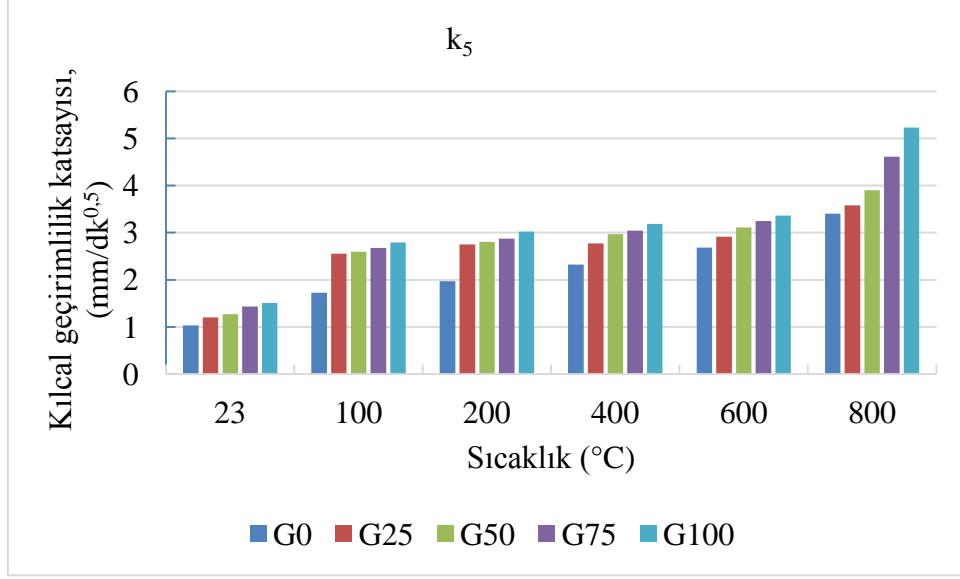
Geopolimer numunelerin 100, 200, 400, 600 ve 800°C olmak üzere 5 farklı sıcaklığa maruz bırakılmaları sonucu, her bir sıcaklık değerinden sonra numunelere kılcal geçirimlilik deneyi uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler Çizelge 4.14'te gösterilmiştir. Numunelere uygulanan her bir sıcaklık değerinden sonra kılcal su emme miktarları ve kılcal geçirimlilik katsayıları ölçülerek belirlenmiştir. Kılcal geçirimlilik katsayısında meydana gelen değişimler Şekil 4.13-17'de grafik halinde verilmiştir. Deney sonuçlarına göre, geopolimer karışımlardaki hem geri dönüştürülmüş agrega yüzdesindeki artış hem de sıcaklıktaki yükselmeye bağlı olarak, kılcal geçirimlilik katsayısında artış kaydedildiği görülmüştür.

23°C'deki numuneler referans alındığında örneğin; 100°C sıcaklıktan sonra geopolimer numunelerin geri dönüştürülmüş agrega içeriği sırasıyla %0, %25, %50, %75 ve %100 olan geopolimer karışımların ilk 5 dakikalık kılcal geçirimlilik katsayısı değerleri her karışım için sırasıyla %66.99, %112.5, %104.72, %86.11 ve %84.76 oranında artmıştır.

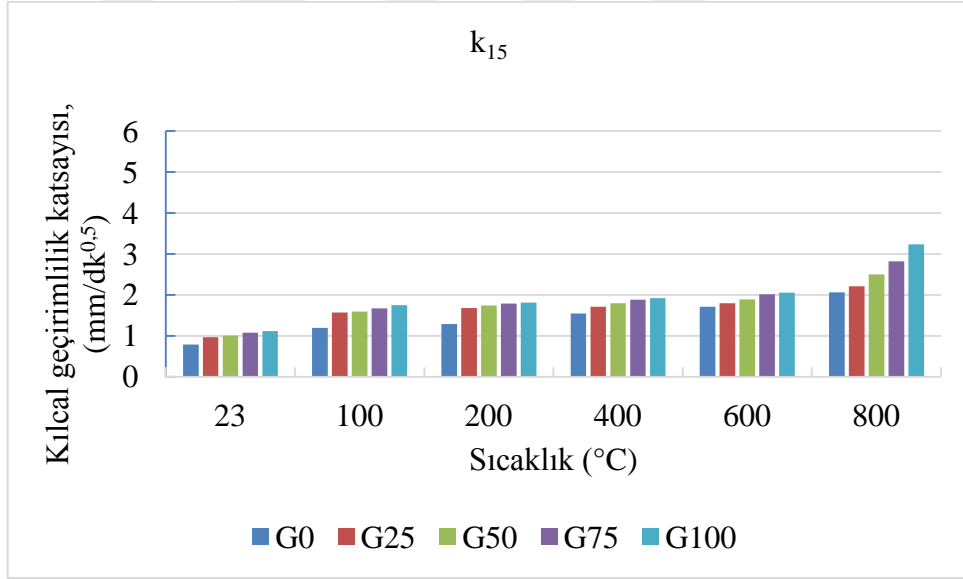
Deney sonuçlarına bakıldığında, üretilen geopolimer numunelerin sıcaklık yükseldikçe ve numune içeriğindeki geri dönüştürülmüş agrega yüzdesi arttıkça kılcal su emme miktarlarında ve kılcal geçirimlilik katsayılarında artışlar meydana geldiği görülmüştür. Bu artış miktarı ölçüm süresinin artması ile azalma göstermiştir.

Çizelge 4. 14. Numunelerin yangın sonrası kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri

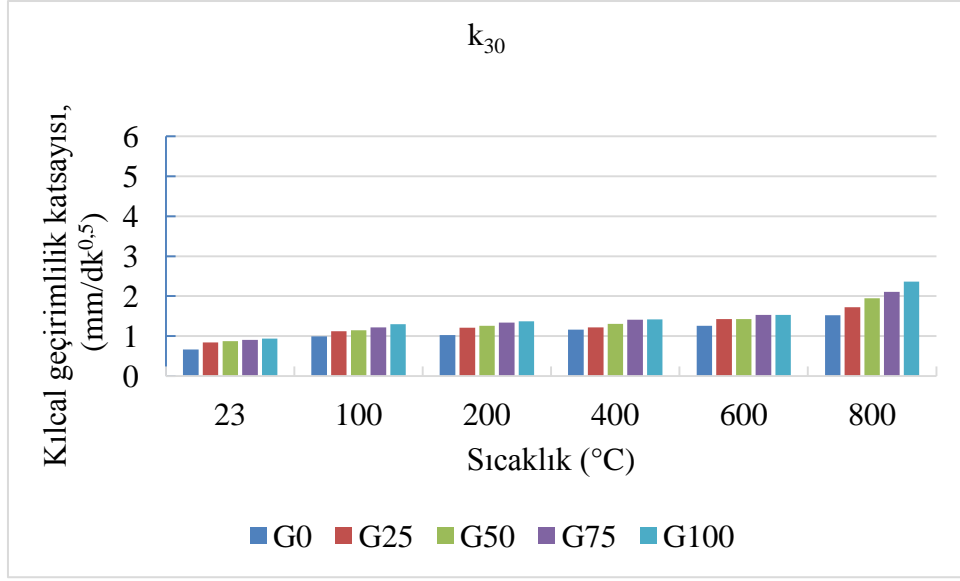
Sıcaklık (°C)	Karışım adı	Kılcal geçirimsizlik katsayısı, (mm/dk ^(0.5))				
		k ₅	k ₁₅	k ₃₀	k ₆₀	k ₁₄₄₀
23	G0	1,03	0,79	0,66	0,57	0,21
	G25	1,20	0,97	0,84	0,72	0,21
	G50	1,27	1,00	0,87	0,73	0,22
	G75	1,44	1,08	0,90	0,76	0,23
	G100	1,51	1,11	0,94	0,77	0,23
100	G0	1,72	1,20	0,99	0,82	0,18
	G25	2,55	1,57	1,12	0,84	0,19
	G50	2,60	1,59	1,14	0,87	0,20
	G75	2,68	1,67	1,22	0,92	0,20
	G100	2,79	1,75	1,29	0,97	0,21
200	G0	1,97	1,29	1,02	0,81	0,19
	G25	2,75	1,68	1,21	0,90	0,20
	G50	2,81	1,74	1,26	0,91	0,20
	G75	2,88	1,79	1,34	0,98	0,22
	G100	3,02	1,81	1,37	1,00	0,22
400	G0	2,33	1,55	1,16	0,91	0,19
	G25	2,77	1,71	1,22	0,93	0,20
	G50	2,97	1,79	1,30	0,96	0,21
	G75	3,04	1,88	1,41	1,02	0,23
	G100	3,18	1,92	1,42	1,03	0,24
600	G0	2,68	1,71	1,26	0,93	0,21
	G25	2,92	1,80	1,42	1,07	0,23
	G50	3,11	1,89	1,43	1,08	0,24
	G75	3,25	2,02	1,53	1,14	0,24
	G100	3,37	2,05	1,53	1,16	0,25
800	G0	3,41	2,06	1,52	1,09	0,24
	G25	3,58	2,21	1,72	1,29	0,28
	G50	3,90	2,50	1,94	1,46	0,32
	G75	4,61	2,82	2,11	1,56	0,34
	G100	5,23	3,23	2,37	1,73	0,37



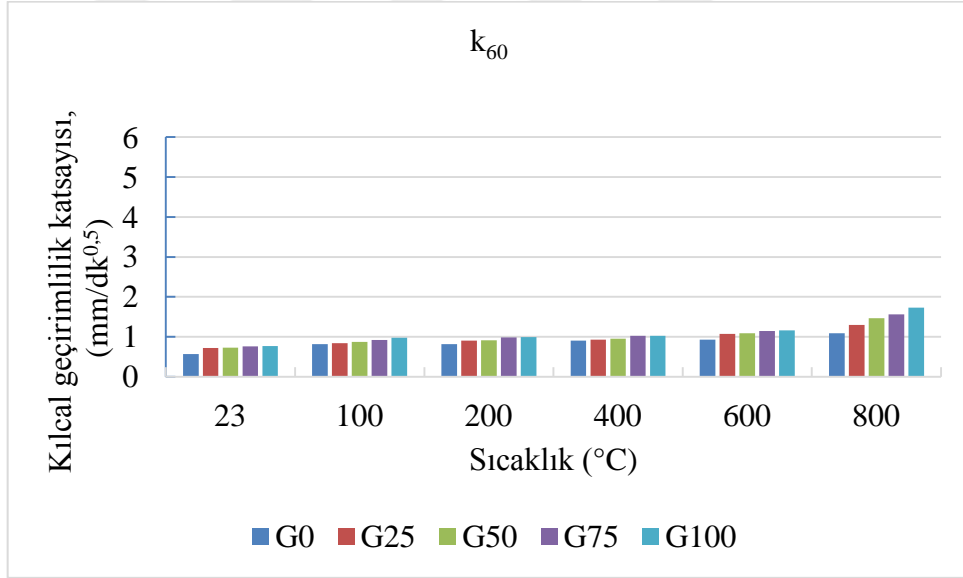
Şekil 4. 13. 5 dakikalık ölçüm için, 5 farklı geopolimer karışım tipinin sıcaklığa bağlı olarak kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim



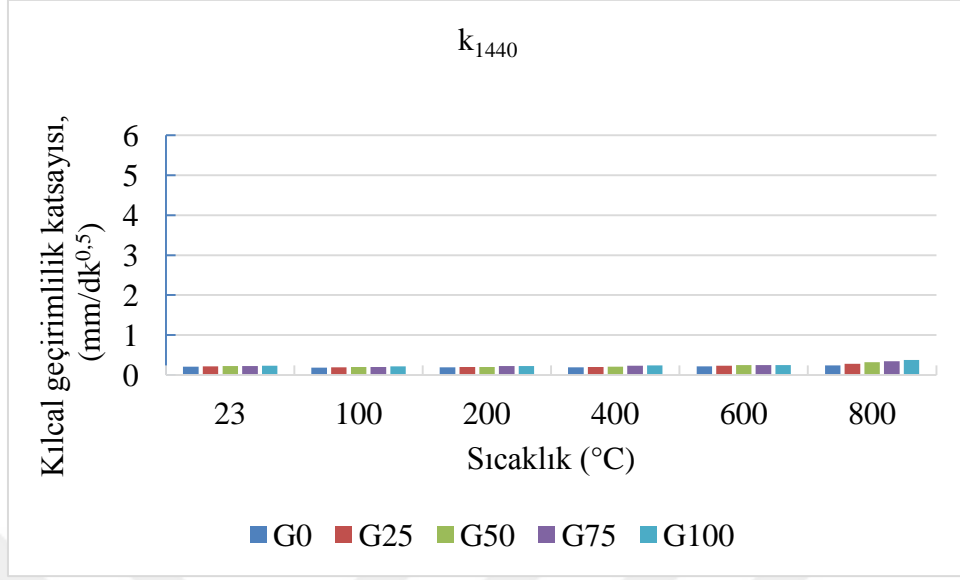
Şekil 4. 14. 15 dakikalık ölçüm için, 5 farklı geopolimer karışım tipinin sıcaklığa bağlı olarak kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim



Şekil 4. 15. 30 dakikalık ölçüm için, 5 farklı geopolimer karışım tipinin sıcaklığa bağlı olarak kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim



Şekil 4. 16. 60 dakikalık ölçüm için, 5 farklı geopolimer karışım tipinin sıcaklığa bağlı olarak kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim



Şekil 4. 17. 1440 dakikalık ölçüm için, 5 farklı geopolimer karışım tipinin sıcaklığa bağlı olarak kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim



Şekil 4. 18. 800°C sonrası kılcal geçirimlilik deneyi uygulanan numunelerin görünümleri

600°C ve 800°C'lik yüksek sıcaklıklarda geopolimer numunelere uygulanan kılcal geçirimlilik deneyinde numunelerin kılcal su emme miktarları incelendiğinde, Şekil

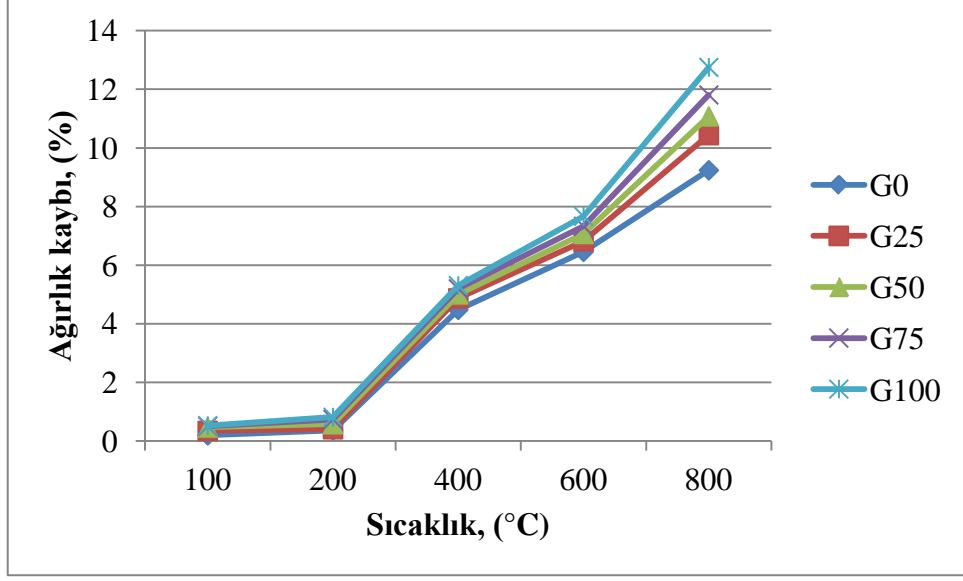
4.18’de görüldüğü gibi numune yüzeylerinde yangına bağlı oluşan çatlamlar ve gözenekler sonucu boşluk oranının arttığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısının sıcaklık yükseldikçe arttığı sonucuna varılmıştır.

4.2.9.Geopolimer beton numunelerde yangın sonrası ağırlık kaybı

Yüksek sıcaklık (100, 200, 400, 600 ve 800°C) sonrası numunelerin ağırlık kaybı Çizelge 4.15-17’da verilmiş olup Şekil 4.19-21’de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan geopolimer numunelerde ağırlık kayıplarının meydana geldiği görülmüştür. Şekil 4.19-21’den görüldüğü üzere; her bir soğutma şekli açısından, aynı sıcaklık değeri için en az ağırlık kaybı G0 isimli numunelerde meydana gelirken, en fazla ağırlık kaybı ise betonun hidrate olmuş yapısı bozulduğu için G100 isimli numunelerde görülmüştür.

Çizelge 4. 15. Havada soğumaya bırakılan numunelerin yangın sonrası ağırlık kaybı

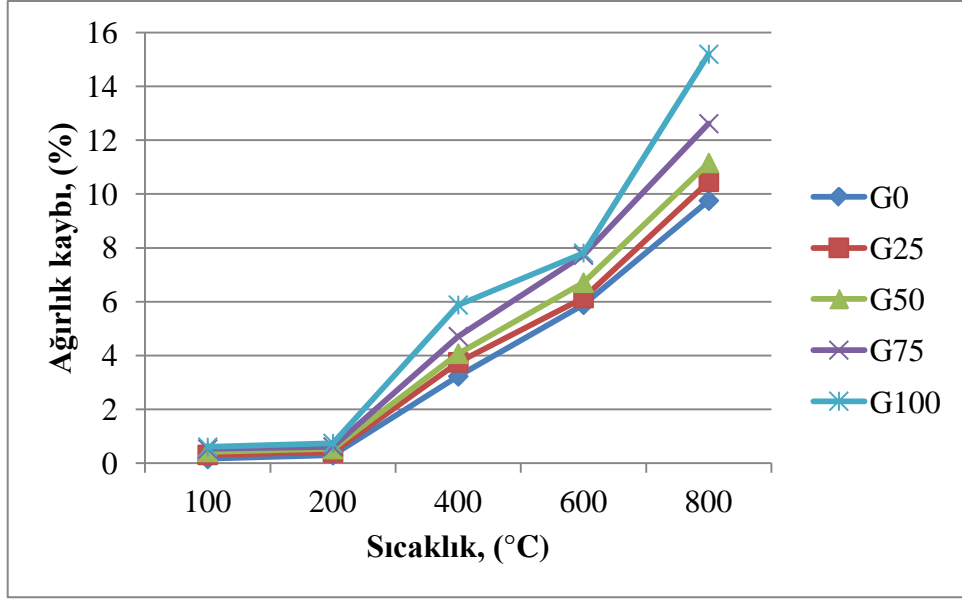
Karışım adı	Sıcaklık (°C)				
	100	200	400	600	800
G0	0,20	0,37	4,48	6,46	9,24
G25	0,35	0,41	4,87	6,82	10,44
G50	0,47	0,58	5,01	7,07	11,08
G75	0,51	0,74	5,20	7,33	11,81
G100	0,53	0,82	5,31	7,67	12,75



Şekil 4. 19. Havada soğumaya bırakılan numunelerin yangın sonrası ağırlık kaybı

Çizelge 4. 16. Suda soğumaya bırakılan numunelerin yangın sonrası ağırlık kaybı

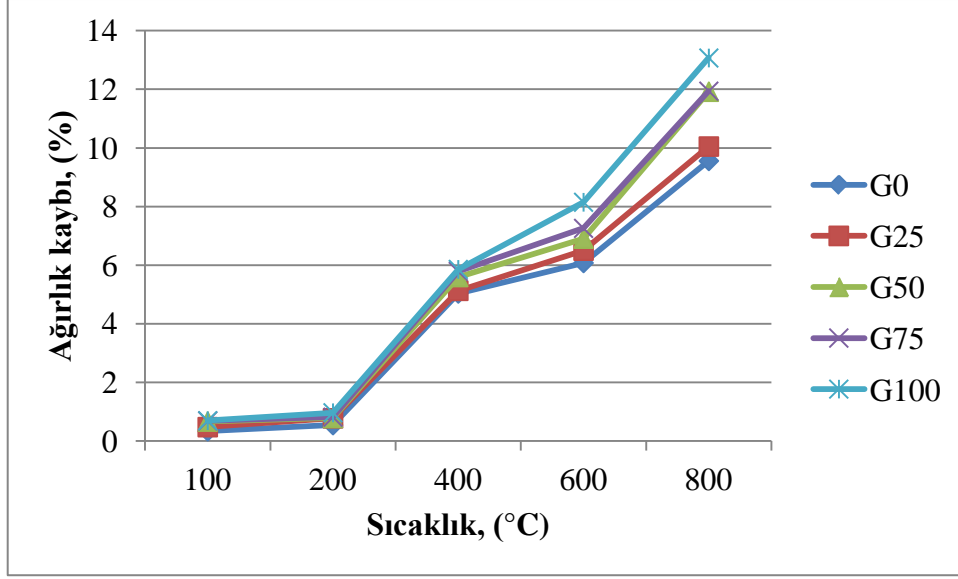
Karışım adı	Sıcaklık (°C)				
	100	200	400	600	800
G0	0,16	0,30	3,23	5,89	9,76
G25	0,31	0,40	3,75	6,14	10,46
G50	0,42	0,53	4,07	6,71	11,16
G75	0,53	0,61	4,71	7,73	12,62
G100	0,60	0,74	5,88	7,81	15,20



Şekil 4. 20. Suda soğumaya bırakılan numunelerin yangın sonrası ağırlık kaybı

Çizelge 4. 17. Fırında soğumaya bırakılan numunelerin yangın sonrası ağırlık kaybı

Karışım adı	Sıcaklık (°C)				
	100	200	400	600	800
G0	0,34	0,55	5,04	6,08	9,56
G25	0,48	0,78	5,13	6,50	10,05
G50	0,67	0,79	5,60	6,91	11,92
G75	0,69	0,82	5,79	7,26	11,94
G100	0,70	0,97	5,86	8,15	13,07



Şekil 4. 21. Fırında soğumaya bırakılan numunelerin yangın sonrası ağırlık kaybı

Sonuçlar incelendiğinde, 200°C'lik sıcaklıktan sonra havada soğumaya bırakılan numunelerdeki ağırlık kaybı maksimum %0.82 olurken, suda soğumaya bırakılan numunelerde ağırlık kaybı maksimum %0.74 olmuş, fırında soğumaya bırakılan numunelerde ağırlık kaybı maksimum %0.97 olmuştur. Buna karşın 400°C'lik sıcaklıktan sonra havada soğumaya bırakılan numunelerdeki ağırlık kaybı maksimum %5.31 olurken, suda soğumaya bırakılan numunelerdeki ağırlık kaybı maksimum %5.88 olmuş, fırında soğumaya bırakılan numunelerdeki ağırlık kaybı maksimum %5.86 olduğu görülmüştür. Deney sonuçlarına göre, 400°C'lik sıcaklık numunelerin ağırlık kaybı oranında belirleyici role sahip olmuştur. Bunun nedeni; sıcaklık yükseldikçe geri dönüştürülmüş agregalı numunelerden daha fazla oranda suyun ayrılması olarak açıklanabilir. Çünkü geri dönüştürülmüş agregalar başlangıçta normal agregalara kıyasla daha fazla suyu bünyelerine aldıkları için, bu su yüksek sıcaklıkla birlikte tekrar uzaklaşır ve ağırlıkta ciddi oranda azalma oluşturur. Literatürde benzer şekilde sonuçlar elde edilmiştir. Laneyrie vd., (2016) yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerdeki ağırlık kaybını incelediklerinde, ağırlık kaybının geri dönüştürülmüş agregalardaki aşırı nem içeriği nedeniyle normal agregalı numunelere göre daha fazla miktarda meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Ayrıca, 800°C'lik sıcaklıktan sonra havada soğumaya bırakılan numunelerde meydana gelen ağırlık kaybı G0, G25, G50, G75 ve G100 isimli numuneler için sırasıyla %9.24, %10.44, %11.08, %11.81, %12.75 olarak kaydedilirken, suda soğumaya bırakılan numunelerde meydana gelen ağırlık kaybı G0, G25, G50, G75 ve G100 isimli numuneler

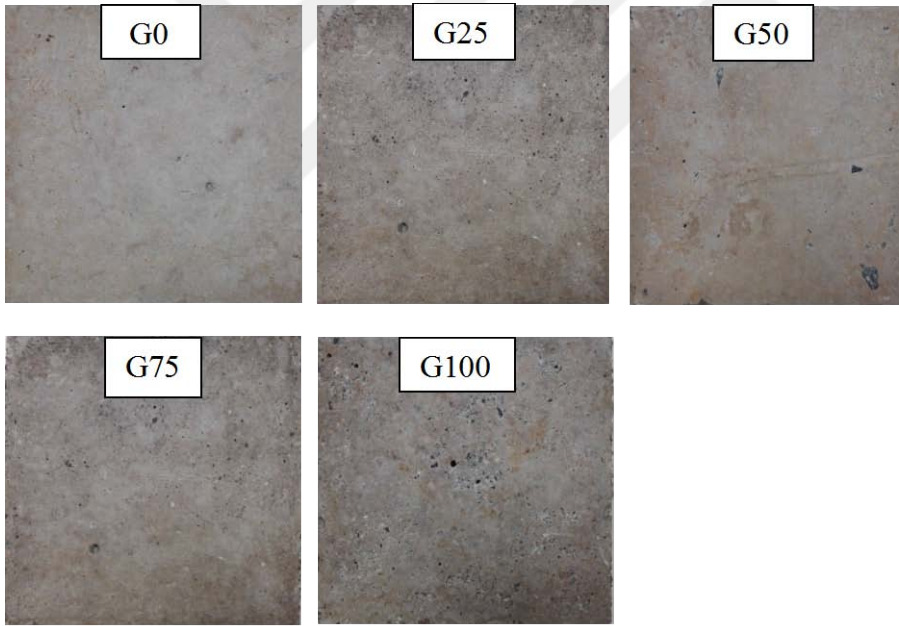
için sırasıyla %9.76, %10.46, %11.16, %12.62, %15.20 olarak elde edilmiş, fırında soğumaya bırakılan numunelerde meydana gelen ağırlık kaybı G0, G25, G50, G75 ve G100 isimli numuneler için sırasıyla %9.56 %10.05, %11.92, %11.94, %13.07 olarak elde edilmiştir. Sonuçlar, suda soğumaya bırakılan numunelerdeki ağırlık kaybının fırında ve havada soğumaya bırakılan numunelere kıyasla daha fazla olduğunu göstermiştir.

Wang vd.,(2019) yaptıkları çalışmada yüksek sıcaklıkların ve soğutma yöntemlerinin kaba ve ince geri dönüştürülmüş beton agregaları ile yapılmış betonun dayanımı üzerine etkisini incelemiştir. Geri dönüştürülmüş agrega içeren beton numuneler 20 ile 800°C arasındaki yüksek sıcaklıklara ve iki çeşit soğutma şekline (havada ve suda soğutma) tabi tutulmuştur. Deneysel sonuçlardan elde edilen veriler doğrultusunda, suda soğutmanın havada soğutmaya kıyasla daha fazla ağırlık kaybı ve dolayısıyla basınç dayanımında azalmaya sebep olduğu tespit edilmiştir.

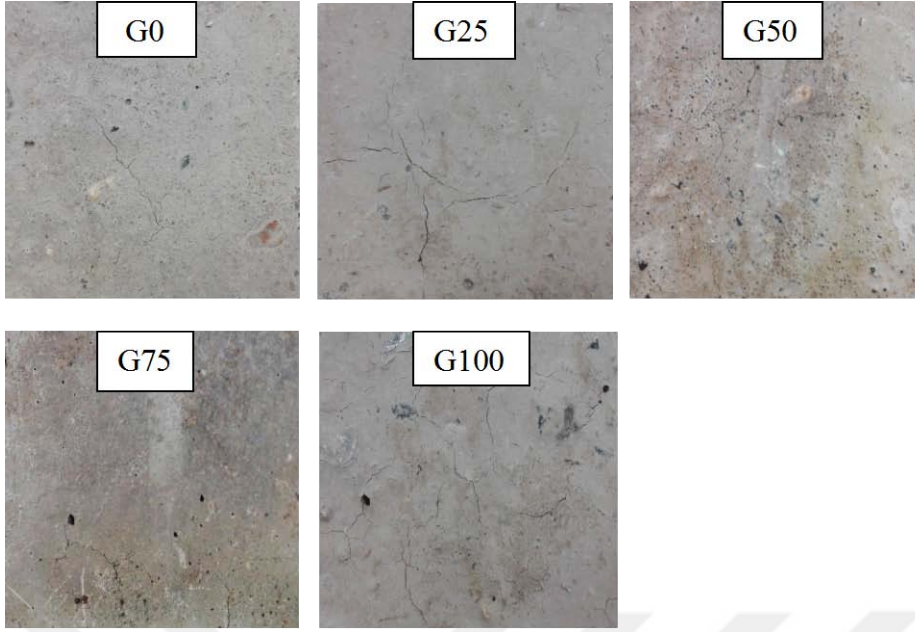
Khaliq (2018) yaptığı çalışmada; 100, 200, 400, 600 ve 800°C olmak üzere yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerde geri dönüştürülmüş agrega içeren ve içermeyen numunelerdeki ağırlık kaybını kıyaslamıştır. 200°C'lik sıcaklığa kadar numunelerde oluşan ağırlık kaybı net bir izlenim oluşturmamıştır. Geri dönüştürülmüş agrega içeren ve içermeyen numunelerdeki ağırlık kaybı 600°C'ye kadar sadece %10 ile %13 arasında olurken, 800°C'lik sıcaklıktan sonra ağırlık kaybı oranının %16 ile %20 arasında meydana geldiği tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra, meydana gelen fazla ağırlık kaybının agregalardaki aşırı nem içeriği nedeniyle geri dönüştürülmüş agregalı numunelerde olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, geri dönüştürülmüş agregaların daha fazla su tutma ve daha yüksek poroziteye sahip olma özelliğinden dolayı, yüksek sıcaklıklarda oluşan nem kaybına bağlanmıştır. Öte yandan, doğal agregalardaki yoğun mikro yapının varolan nemin yüksek sıcaklıklar altında serbestçe hareket etmesine izin vermediği görülmüştür. Beton numunelerinde nemin serbest bırakılması ve buharlaşması sonucu kütle kaybı meydana geldiğinden dolayı yüksek yoğunluğa sahip betonda daha düşük kütle kaybının olduğu sonucuna varılmıştır. İncelenen literatür çalışmalarına paralel olarak, bu çalışmada da yüksek sıcaklık etkisiyle geopolimer numunelerdeki ağırlık kayıplarının giderek arttığı tespit edilmiştir.

4.2.10. Geopolimer beton numunelerde yangın sonrası görsel incelemeler

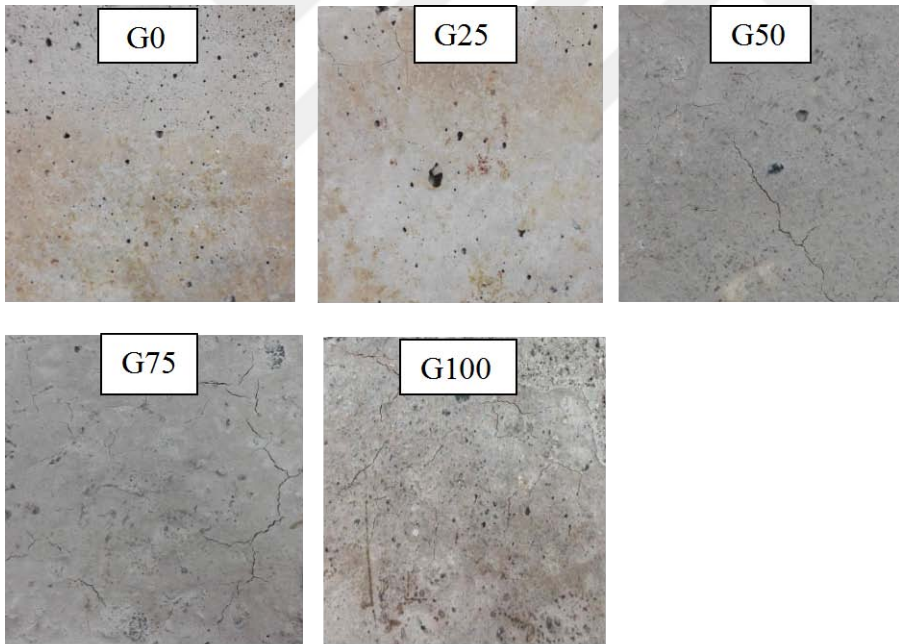
Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan geopolimer numuneler Şekil 4.22-27'de gösterilmiştir. Numuneler görsel olarak incelendiğinde; 23°C'de numunelerin yüzeyinde çatlak oluşmazken, 100°C'den itibaren sıcaklık etkisiyle geopolimer numunelerin yüzeyinde çatlaklar ve deformasyonlar oluşmaya başladığı gözlenmiştir. 400°C ve sonraki sıcaklıklarda bu çatlakların giderek genişlediği ve sayıca arttığı görülmüştür. 800°C'de ise çatlaklar neredeyse tüm yüzeyi kaplamıştır. Ayrıca aynı sıcaklıkta geopolimer karışımlardaki geri dönüştürülmüş agrega oranı arttıkça çatlakların genişlemeye başladığı gözlemlenmiştir. Numunelerin yüksek sıcaklık sonrası renk değişimi incelendiğinde, 200°C'de gri olan renk 400°C sıcaklıkta koyu griye dönüşmüştür. 600°C'de pembe renk olan numunelerin yüzeyi sıcaklık 800°C'ye yükseltildiğinde beyazımsı renge dönüşmüştür.



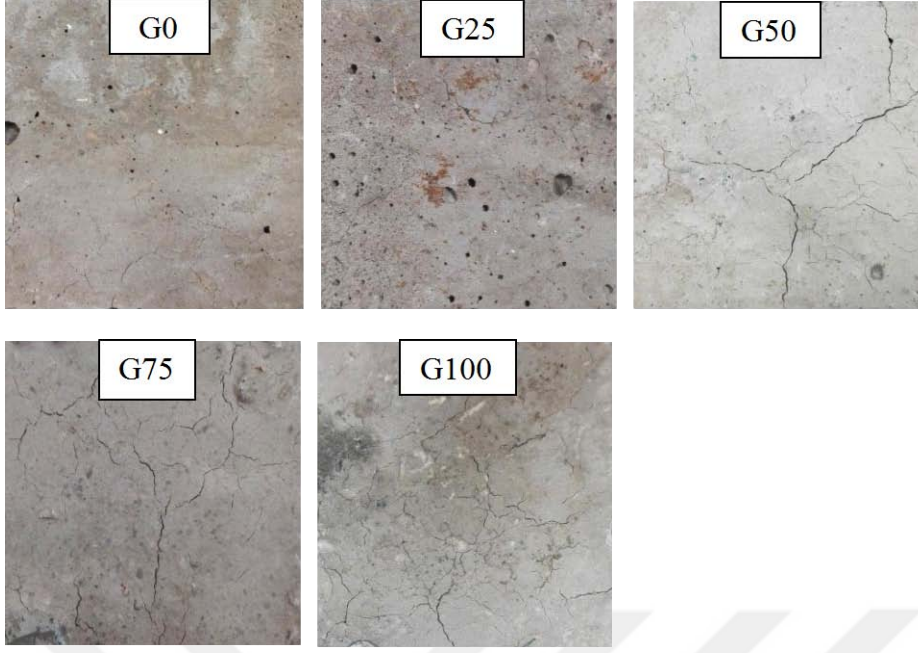
Şekil 4. 22. 23°C'lik ortam sıcaklığında bekletilmiş numunelerin görünüşleri



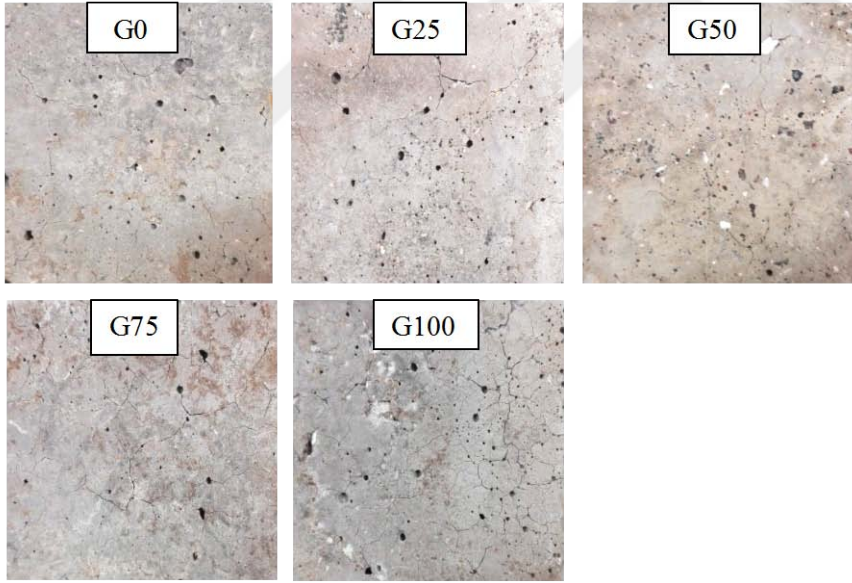
Şekil 4. 23. 100°C'lik sıcaklıktan sonra numunelerin görünüşleri



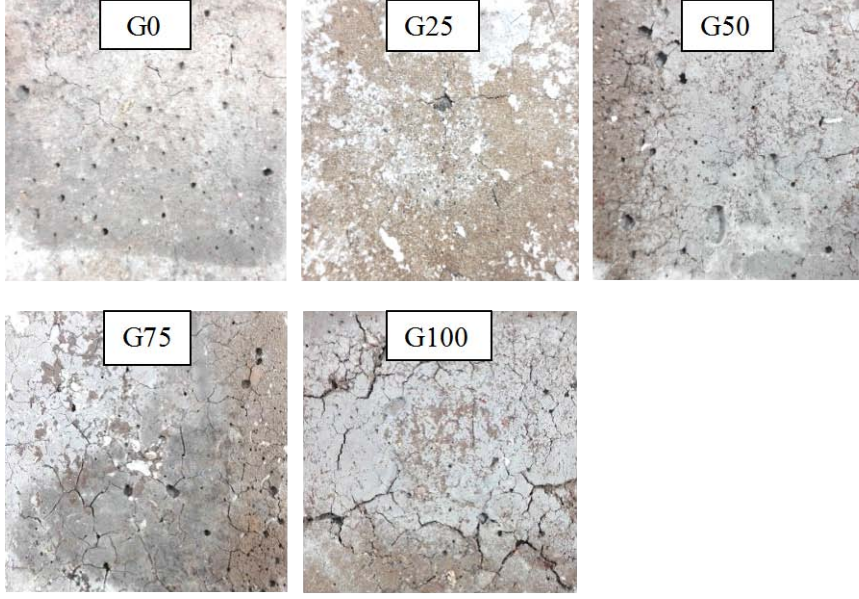
Şekil 4. 24. 200°C'lik sıcaklıktan sonra numunelerin görünüşleri



Şekil 4. 25. 400°C'lik sıcaklıktan sonra numunelerin görünüşleri



Şekil 4. 26. 600°C'lik sıcaklıktan sonra numunelerin görünüşleri



Şekil 4. 27. 800°C'lik sıcaklıktan sonra numunelerin görünüşleri

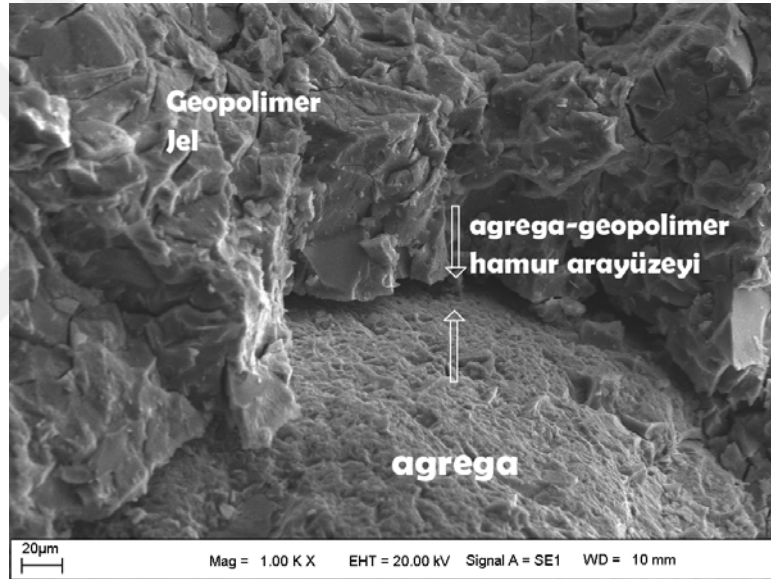
Hosan vd., (2016) yaptıkları çalışmada Na ve K bazlı aktivatörlerin, yüksek sıcaklıklara maruz kalan F sınıfı uçucu kül tabanlı geopolimerlerin basınç dayanımları ve fiziksel değişiklikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Hem Na hem de K bazlı geopolimer numunelerde 400°C'ye kadar çatlak oluşmadığı görülmüştür. Ancak, Na bazlı aktivatör içeren geopolimer numuneler 600°C'de çatlak belirtileri göstermiştir ve yüzeyde geniş çatlakların oluştuğu, 800°C'lik sıcaklıkta ise numunelerin en kötü hale geldiği görülmüştür. Öte yandan K bazlı aktivatör içeren geopolimer numunelerde 600°C'ye kadar gözle görülür derecede çatlak oluşmamıştır. Ancak 800°C'de yüzeyde çok sayıda ince çatlaklar oluştuğu tespit edilmiştir.

Khaliq (2018), tarafından yapılan çalışmada geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen normal beton numunelerinin 600°C'ye kadar büyük renk değişikliği göstermediği belirtilmiştir, ancak 800°C'de numunelerde grimsi renkten açık gri renge dönüşen değişiklikler meydana geldiği gözlenmiştir. Doğal agrega ile üretilen beton numunelerde ise 200°C ve üzeri sıcaklıklarda büyük renk değişiklikleri görülmüştür. Bu renk değişimi, 200°C'de açık griden, 400°C'de griye, 600°C'de açık pembeye, 800°C'de beyazımsı renge dönüşmüş olup 400°C'ye kadar olan sıcaklıklarda doğal agregayla üretilen beton numunelerin yüzeyinde görünür termal çatlak olmadığı gözlenmiştir. Ancak 400°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda numunelerin yüzeyinde küçük çatlaklar oluşmaya başladığı görülmüştür. 800°C'de ise daha çok çatlak oluştuğu ve çatlakların genişlediği gözlemlenmiştir. Bu

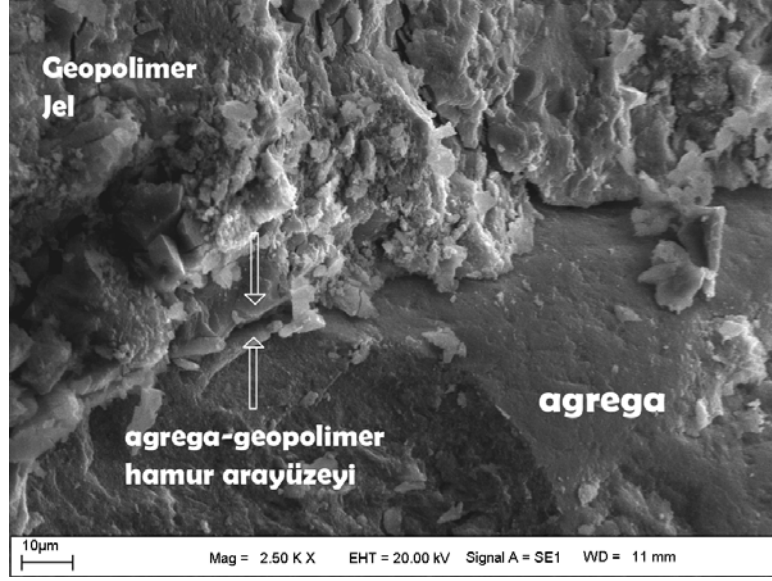
durum, su buharının serbestçe hareket etmesine izin vermeyen ve numunelerde çatlamaya neden olan gözenek basıncıyla sonuçlanan, doğal agrega içeren beton numunelerin yoğun mikro yapısına atfedilmiştir.

4.3. Mikro Yapı Analizi

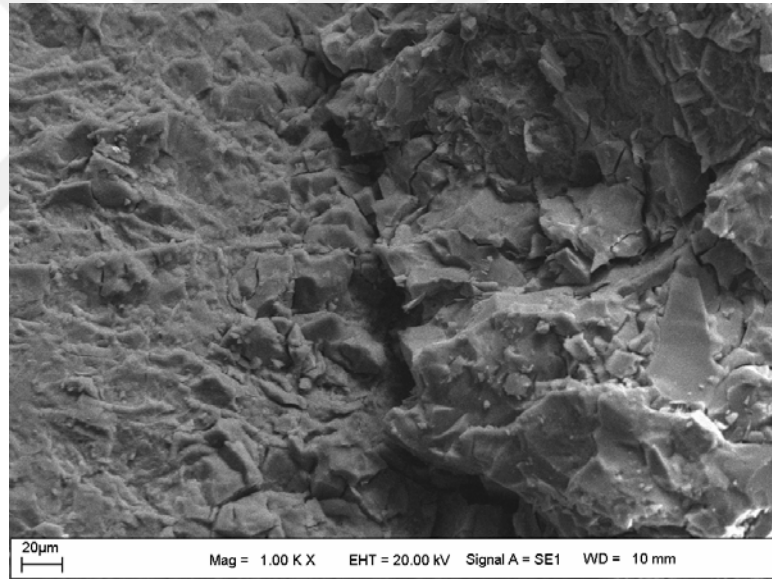
Bu bölümde geopolimer numunelerin SEM cihazı kullanılarak elde edilen görüntüleri Şekil 4.28-32'de gösterilmiştir. Sıcaklık arttıkça geopolimer numunelerde çatlaklar oluşmaya başladığı sem görüntüleri ile desteklenmiştir.



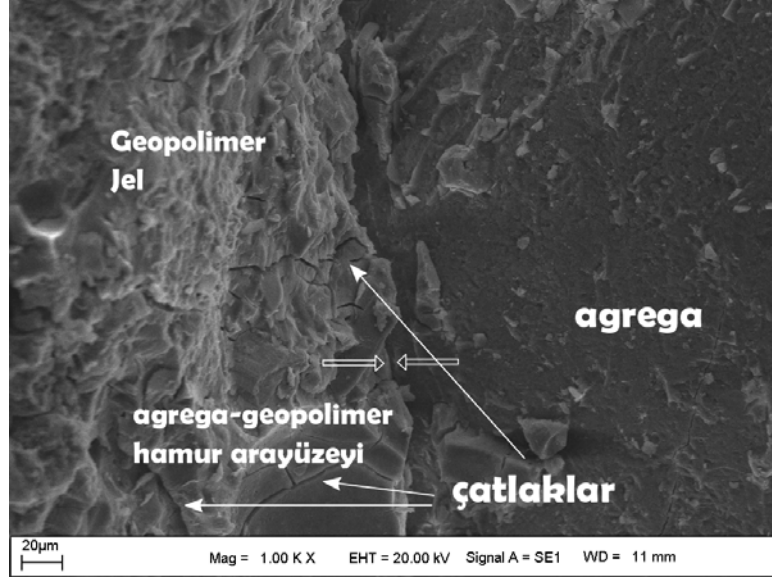
Şekil 4. 28. 23°C'lik ortamda bekletilmiş geopolimer numuneler



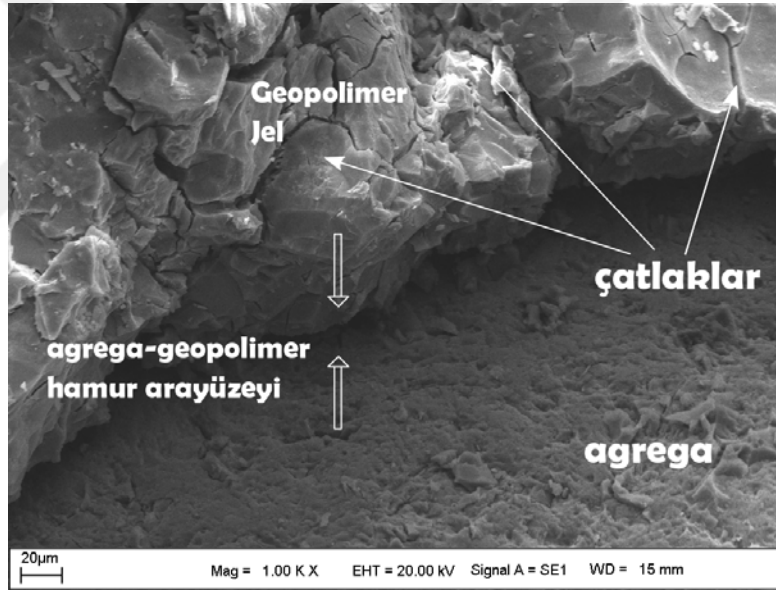
Şekil 4. 29. 100°C'lik sıcaklık sonrası geopolimer numuneler



Şekil 4. 30. 400°C'lik sıcaklık sonrası geopolimer numuneler



Şekil 4. 31. 600°C'lik sıcaklık sonrası geopolimer numuneler



Şekil 4. 32. 800°C'lik sıcaklık sonrası geopolimer numuneler

Peng vd., (2019) yaptıkları çalışmada, geopolimer betondaki ara yüzey geçiş bölgesinin mikro sertliğinin geopolimer hamurun mikro sertliğine kıyasla daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Silis modülü oranındaki artışın, ara yüzey geçiş bölgesinde çatlak genişliğinde bir artışa ve mikro sertlikte ise bir azalmaya neden olduğu görülmüştür. Geopolimer yapıda bulunan C-S-H jelindeki büzülmenin ara yüzey geçiş bölgesinde bir

çatlamaya neden olduğu ifade edilmiştir. Su/bağlayıcı oranındaki artışın daha ince bir ara yüzey geçiş bölgesi ve daha geniş bir çatlakla sonuçlandığı literatürde tespit edilmiştir.

Koushkbaghi vd., (2019) yaptıkları çalışmada geri dönüştürülmüş agregaya kullanımı sonucunda geopolimerlerin mikro yapı değişikliklerini SEM cihazı ile görüntüleyip incelemiştirlerdir. Ara yüzey geçiş bölgesinin geopolimer betonda daha yoğun ve daha kompakt olduğu belirlenmiştir. Geri dönüştürülmüş agregaya içeren geopolimer betonların mikro yapısının, agregaya yüzeyine bağlı eski harca atfedilen nispeten zayıf bir agregaya-hamur ara yüzey bölgesini oluşturduğu mikro yapı deneyleriyle gözlemlenmiştir.

Hu vd., (2019) yaptıkları çalışmada karışımlardaki granüle YFC içeriğinin artması ile gözenek yapısında iyileşme ve yoğunlukta artmaya sebep olduğu gözlemlenmiştir. Granüle yüksek fırın cürufunun dahil edilmesinden sonra, ara yüzey geçiş bölgesinde çatlaklar meydana gelmiştir ve devamında matriste son bulmuştur, bu da zayıf kısmın agregaya ve matris arasındaki ara yüzey geçiş bölgesinde olduğu sonucunu göstermiştir. Ayrıca, cürufun eklenmesinin daha yoğun geopolimer matrisinin oluşumuna neden olduğu ve bu arada zayıf noktanın geopolimer matrisinden matris ile agregaya arasındaki ara yüzey geçiş bölgesine doğru değişmesine yol açtığı tespit edilmiştir.

Xie vd., (2019) geri dönüştürülmüş agregaya içeren betonlarda normal çimento hamurunun yerini tamamen almak üzere granüle YFC/metakaolin bazlı geopolimer ürettikleri çalışmada SEM analizi sonuçları incelendiğinde, geri dönüştürülmüş agregalı beton gruplarında oluşan çatlakların nedeni olarak geri dönüştürülmüş agregaya ve ara yüzey geçiş bölgesinde meydana gelen bozukluklar gösterilmiştir. Doğal agregalı betonlarda geri dönüştürülmüş agregaya olmaması nedeniyle daha az kusur olduğundan çatlaklar sadece ara yüzey geçiş bölgesinde ve çimento matrisindeki herhangi bir zayıf noktadan kaynaklanıp çatlakların çimento matrisi boyunca yayılmasıyla daha yüksek bir çatlak yoğunluğu oluşabileceği belirtilmiştir. Genel olarak geopolimer karışım gruplarının, hem doğal agregaya içeren hem de geri dönüştürülmüş agregaya içeren normal beton karışım gruplarına kıyasla daha fazla diyagonal çatlaklar sergilediği görülmüş ve bu durumun çimento matrisine kıyasla daha güçlü geopolimer matrisinden kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada yangın etkisine (100, 200, 400, 600 ve 800°C) maruz bırakılan YFC esaslı geopolimer betonların geri dönüştürülmüş agrega (%0, %25, %50, %75 ve %100) içeriğine göre üretilen 5 grup karışımın basınç dayanımı, UPV değeri, su emme oranı, kılcal geçirimsizlik katsayısı ve ağırlık kaybı, numunelerin 23°C'lik referans sıcaklığındaki değerleri ile kıyaslanarak incelenmiştir. Ayrıca numunelere yangın sonrası havada, suda ve fırında soğutma olmak üzere üç farklı soğutma uygulanmıştır. Üretilen geopolimer numunelere uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. 5 farklı oranda geri dönüştürülmüş agrega içeren G0, G25, G50, G75 ve G100 isimli geopolimer beton numunelerin oda sıcaklığında geri dönüştürülmüş agrega içeriği arttıkça numunelerin basınç dayanımı azalmıştır
2. Numunelerin maksimum UPV değeri G0 adlı geopolimer numunelerde ölçülürken, minimum UPV değeri ise G100 isimli numunelerde kaydedilmiştir. UPV değerleri numunelerin basınç dayanımları ile paralellik göstermiştir.
3. Geopolimer numunelerin su emme oranının karışımlardaki geri dönüştürülmüş agrega yüzdesinin artmasıyla birlikte arttığı gözlenmiştir.
4. Yangın sonrası havada, suda ve fırında soğumaya bırakılan numunelerdeki, en yüksek basınç dayanımı G0 isimli numunelerde 100°C sıcaklıkta gözlenirken, en düşük basınç dayanımı ise G100 isimli numunelerde 800°C sıcaklıkta meydana gelmiştir.
5. Yangın sonrası suda soğumaya bırakılan numunelerin basınç dayanımı değerleri aynı geopolimer karışım grubu için havada ve fırında soğutulan numunelere göre, genel olarak daha düşük olduğu görülmüştür.
6. Geopolimer karışımlarda aynı sıcaklıkta GDA yüzdesindeki artışla kılcal geçirimsizlik katsayısında artış olduğu görülmüştür.
7. Sıcaklık yükseldikçe geopolimer numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısında artış meydana geldiği belirlenmiştir.
8. Maksimum su emme oranı, 800°C'lik sıcaklıkta G100 isimli numunelerde elde edilmiştir. Minimum su emme oranı ise, 100°C'de ve G0 isimli numunelerde tespit edilmiştir. Dolayısıyla, aynı sıcaklıkta geopolimer karışımlardaki GDA yüzdesi arttıkça numunelerin su emme oranının artış gösterdiği kaydedilmiştir.

9. Geopolimer numunelere yangın sonrası uygulanan her bir soğutma şekli açısından, aynı sıcaklık değeri için en az ağırlık kaybı G0 isimli numunelerde meydana gelirken, en fazla ağırlık kaybı ise G100 isimli numunelerde gözlenmiştir.

Yapılan tez çalışmasında uygulanan deneyler ve elde edilen veriler neticesinde, GDA içeren geopolimer betonların yangına karşı dayanıklılığını araştırmak açısından karışımların geri dönüştürülmüş agrega içeriği için optimum bir oran belirleyerek farklı metotlar geliştirilebilir. Karışımlarda kullanılan alkali aktivasyon çözeltisi konsantrasyonu ve türü, Na₂O yüzdesi, uygulanan kür koşulları değiştirilerek veya YFC yerine farklı puzolanlar kullanılarak üretilen geopolimer beton numunelerin yangın etkisine karşı dayanıklılığı araştırılıp, yeni çalışmalar ortaya konulabilir.

6. KAYNAKLAR

- Akman M. S. (2001). Betonarme yapılarda yangın hasarı ve yangın sonunda taşıyıcılığın belirlenmesi. *Sika Teknik Bülten*, Sayı: 3, İstanbul.
- Al-Majidi, M. H., Lampropoulos, A., Cundy, A. B. (2017). Steel fibre reinforced geopolymer concrete (SFRGC) with improved microstructure and enhanced fibre-matrix interfacial properties. *Construction and Building Materials*, **139**, 286-307.
- Alonso, S., Palomo, A. (2001). Alkaline activation of metakaolin-calcium hydroxide solid mixtures: influence of temperature, activator concentration and metakaolin/Ca(OH)₂ ratio. *Materials Letters*, **47**, 55-62.
- Antoni, D. W., Hardjito, D. (2015). Improving the durability of pozzolan concrete using alkaline solution and geopolymer coating. *Procedia Engineering*, **125**, 747 -753.
- Arulrajah, A., Mohammadinia, A., Phummiphan, I., Horpibulsuk, S., Samingthong, W. (2016). Stabilization of recycled demolition aggregates by geopolymers comprising calcium carbide residue, fly ash and slag precursors. *Construction and Building Materials*, **114**, 864–873.
- ASTM C597 (2002). *Standart test method for pulse velocity through concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C1585 (2013), *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Aydın, S., Yazıcı, H., Baradan, B. (2008). High Temperature Resistance of Normal Strength and Autoclaved High Strength Mortars Incorporated Polypropylene and Steel Fibers. *Construction and Building Materials*, **22**(4), 504-512.
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G., Cheng, Y. B. (2001). Resistance of alkali-activated slag concrete to alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Research*, **31**, 331-334.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H. (2002). *Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, 282 s.
- Baradaran-Nasiri, A., Nematzadeh, M. (2017). The effect of elevated temperatures on the mechanical properties of concrete with fine recycled refractory brick aggregate and aluminate cement. *Construction and Building Materials*, **147**, 865–875.
- Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R., Maiti, S. (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – a breakthrough towards sustainability in construction sector: a review. *Construction and Building Materials*, **68**, 501–516.
- Bernal, S.A., Rodriguez, E.D., de Gutierrez, R.M., Gordillo, M. , Provis, J.L. (2011). Mechanical and thermal characterisation of geopolymers based on silicate activated metakaolin/slag blends. *Journal of Materials Science*, **46**(16), 5477–5486.
- Bui, N., Satomi, T., Takahashi, H. (2018). Effect of mineral admixtures on properties of recycled aggregate concrete at high temperature. *Construction and Building Materials*, **184**, 361–373.
- Castel, A., Foster, S. J. (2014). Bond strength between blended slag and class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement. *Materials and Design*, **56**, 833–841.

- Coelho, A., Brito, J. (2012). Analysis of the viability of construction and demolition waste recycling plants in Portugal-Part III: *Analysis of the viability of a recycling plant*, Lisbon, Portugal.
- Cree, D., Green, M. F., Noumowé, A. (2013). Residual strength of concrete containing recycled materials after exposure to fire: a review. *Construction and Building Materials*, **45**, 208–223.
- Das, C., Dey, T., Dandapat, R., Mukharjee, B., Kumar, J. (2018). Performance evaluation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, **189**, 649–659.
- Davidovits, J., Sawyer, J.L. (1985). Early high-strength mineral polymer. *United States Patent*, **4**, 509-985.
- Davidovits J. (1989). Geopolymers geopolymeric materials, *Journal of Thermal Analysis*, **35**(2), 429–441.
- Demirel, C., Şimşek, O. (2014). C30 Sınıfı Atık Betonun Geri Dönüşüm Agregası Olarak Beton Üretiminde Kullanılabilirliği. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Cilt:2, Sayı:2, 46-54.
- Divya, K., Rubina, C. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of Materials Science*, **42**, 729–746.
- Durmuş, G., Şimşek, O., Dayı, M. (2009). Geri Dönüşümlü İri Agregaların Beton Özelliklerine Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **24**(1), 183-189.
- Duxon, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., Jannie, Van Deventer J. S. J. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of ‘green concrete’ . *Cement and Concrete Research*, **37**, 1590-1597.
- Duxson, P. , Fernandez-Jimenez, A. , Provis, J. L. , Lukey, G. C. , Palomo, A. , Van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, **42**(9), 2917–2933.
- Engin Y. (2015). *Yüksek Fırın Cürufu El Kitabı*, THBB Yayınları.
- Erdoğan T. Y.(2004). *Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri*, THBB Yayınları.
- Erdoğan, T. S., Erdoğan, T. Y. (2007). Puzolanik mineral katkıları ve tarihi geçmişleri (s:263-275). *II.Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, 12-13 Nisan, Ankara.
- Esen Y. (2017). Barit, diatomit, silis dumanı ve uçucu kül katkılı betonların yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışları. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **29**(1), 83-93.
- Fan, F., Liu, Z., Xu, G., Peng, H. (2018). Mechanical and thermal properties of fly ash based geopolymers. *Construction and Building Materials*, **160**, 66–81.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. (2006). Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete. *American Concrete Institute Materials Journal*, **103**(2), 106-112.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., Rangan, B. V. (2004). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *American Concrete Institute Materials Journal*, **101**(1).

- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw. D. M. J., Rangan, B. V. (2005). On the development of fly ash -based geopolymer concrete. *American Concrete Institute Materials Journal*, **101**(6), 467–472.
- Hasanbeigi, A., Price, L., Lu, H., Lan, W. (2010). Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China: a case study of 16 cement plants. *Energy*, Volume: **35**, Issue: 8, 3461-3473.
- Hermann, E., Kunze, C., Gatzweiler, R., Kiebig, G., Davitovits, J. (1999). In: *Proceedings of Geopolymers*, 211 p.
- Hienola, A., Pietikäine, J. P., Donnell, D.O., Partanen, A.I., Korhonen, H. (2017). The role of anthropogenic aerosol emission reduction in achieving the Paris Agreement's objective. *The 19th Geophysical Research Abstract-EGU General Assembly 2017*, April 23-28, Vienna, Austria.
- Hos, J. P., McCormick, P. G. (2002). Investigation of a synthetic aluminosilicate inorganic polymer. *Journal of Materials Science*, **37**, 2311-2316.
- Hosan, A., Haque, S., Shaikh, F. (2016). Compressive behaviour of sodium and potassium activators synthesized fly ash geopolymer at elevated temperatures: A comparative study. *Journal of Building Engineering*, **8**, 123–130.
- Hu, Y., Tang, Z., Li, W., Li, Y., Tam, V. W. Y. (2019). Physical-mechanical properties of fly ash/GGBFS geopolymer composites with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, **226**, 139-151.
- Imbabi, M. S., Carrigan, C., McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*, **1**(2), 194-216.
- Kantarci F. (2013). *Elazığ ferrokrom çürüfundan alkali aktivasyon metoduyla üretilen geopolimer çimentolu betonların yangın dayanımının araştırılması*. Yüksek lisans tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Karakoç, M. B., Türkmen, İ., Maraş, M. M., Kantarcı, F., Demirboğa, R., Toprak, M. U. (2014). Mechanical properties and setting time of ferrochrome slag based geopolymer paste and mortar. *Construction and Building Materials*, **72**, 283-292.
- Kathirvel, P., Kaliyaperumal, S. R. M. (2016). Influence of recycled concrete aggregates on the flexural properties of reinforced alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, **102**, 51–58.
- Kerestecioğlu, M. (2001). “EK: 9 Çevre ve Sürdürülebilir Kalkınma”, /Uluslararası Birleşmiş Müşavirler Müşavirlik Hizmetleri A.Ş. *Çevre ve Sürdürülebilir Kalkınma Paneli Son Raporu*, TÜBİTAK, vizyon 23.
- Khalaj, M.J., Khoshakhlagh, A., Bahri, S., Khoeini, M., Nazerfakhari, M., N November 2015. Split tensile strength of slag-based geopolymer composites reinforced with steel fibers: application of Taguchi method in evaluating the effect of production parameters and their optimum condition. *Ceramics International*, **41**(9), 10697-10701.
- Khaliq, W. (2018). Mechanical and physical response of recycled aggregates high-strength concrete at elevated temperatures. *Fire Safety Journal*, **96**, 203–214.
- Kızılkant A. B. (2010). *Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun basınç dayanımı renk değişimi ilişkisinin araştırılması*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- Kong, D. L. Y., Sanjayan, J. G., Sagoe-Crentsil, K. (2007). Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, **37**, 1583–1589.
- Kong, D. L. Y., Sanjayan, J. G. (2008). Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures. *Cement & Concrete Composites*, **30**(10), 986–991.
- Kong, D. L. Y., Sanjayan, J. G. (2010). Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*, **40**(2), 334–339.
- Kong, D. L. Y., Sanjayan, J. G. (2010). Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*, **40**, 334–339.
- Kou, S. C., Poon, C. S., Wan, H. W. (2012). Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, **36**, 881–889.
- Koushkbaghi, M., Alipour, P., Tahmouresi, B., Mohsenid, E., Saradar, A., Sarker, P. K. (2019). *Construction and Building Materials*, **205**, 519–528.
- Laneyrie, C., Beaucour, A., Green, M. F., Hebert, R. L., Ledesert, B., Noumowe, A. (2016). Influence of recycled coarse aggregates on normal and high performance concrete subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, **111**, 368–378.
- Lin, W. M., Lin, T. D., Powers-Couche, L. J. (1996). Microstructures of Fire-Damaged Concrete. *American Concrete Institute Materials Journal*, **93**, 199–205.
- Luhar, S., Chaudhary, S., Luhar, I. (2018). Thermal resistance of fly ash based rubberized geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*, **19**, 420–428.
- Luna-Galiano, Y., Fernández Pereira, C., Izquierdo, M. (2016). Contributions to the study of porosity in fly ash-based geopolymers. Relationship between degree of reaction, porosity and compressive strength. *Materiales de Construcción*, **66**(324).
- Luna-Galiano, Y., Leiva, C., Villegas, R., Arroyo, F., Vilches, L., Fernández-Pereira, C. (2018). Carbon fiber waste incorporation in blast furnace slag geopolymer composites. *Materials Letters*, **233**, 1–3.
- Mahmut O. (2015). *Geopolimer harç üretiminde Elazığ ferrokrom çürüfö kullanımının incelenmesi*. Yüksek lisans tezi, Düzce Üniversitesi, Düzce.
- Malešev, M., Radonjani, V., Marinković, S. (2010). Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. *Sustainability*, **2**, 1204–1225.
- Malhotra, V. M., Mehta, P. K. (2002). *High-performance, high-volume fly ash concrete: materials, mixture proportioning, properties, construction practice, and case histories*. Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development, Canada, 101 p.
- Marie, I., Quiasrawi, H. (2012). Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 1–6.
- Mehta, P. K., Monteiro, J. M. P. (1997). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. Indian Concrete Institute, India.
- Mehta, A., 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.

- Mermerdaş, K., Manguri, S., Nassani, D. E., Oleiwi, S. M. (2017). Effect of aggregate properties on the mechanical and absorption characteristics of geopolymer mortar. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol: **20**, i:6, pp: 1642-1652.
- Mohseni E. (2018). Assessment of Na_2SiO_3 to NaOH ratio impact on the performance of polypropylene fiber-reinforced geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, **186**, 904–911.
- Moropoulou, A., Cakmak, A., Labropoulos, K. C., Van Grieken, R., Torfs, K. (2004). Accelerated microstructural evolution of a calcium-silicate-hydrate(C-S-H) phase in pozzolanic pastes using fine siliceous sources: Comparison with historic pozzolanic mortars. *Cement and Concrete Research*, **34**(1), 1-6.
- Mucsi, G., Szenczi, A., Nagy, S. (2018). Fiber reinforced geopolymer from synergetic utilization of fly ash and waste tire. *Journal of Cleaner Production*, **178**, 429-440.
- Neupane, K., Bajewa, D., Shrestha, R., Chalmers, D., Sleep, P. (2014). Mechanical properties of geopolymer concrete: applicability of relationship defined by Australian Standard 3600. *Concrete Institute of Australia*, **40**, 50-56.
- Nuaklong, P., Sata, V., Chindaprasirt, P. (2016). Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production*, **112**, 2300-2307.
- Nuaklong, P., Sata, V., Chindaprasirt, P. (2018). Properties of metakaolin-high calcium fly ash geopolymer concrete containing recycled aggregate from crushed concrete specimens. *Construction and Building Materials*, **161**, 365-373.
- Oikonomou N. D. (2005). Recycled Concrete Aggregates. *Cement & Concrete Composites*, **27** (2), 315-318.
- Olivier, J. G. J., Janssens-Maenhout, G., Muntean, M., Peters, J. A. H. W. (2015). Trends in Global CO_2 Emissions; *2015 Report, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency*, The Hague, Netherlands.
- Özturan T. (1988). Eski Beton Kırığı Agregalı Betonlar. *İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Seminerleri*, İstanbul.
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes, a cement for the future. *Cement and Concrete Research*, **29**(8), 1323-1329.
- Pan, Z., Sanjayan, J., Kong, D. (2012). Effect of aggregate size on spalling of geopolymer and Portland cement concretes subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, **36**, 365–372.
- Papadakis, V. G. (2000). Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. *Cement and Concrete Research*, **30**, 291-299.
- Parthiban, K., Mohan, K. (2017). Influence of recycled concrete aggregates on the engineering and durability properties of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, **133**, 65–72.
- Peng, H., Cui, C., Cai, C. S., Liu, Y., Liu, Z. (2019). Microstructure and microhardness property of the interface between a metakaolin/GGBFS-based geopolymer paste and granite aggregate. *Construction and Building Materials*, **221**, 263–273.

- Penttala, V. (1997). Concrete and Sustainable Development. *ACI Materials Journal*, **94**(5), 409-416.
- Piasta, J., Sawicz, Z., Rudzinski, L. (1984). Changes in the structure of hardened cement paste due to high temperature. *Materials and Constructions*, **17**(100), 291–296.
- Posi, P., Ridtirud, C., Ekvong, C., Chammanee, D., Janthowong, K., Chindaprasirt, P. (2015). Properties of lightweight high calcium fly ash geopolymer concretes containing recycled packaging foam. *Construction and Building Materials*, **94**, 408–413.
- Ren, X., Zhang, L. (2018). Experimental study of interfacial transition zones between geopolymer binder and recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, **167**, 749–756.
- Salahuddin, H., Nawaz, A., Maqsoom, A., Mehmood, T., Zeeshan, B.A. (2019). Effects of elevated temperature on performance of recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, **202**, 415-425.
- Salas, D. A., Ramirez, A. D., Rodríguez, C. R., Petroche, D. M., Boero, A. J., Duque-Rivera, J. (2016). Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: a literature review. *Journal of Cleaner Production*, **113**, 114-122.
- Sarker, P. K., Mcbeath, S. (2015). Fire endurance of steel reinforced fly ash geopolymer concrete elements. *Construction and Building Materials*, **90**, 91-98.
- Sata, V., Wongsu, A., Chindaprasirt, P. (2013). Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, **42**, 33–39.
- Shaikh, F. (2013). Review of mechanical properties of short fibre reinforced geopolymer composites, *Construction and Building Materials*, **43**, 37–49.
- Shaikh F. (2016). Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment*, **5**, 277–287.
- Shaikh, F., Hosan, A. (2016). Mechanical properties of steel fibre reinforced geopolymer concretes at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, **114**, 15–28.
- Tabsh, S. W., Abdelfatah, A. S. (2009). Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*, **23**, 1163-1167.
- Tanyıldızı, H., Yonar, Y. (2016). Mechanical properties of geopolymer concrete containing polyvinyl alcohol fiber exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, **126**, 381–387.
- Tokyay, M., Erdoğan, K. (2009). *Cürüflar ve cürüflü çimentolar*. TÇMB / AR-GE Enstitüsü, Ankara, 48 s.
- Topgül S. S. (2016). *Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun geri kazanılmış agregalı betonların özelliklerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- TS 3526 (1980). *Beton agregalarında özgül ağırlık ve su emme oranı tayini*. TSE, Ankara.
- TS 706 EN 12620+A1 (2009). *Beton agregaları*. TSE, Ankara.

- TS 802 (2016). *Beton karışım tasarımı hesap esasları*. TSE, Ankara.
- TS EN 12390-3/AC (2012). *Beton – Sertleşmiş beton deneyleri – Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini*. TSE, Ankara.
- TS EN 12390-7 (2010). *Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini*, TSE, Ankara.
- TS EN 932-2 (1999). *Agregaların genel özellikleri için deneyler bölüm 2: Laboratuvar numunelerin azaltılması metodu*. TSE, Ankara.
- TS EN 933-1 (2015). *Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini – Eleme yöntemi*. TSE, Ankara.
- TS ISO 3310-2 (2015). *Deney elekleri – Teknik özellikler ve deneyler – Bölüm 2: Delikli metal plakalı deney elekleri*. TSE, Ankara.
- Turner, L. K., Collins, F.G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: a comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, volume: **43**, pp:125-130.
- Van Deventer, S. J., Llukey, G., Xu, H. (2006). Effect of curing temperature and silicate concentration on fly-ash-based geopolymerization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **45**, 3559-3568.
- Van Jaarsveld, J. S. G., Van Deventer, J. S. J., Lorenzen, L. (1998). Factors affecting the immobilisation of metals in geopolymerised fly ash. *Metallurgical and Materials Transactions B*, **29**, 283.
- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., Lukey, G. C. (2002). The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite-based geopolymers. *Chemical Engineering Journal*, **89**, 63-73.
- Wang, Y., Liu, F., Xu, L., Zhao, H. (2019). Effect of elevated temperatures and cooling methods on strength of concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, **210**, 540–547.
- Xie, J., Chen, W., Wang, J., Fang, C., Zhang, B., Liu, F. (2019). Coupling effects of recycled aggregate and GGBS/metakaolin on physicochemical properties of geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, **226**, 345-359.
- Xiong, C. J., Ban, C. H., Pei, X., Fang, Z. (2004). In: *International workshop on sustainable development and concrete technology*, Beijing, China, 299 p.
- Xu, H., Van Deventer, J. S. J. (2000). The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals. *International Journal of Mineral Processing*, **59**, 247-266.
- Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., Skoczylas, F., Wirquin, E. (2003). Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate, concrete. *Cement and Concrete Composites*, **25**(2), 223–232.
- Zega, C. J., Di Maio, A. A. (2006). Recycled concrete exposed to high temperatures. *Magazine of Concrete Research*, **58**(10), 675–682.
- Zhang, H., Kodur, V., Wu, B., Yan, J., Yuan, Z. (2018). Effect of temperature on bond characteristics of geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, **163**, 277–285.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Özge TOPAL
Doğum Tarihi ve Yeri : 28.03.1990 / TEKİRDAĞ
E-posta : ozgetopal44 @ gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

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

Yayın Listesi:

Topal, Ö., Uğurlu, A. İ., Karakoç, M.B., Özcan, A., "*Relationship Between Compressive Strength And UPV of GGBFS Based-Geopolymer Concrete Containing RCA*", Uluslararası Bilim, Teknoloji Ve Sosyal Bilimlerde Güncel Gelişmeler Sempozyumu, 21-22 Aralık 2019, pp. 178-182, Ankara.