

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

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KULLANILARAK ÜRETİLEN GEOPOLİMER
BETONLARIN DONMA ÇÖZÜLME VE SÜLFAT DİRENCİNE GERİ
DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ AGREGANIN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşe İlayda UĞURLU

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

EYLÜL 2020

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

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KULLANILARAK ÜRETİLEN GEOPOLİMER
BETONLARIN DONMA ÇÖZÜLME VE SÜLFAT DİRENCİNE GERİ
DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ AGREGANIN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşe İlayda UĞURLU

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

EYLÜL 2020

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-2018-1574 numaralı proje ile maddi destek sağlayan İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi'ne,

Çalışmama yardımcı olan Sayın Arş. Gör. Ahmet ÖZCAN, Sayın İnş. Müh. Özge TOPAL'a 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 Donma-Çözülme ve Sülfat Direncine Geri Dönüştürülmüş Agreganın Etkisi” 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.

Ayşe İlayda UĞURLU



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	iii
ONUR SÖZÜ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1.GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
2.1. Geopolimer	4
2.1.1. Geopolimer kimyası	5
2.1.2. Geopolimer betonun avantajları	6
2.1.3. Geopolimerlerin Kullanım Alanları	8
2.2. Yüksek Fırın Cürufu	8
2.2.1 Yüksek fırın cürufu tarihsel gelişimi.....	8
2.2.2 Yüksek fırın cürufu nedir?	8
2.2.3. Yüksek fırın cürufunun elde edilmesi	9
2.2.4. Yüksek fırın cürufunun soğutulması	10
2.2.5. Yüksek fırın cürufunun hidratasyonu.....	12
2.2.6. Yüksek fırın cürufu ile portland çimentosunun karşılaştırılması.....	12
2.2.7. Yüksek fırın cürufunun faydaları	12
2.3. Geri Dönüştürülmüş Agregası	14
2.4. Betonda Donma-Çözülme Olayı.....	15
2.5. Betonda Sülfat Etkisi	18
2.6. Daha Önce Yapılan Çalışmalar.....	19
3.MATERYAL ve YÖNTEM.....	26
3.1. Materyal	26
3.1.1. Doğal Agregası	26
3.1.2. Geri dönüştürülmüş agregası	26
3.1.3. Yüksek fırın cürufu ve özellikleri	27

3.1.4. Aktivatörler	28
3.1.5. Sülfatlar	28
3.1.6. Aletler.....	29
3.2. Yöntem.....	33
3.2.1. Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler.....	34
3.2.2. Geopolimer beton karışım seçeneklerinin belirlenmesi	34
3.2.3. Geopolimer beton üretimi, numunelerin yerine konması ve bakımı.....	36
3.2.4. Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler.....	38
3.2.4.1. Ultrasonik ses hızı ölçümü	38
3.2.4.2. Basınç dayanımı	39
3.2.4.3. Kılcal geçirimsizlik deneyi	40
3.2.4.4. Su Emme Tayini	41
3.2.4.5. Ağırlık Kaybı.....	42
3.2.4.6. Donma ve Çözülme Dayanımı	42
3.2.4.7. Sülfat etkisi	42
3.2.4.8 SEM analizi	43
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	44
4.1. Agrega Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma	44
4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri İle İlgili Bulgular ve Tartışma	44
4.2.1. Kontrol numuneleri basınç dayanımları.....	44
4.2.2. Kontrol numunelerinin UPV değerleri.....	47
4.2.3. Kontrol numunelerinin kılcal su emme miktarları ve su emme oranları.....	48
4.3. Donma Çözülme Döngüsüne Maruz Kalan Geopolimer Beton Numuneler İle İlgili Araştırma Bulguları Ve Tartışma.....	51
4.3.1. Donma çözülme etkisine maruz kalan numunelerin basınç dayanımları.....	51
4.3.2. Donma çözülme etkisine maruz kalan numunelerin UPV değerleri.....	52
4.3.3. Donma çözülme etkisine maruz kalan numunelerdeki ağırlık değişimi	53
4.3.4. Donma çözülme etkisine maruz kalan numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı ve su emme oranları	55
4.4. Sülfat etkisine maruz kalan geopolimer beton numuneler ile ilgili araştırma bulguları ve tartışma.....	56
4.4.1. Sülfat etkisindeki numunelerin basınç dayanımları	56
4.4.2. Sülfat etkisindeki numunelerin UPV ölçümleri	60
4.4.3. Sülfat etkisi sonrası kılcal geçirimsizlik katsayısı.....	60

4.4.4. Sülfat etkisi sonrası su emme oranı.....	65
4.4.5. Sülfat etkisi sonrası ağırlık değişimi.....	67
4.5.Geopolimer Beton Numunelerin İçyapı Analizleri	70
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	74
6.KAYNAKLAR.....	76
ÖZGEÇMİŞ	82



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3. 1. Kullanılan yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi	27
Çizelge 3. 2. Sodyum hidroksit ve sodyum metasilikatın kimyasal özellikleri	28
Çizelge 3. 3. Üretilen geopolimer beton numune kodları	35
Çizelge 3. 4. Dozajı 300 kg/m ³ olan geopolimer beton karışım miktarları	36
Çizelge 3. 5. Dozajı 400 kg/m ³ olan geopolimer beton karışım miktarları.....	36
Çizelge 3. 6. Dozajı 500 kg/m ³ olan geopolimer beton karışım miktarları.....	36
Çizelge 4. 1. Geri dönüştürülmüş agreganın ve dere agregasının özgül ağırlıkları ve su emme oranı	44
Çizelge 4. 2. 28 günlük geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları (MPa).....	45
Çizelge 4. 3. Kontrol numunelerinin UPV değerleri	48
Çizelge 4. 4. Kontrol numunelerinin kılcal geçirimsizlik katsayısı	49
Çizelge 4. 5. Kontrol numuneleri su emme oranları(%)	49
Çizelge 4. 6. Donma çözülme sonrası numunelerin basınç dayanım değerleri.....	51
Çizelge 4. 7. Donma çözülme sonrası UPV değerleri	53
Çizelge 4. 8. Donma çözülme sonrası numunelerin ağırlık değişimi.....	54
Çizelge 4. 9. Donma çözülme sonrası kılcal geçirimsizlik katsayısı.....	55
Çizelge 4. 10. Donma-çözülme sonrası su emme oranları, (%)	56
Çizelge 4. 11. % 1.5MgSO ₄ + % 1.5Na ₂ SO ₄ ve % 3MgSO ₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri, (MPa)	57
Çizelge 4. 12. % 1.5MgSO ₄ + % 1.5Na ₂ SO ₄ ve % 3MgSO ₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin UPV değerleri	61
Çizelge 4. 13. % 1.5MgSO ₄ + % 1.5Na ₂ SO ₄ ve % 3MgSO ₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı	62
Çizelge 4. 14. % 1.5MgSO ₄ + % 1.5Na ₂ SO ₄ ve % 3MgSO ₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin su emme oranları	65
Çizelge 4. 15. % 1.5MgSO ₄ +% 1.5Na ₂ SO ₄ ve % 3MgSO ₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri, (%)	67

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1. Geopolimerlerin alkali aktivasyonu için tanımlayıcı model	6
Şekil 2. 2. Geopolimerizasyonun reaksiyon aşamaları (Kantarıcı, 2013)	7
Şekil 2. 3. Yüksek fırın cürufu çeşitleri (Engin, 2015)	9
Şekil 2. 4. Yüksek fırın cürufunun üretim süreci	10
Şekil 2. 5. Granülasyon yöntemi (Tokyay ve Erdoğan 2009).....	11
Şekil 2. 6. Peletleme yöntemi (Tokyay ve Erdoğan 2009)	11
Şekil 2. 7. Portland çimentosu ve YFC'li çimentonun kıyaslaması	13
Şekil 2. 8. Yüksek fırın cürufunun betona etkileri	13
Şekil 2. 9. Yüksek fırın cürufu kullanım alanları	14
Şekil 3. 1. Doğal agrega	26
Şekil 3. 2. Geri dönüştürülmüş agrega	27
Şekil 3. 3. Sülfatlar	28
Şekil 3. 4. Agrega öğütme makinesi olarak kullanılan çeneli kırıcı.....	29
Şekil 3. 5. Hassas terazi.....	30
Şekil 3. 6. Etüv	30
Şekil 3. 7. Beton karışım mikseri	31
Şekil 3. 8. Çelik kalıplar.....	31
Şekil 3. 9. Donma- çözülme makinesi.....	32
Şekil 3. 10. UPV ölçüm cihazı	32
Şekil 3. 11. Basınç dayanım test cihazı	33
Şekil 3. 12. SEM cihazı.....	33
Şekil 3. 13. Arşimet deneyi	35
Şekil 3. 14. Numunelerin etüve konması	37
Şekil 3. 15. Numunelerin su kürüne konması	37
Şekil 3. 16. Geopolimer beton numuneler.....	38
Şekil 3. 17. Kılcal su emme düzeneği	40
Şekil 3. 18. Kılcal geçirimsizlik düzeneğindeki numuneler.....	41
Şekil 3. 19. Donma çözülme döngüsündeki numuneler.....	43
Şekil 3. 20. Sülfat çözeltisinde bekletilen numuneler	43
Şekil 4.1. 28 günlük geopolimer beton numunelerin basınç dayanım değerleri	45
Şekil 4.2. 28 günlük geopolimer kontrol numunelerin UPV değerleri	48
Şekil 4.3. Farklı oranlarda GDA miktarına ve dozaja göre değişen kılcal geçirimsizlik katsayısı	49
Şekil 4.4. Kontrol numunelerin su emme yüzdeleri (%).....	50
Şekil 4.5. Donma çözülme sonrası basınç dayanım değerleri.....	52
Şekil 4.6. Donma çözülme sonrası UPV değerleri.....	53
Şekil 4.7. Donma çözülme sonrası ağırlık değişimi.....	54
Şekil 4.8. Farklı oranlarda GDA miktarına ve dozaja göre değişen donma çözülme sonrası kılcal geçirimsizlik katsayısı.....	55
Şekil 4.9. Donma çözülme sonrası su emme yüzdeleri (%).....	56

Şekil 4.10. % 1.5MgSO ₄ + % 1.5Na ₂ SO ₄ çözeltide bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri	58
Şekil 4.11. % 3MgSO ₄ çözeltide bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri	58
Şekil 4.12. % 1.5MgSO ₄ + % 1.5Na ₂ SO ₄ çözeltide bekletilen numunelerin UPV değerleri	61
Şekil 4.13. % 3MgSO ₄ çözeltide bekletilen numunelerin UPV değerleri	62
Şekil 4.14. % 1.5MgSO ₄ + % 1.5Na ₂ SO ₄ çözeltide bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı	63
Şekil 4.15. % 3MgSO ₄ çözeltide bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı.....	64
Şekil 4.16. Sülfatta bekletildikten sonra kılcal geçirimsizlik uygulanan numunelerin görüntüleri.....	64
Şekil 4.17. % 1.5MgSO ₄ + % 1.5Na ₂ SO ₄ çözeltide bekletilen numunelerin su emme oranları	66
Şekil 4.18. % 3MgSO ₄ çözeltide bekletilen numunelerin su emme oranları	66
Şekil 4.19. % 1.5MgSO ₄ + % 1.5Na ₂ SO ₄ çözeltide bekletilen numunelerin zamana bağlı ağırlık değişimleri.....	68
Şekil 4.20. % 3MgSO ₄ çözeltide bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri (%).....	68
Şekil 4.21. Geopolimer beton numunelerde görülen yoğun jel yapısı	70
Şekil 4.22. Geopolimer beton numunelerde donma-çözülme etkisinde görülen çatlaklar..	71
Şekil 4.23. Geopolimer beton numunelerde donma-çözülme etkisinde görülen agrega-hamur ara yüzey görüntüleri	71
Şekil 4.24. Geopolimer beton numunelerde sülfat etkisinde görülen çatlaklar.....	72
Şekil 4.25. Geopolimer beton numunelerde sülfat etkisinde görülen agrega-hamur ara yüzey görüntüleri	72
Şekil 4.26. Geopolimer beton numunelerde sülfat etkisinde görülen etrenjit görüntüleri ..	72

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ASTM	American Society for Testing and Materials
CaO	Kalsiyum oksit
Ca(OH)₂	Kalsiyum hidroksit
K	Potasyum
K₂SiO₃	Potasyum silikat
KOH	Potasyum hidroksit
Na	Sodyum
Na₂O	Sodyum oksit
Na₂SiO₃	Sodyum metasilikat
NaOH	Sodyum hidroksit
PÇ	Portland çimentosu
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SiO₂	Silisyum oksit
TS	Türk Standartları
UK	Uçucu kül
UPV	Ultrasonik geçiş hızı
YFC	Yüksek fırın cürufu
CO₂	Karbondioksit
GDA	Geri dönüştürülmüş agrega
Al₂O₃	Aliminyum oksit
SD	Silis dumanı
C-S-H	Kalsiyum silika hidrat
C₂S	Di kalsiyum silikat
C₃S	Tri kalsiyum silikat
C₃A	Tri kalsiyum alüminat

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KULLANILARAK ÜRETİLEN GEOPOLİMER BETONLARIN DONMA-ÇÖZÜLME VE SÜLFAT DİRENCİNE GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ AGREGANIN ETKİSİ

Ayşe İlayda UĞURLU

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

82+xiv sayfa

2020

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

Bu çalışmada bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu (YFC), agrega olarak da geri dönüştürülmüş agrega (GDA) kullanılarak hazırlanan geopolimer betonun donma-çözülme ve sülfat etkilerine karşı dayanıklılığı incelenmiştir. Bu amaçla karışımlarda 300, 400 ve 500 kg/m³ YFC kullanılmış olup, GDA'lar ise %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında kullanılarak, toplam 15 grup geopolimer beton üretilmiştir. Üretilen geopolimer beton numuneler 28 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra 100 çevrim donma çözülme etkisine ve 12 hafta boyunca 2 farklı sülfat çözeltisine maruz bırakılmıştır. Numunelerin basınç dayanımına, UPV değerine, kılcal geçirimsizlik katsayısına, su emme yüzdesine ve ağırlık değişimine bakılarak kontrol numuneleriyle karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre 100 donma çözülme çevrimi sonrası numunelerin basınç dayanımı azalmış, kılcal geçirimsizlik katsayısında ve su emme yüzdelerinde artış meydana gelmiştir. Ayrıca genel olarak YFC miktarı arttıkça, geopolimer betonun basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Ancak GDA oranı arttıkça, basınç dayanımı azalmıştır. Sülfat çözeltilerinde beklenen numunelerde ise basınç dayanım değeri azalmış, kılcal geçirimsizlik katsayısı ve su emme miktarlarında artış olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler mikro yapı görüntüleri ile desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer beton, geri dönüştürülmüş agrega, yüksek fırın cürufu, donma çözülme etkisi, sülfat etkisi

ABSTRACT

Master of Science Thesis

THE EFFECT OF RECYCLED AGGREGATE ON THE FREEZE-THAW AND SULFATE RESISTANCE OF GEOPOLYMER CONCRETE PRODUCED BY USING BLAST FURNACE SLAG

Ayşe İlayda UĞURLU

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

82+xiv sayfa

2020

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

In this study, the resistance to freeze-thaw and sulphate effects of geopolymer concrete prepared by using blast furnace slag (YFC) as binder and recycled aggregate (GDA) as aggregate was investigated. For this purpose, were used a total of 15 groups of geopolymer concrete were produced by using 300, 400 and 500 kg/m³ YFC and 0%, 25%, 50%, 75% and 100% GDA. The produced geopolymer concrete samples were exposed to 100 cycles of freeze-thaw effect and 2 different sulphate solutions for 12 weeks after completing their 28-day curing period. It was compared with control samples by looking at compressive strength, UPV value, capillary permeability coefficient, water absorption percentage and weight change of the samples. According to the test results, after 100 freeze-thaw cycles, the compressive strength of the samples decreased, and the capillary permeability coefficient and water absorption percentages increased. In addition, in general, it has been observed that as the amount of YFC increases, the compressive strength of geopolymer concrete increases. However, as the GDA ratio in samples increased, its compressive strength of samples decreased. In the samples kept in sulphate solutions, it was observed that the compressive strength value decreased, the capillary permeability coefficient and the amount of water absorption increased. The obtained data were supported by microstructure images.

Keywords: Geopolymer concrete, recycled aggregate, blast furnace slag, freeze-thaw effect, sulfate effect

1.GİRİŞ

Dünyanın en önde gelen sektörlerinden biri olan inşaat sektörünün olmazsa olmazı betondur. Yapılan araştırmalar sonucunda beton o kadar çok üretilen bir malzemedir ki dünya üzerinde yıllık kişi başına düşen beton üretimi yaklaşık 2.5 tondur (Aitein, 1998). Betonun en maliyetli bileşeni ise çimentodur. Portland çimentosu (PÇ) nun hem maliyet olarak hem de üretim aşamasında çevreye verdiği zarardan dolayı sürekli olarak alternatifi aranmaktadır. Bu bağlamda çevreci beton için yapılan çalışmalar hız kazanmaktadır.

Beton üretimindeki temiz teknolojiler ile ilişkili ana hedefler:

- (a) CO₂ salınımının azalması,
- (b) çimento üretimindeki fosilden üretilen yakıt ya da enerji tüketiminin azalması,
- (c) beton karışımında, farklı türde kimyasalların kullanımı gibi çevre ya da sağlığı tehlikeye sokabilecek maddelerin azalması,
- (d) çimentoya yüksek oranda uçucu kül (UK) ya da diğer atık türlerinin ikame edilip kullanılmasıyla tasarruf edilmesi,
- (e) inorganik polimerler, alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılar, manyezit çimentosu ve sülfaluminat çimentolar vb. yeni bağlayıcı malzemelerin kullanımı,
- (f) geri dönüşümlü bağlayıcı/beton oranının çeşitli olasılıkları ve alternatif agregaların kullanımınıdır (Suhendro, 2014).

Son yıllarda artan kentleşme ve nüfus ile beraber küresel ısınma, atmosfere yayılan sera gazı etkisi tüm dünyada artmaktadır. Bunun sonucu tüm dünyayı olumsuz etkilemeye başladığında her alanda olduğu gibi beton üretimi konusunda da artık çevreye en az zarar veren dayanıklılığın yanı sıra çevreci beton üretimi üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu bağlamda eğer 1 ton PÇ üretmek istersek atmosfere 1 ton CO₂ yayılmış olacaktır. Ancak portland çimentosunun tersine ticari bir yan ürün olan UK ve cüruf çimento ile kıyaslandığında atmosfere yaklaşık %80-90 daha az sera gazı salmaktadır (Parthiban vd., 2017).

Giderek artan nüfus oranı ve kentleşme yıllık beton üretiminin her geçen yıl daha da artmasına sebep olmuştur. Bununla birlikte inşaat ve yıkım atıklarının fazlalığı ciddi bir çevresel sorun haline gelmiştir. Bu yüzden beton içerisinde yaklaşık olarak %70-80 oranında kaba ve ince agrega kullanılmaktadır. Çevreyle dost sürdürülebilir ve daha

ekonomik beton üretimi için GDA kullanımı önemli bir seçenek olarak görülmüştür (Shaikh, 2016).

Avrupa Çevre Ajansı ve Eurostat'ın verilerine göre, Türkiye'nin de içinde bulunduğu Avrupa'daki 28 ülkenin 2012 yılında ürettiği toplam atık miktarı 109 ton olup inşaat sektörünün payı 106 ton olarak belirtilmiştir (Mika, 2017). Genel olarak inşaat sektöründen kaynaklanan atık üretimiyle ilgili detaylı ve sağlıklı istatistikî bilgiler bulunmadığından, Türkiye Hazır Beton Birliğinin derlediği 2012 yılına ait hazır beton üretiminin 93 milyon m³'ten fazla olduğu göz önüne alındığında geri dönüşüm konusunun önemi daha iyi anlaşılmaktadır. İnşaat atıklarının dolayısıyla GDA kullanımının çevre ve ekonomi üzerindeki direkt etkilerinin yanında dolaylı bir etkisi de ciddi önem arz etmektedir. Kentsel dönüşüm 2005 yılında ilk kez eskiyen kent kısımlarının yeniden inşası ve restorasyonu, daha sonra ise afet riski altındaki alanların dönüştürülmesi olarak karşımıza çıkmıştır. Bu dönüşüm sonucunda iki milyar tona yakın inşaat atığı ortaya çıkacaktır. Açığa çıkan bu inşaat atıkları dolgu malzemesi olarak, agrega ve zemin güçlendirme malzemesi olarak kullanılabilir (Yürek, 2013).

Bu çalışmanın amacı yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılarak geopolimer numuneler üretmek ve ayrıca GDA kullanılarak üretilen bu geopolimer betonların donma-çözülme ve sülfat etkilerine karşı dayanıklılığını, basınç dayanımını, geçirimsizliğini tespit etmektir. Küresel çimento endüstrisinin yıllık atmosfere yaklaşık 2.8 milyar ton sera gazı yaymaktadır (Vora vd., 2012). Bu veriler dikkate alındığında bu çalışmada çimento yerine atık olan cürufun kullanılmasıyla daha çevreci daha ekonomik, sürdürülebilir beton üretimi amaçlanmıştır. Bu amaçlarla atıkların değerlendirilmesi üzerinde durularak literatüre katkı sağlaması hedeflenmiştir.

Bu çalışmada bağlayıcı olarak YFC, alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat, agrega olarak belirli oranlarda GDA kullanılmıştır. Geopolimer beton karışımlarında ön deneyler yapılarak silis modülü 1.5, NaOH çözeltisinin molaritesi 10 M, Na₂O içeriği %10 ve su/bağlayıcı (s/b) oranı 0.43 olarak belirlenmiştir. Geopolimer beton karışımların dozajı 300-400-500 kg/m³ ve GDA oranları %0, %25, %50, %75 ve %100 seçilerek toplamda 15 adet geopolimer grup hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlarda ince agrega hacim olarak %60, iri agrega ise %40 olarak belirlenmiştir. Geopolimer beton karışımları 50x50x50 mm boyutlarındaki çelik kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıplar etüvde 80°C sıcaklıkta 24 saat bekledikten sonra numuneler kalıplardan çıkarılıp 28 gün boyunca

23±1°C sıcaklıktaki kür havuzunda kr edilmiştir. Üretilen numuneler kr sürelerini tamamladıktan sonra basınç dayanımı, ultrasonik geçiş hızı, kılcal geçirimlilik, su emme ve ağırlık kaybı deneyleri yapılmıştır. Referans numuneleri her dozaj GDA oranlarına göre incelenmiştir. Ardından numuneler 100 çevrim olacak şekilde donma çözülmeye maruz bırakılmıştır. Donma çözülme ve sülfat etkisine maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımı, ultrasonik geçiş hızı, kılcal geçirimlilik, su emme ve ağırlık kaybı oranlarına bakılarak hem referans numuneleriyle karşılaştırıldı hem de dozaj ve artan GDA oranlarına göre karşılaştırılma yapılmıştır. Elde edilen numunelerin sülfat direncini ölçmek için magnezyum sülfat ve sodyum sülfat çözeltisinde 4, 8 ve 12 hafta süresince bekletilmiştir. Son olarak mikroyapı analizi yapılmıştır.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Geopolimer

Çimento üretiminin atmosfere sera gazı etkisi oluşturması, karbon dioksit (CO₂) salınımını artırması özellikle inşaat ve bina endüstrisinin dünya emisyonun yaklaşık %17'sini içermesi sonucunda betondaki portland çimentosunu azaltmaya yönelik araştırmalar çoğalmıştır. Bu alanda en önemli başarı geopolimer beton üretimi olmuştur. Literatürde yapılan çalışmalar sonucunda, geopolimer beton üretiminin normal bir beton üretimine göre %80 daha az enerji kullanımı ve daha az karbon emisyonu sağladığı görülmektedir (Akbarnezhad vd., 2015).

Geopolimer ismi tarihte ilk kez 1978 yılında Davidovits tarafından inorganik moleküllerin oluşturduğu yapılara verilmiştir. Geopolimer bağlayıcıların çevre dostu olmalarının yanı sıra asit ve sülfat saldırılarına karşı gösterdikleri direnç ve yüksek erken dayanımlarının belirlenmesi nedeniyle PÇ'ye bir alternatif olarak görülmektedir (Thokchom vd., 2009). Geopolimerleşme süreci yüksek sıcaklıkta yapılmadığından bir polimerleşme süreci olduğundan yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonu açısından daha avantajlıdır.

Geopolimer son yıllarda yüksek performanslı kompozit ve seramik gibi malzemelerin üretiminde özellikle çimento esaslı bağlayıcılar yerine kullanılabilen ve sentetik alüminosilikat sınıfına giren bir malzemedir (Davidovits,1994). Alüminosilikatlar, ana oksitleri alüminyum oksit (Al₂O₃) ve silisyum oksit (SiO₂) olan, doğal ya da sonradan ısıl işlem sonucu amorf yapıya sahip malzemelerdir. Doğada bulunan ve atık olarak ortaya çıkan pek çok alüminosilikat malzeme bulunmaktadır. Bu açıdan, bu malzemelerin bağlayıcı olarak kullanımı çevre etkisi ve inşaat sektörü açısından daha da önem kazanmaktadır. Geopolimer beton üretiminde en yaygın olarak kullanılan alüminosilikat malzemeleri UK ve YFC'dir (Pachece vd., 2015).

Geopolimerler düşük karbon ayak izine sahip çevre dostu ve sürdürülebilir alternatif bir malzemedir. Alüminosilikatın polikondasyonundan elde edilir. Sıvı bir alkali silikat çözeltisi ile aktive edilen katılardır (Duan vd., 2017). Alüminosilikat kaynağı olarak UK, metakaolin ve YFC gibi yan ürünler sodyum veya potasyum bazlı yüksek alkali çözeltilerle reaksiyona sokulur (Sata vd., 2013).

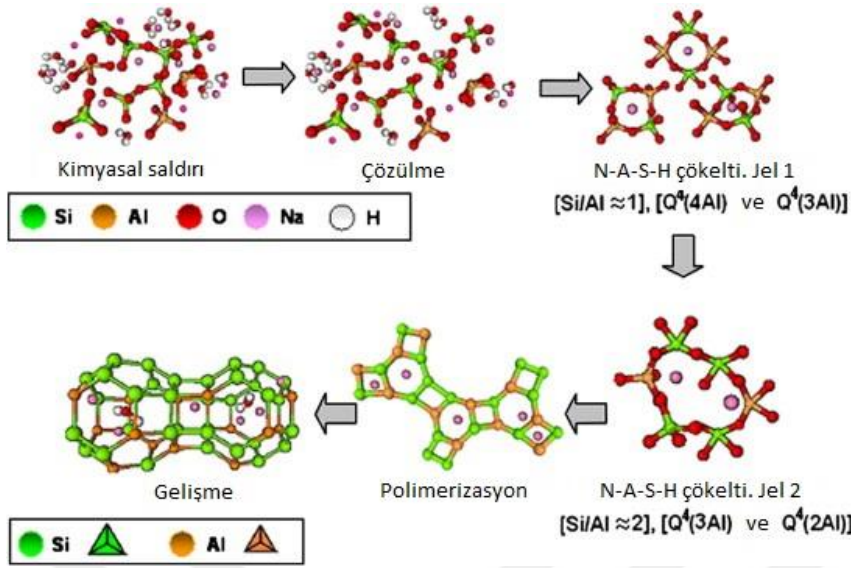
2.1.1. Geopolimer kimyası

Geopolimer betonun kimyasal bileşenleri normal PÇ'li betonlardan farklıdır. Bunun nedeni geopolimerlerin kalsiyum silikat hidrate (C-S-H) jeli yerine geopolimerik alüminosilikat hidrat (A-S-H) jelinden oluşmasıdır (Albitar vd., 2017).

Geopolimer oluşum süreci alkali bir ortamda Si-O-Al ve Si-O-Si gibi kovalent bağların polimerleşmesi ile devam eder. Geopolimerizasyon teknolojisinde kaolin, feldispat ve endüstriyel katı atıklar (UK, cüruf, madencilik atıkları vb.) gibi çeşitli alüminosilikat malzemeler katı hammaddeler olarak kullanılmaktadır. Bu alüminosilikat kaynakların reaktiflikleri bu malzemelerin kimyasal mineralojik kompozisyonlarına, yapılarına, morfolojilerine, inceliklerine ve camsı faz içeriklerine bağlıdır. Kaynak malzemelerinin amorf olması ve yeterli reaktif camsı içeriğe sahip olması geopolimer için ana kriterdir. Alüminosilikat malzemelerin aktif edilmesinde sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3), potasyum hidroksit (KOH) ve potasyum silikat (K_2SiO_3) gibi alkali aktivatörler kullanılmaktadır. NaOH'e göre KOH'in alkalilik seviyesi yüksek olmasına rağmen NaOH daha fazla silikat ve alüminat monomeri oluşturma kapasitesine sahiptir (Singh vd., 2015). Geopolimerler silisyum ve alüminyum içeren cüruf ve UK gibi endüstri yan ürünleri ya da metakaolin gibi doğal malzemelerin termal olarak aktive edilmesiyle elde edilirler. Bir alkali aktive edici çözelti içerisinde silisyum ve alüminyum çözüldükten sonra moleküler zincirler içinde polimerleşip bağlayıcı madde olurlar (Aleem ve Arumairaj, 2012).

Kaynak malzemeleri ve alkali sıvılar olmak üzere geopolimerlerin iki ana bileşeni bulunmaktadır. Alümino-silikat esaslı geopolimerler için kaynak malzemeleri alüminyum ve silisyum açısından zengin olmalıdır. Bunlar kaolin, kil vb. doğal mineraller olabildiği gibi; UK, silis dumanı, cüruf vb. yan ürün malzemeleri de geopolimerler için kaynak malzemeleri olabilmektedir. Geopolimerler için kaynak malzemesi seçiminde maliyet, uygunluk, uygulama türleri gibi birçok parametre bulunmaktadır. Alkali sıvılar ise genellikle potasyum veya sodyum esaslı çözülebilir sıvı metallere tercih edilir. Geopolimerizasyonda sodyum hidroksit ya da potasyum hidroksit ve sodyum silikat ya da potasyum silikat karışımları yaygın olarak kullanılan sıvı alkalilerdir (Lloyd ve Rangan, 2010).

2005 yılında Fernandez-Jimenez ve Palomo tarafından alkali alüminosilikat bağlayıcıların mikroyapısal gelişimini tarif etmek için Şekil 2.1'deki grafik modeli önermişlerdir (Shi vd., 2011).



Şekil 2. 1. Geopolimerlerin alkali aktivasyonu için tanımlayıcı model

Geopolimerin en iyi özellikler gösterdiği ürünler ise 750°C'de kalsine olmuş metakaolinit kilinin alkali tuz ve alkali silikatlar ile aktifleştirilmesi ile elde edilen çözeltisinin, düşük ısıda (40-100°C) fırınlanmasıyla elde edilebilmektedirler (Davidovits, 2008). Geopolimer gördüğü ısı işlemler sonrası monolitik (yekpare taş) seramik yapıya ulaşmaktadır (Zeybek, 2009).

Alkali aktive edilmiş bağlayıcıların oluşumu ve sertleşme reaksiyon mekanizması tam olarak anlaşılammıştır, ancak hammaddenin yanı sıra alkali aktivatör türüne bağlı olduğu düşünülmektedir. Geopolimerizasyonun reaksiyon aşamaları Şekil 2.2'de görülmektedir.

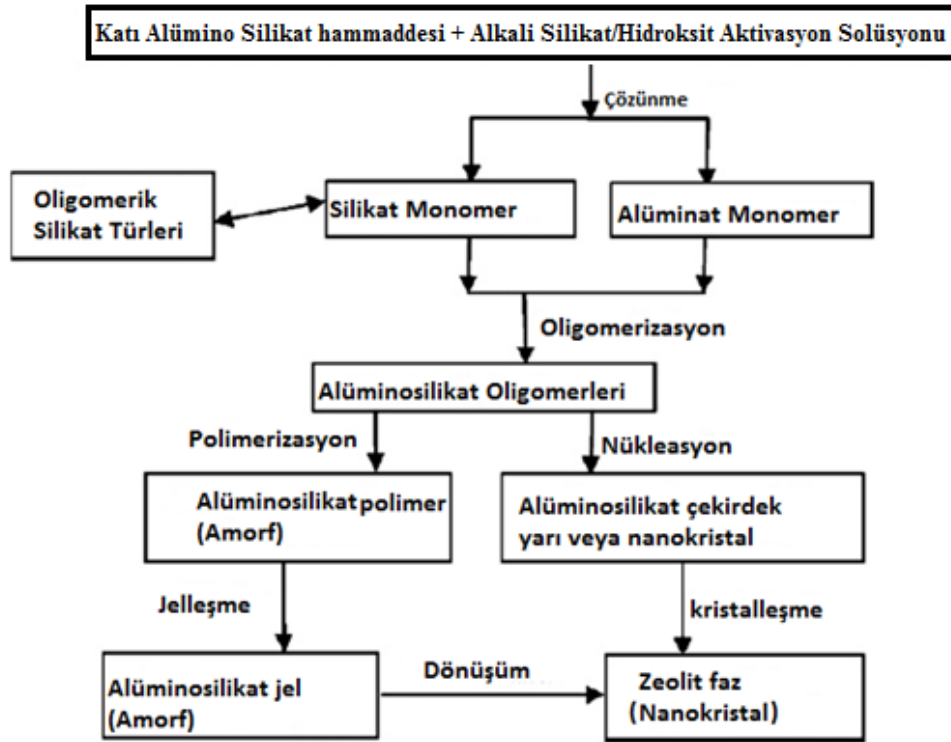
2.1.2. Geopolimer betonun avantajları

PC ile karşılaştırıldığında geopolimerlerin avantajları şunlardır (Li vd., 2004);

- Bol hammadde kaynağı: Geopolimer üretiminde herhangi puzolanik bileşik veya alkali çözeltilerle kolay çözülen silikatlar ya da alümino-silikatlar bir kaynak olarak yeterli olabilmektedir.
- Enerji tasarrufu ve çevre koruması: Geopolimerler için yüksek enerji tüketimine gerek duyulmamaktadır. Doğal alümino-silikatların düşük rölatif sıcaklıktaki (600°C ile 800°C) ısı işlemleri sonucu uygun geopolimerik hammaddeler elde

edilmektedir. PÇ ile karşılaştırıldığında, geopolimerlerin %60 daha az enerji tüketimi yaptığı varsayılmaktadır ve düşük miktarda CO₂ yaymaktadır.

- Basit hazırlama tekniği: Alümino-silikat reaktif malzemeler ve güçlü alkali çözeltilerin karışımı ile geopolimerler basit bir şekilde sentezlenebilir ve oda sıcaklığında kür edilebilirler. Kısa sürede yeterli dayanıma ulaşmaktadır. Geopolimer betonların hazırlanması PÇ'li betonun hazırlanmasına benzemektedir.
- İyi hacim kararlılığı: Geopolimerler, PÇ'ye göre %80 daha az büzülme yaparlar.
- Kısa zamanda uygun dayanım kazanımı: Geopolimerler, sertleşmeye başladığı ilk 4 saatte nihai basınç dayanımının %70'ine ulaşabilirler.
- Mükemmel dayanıklılık: Geopolimer beton ya da harç çok uzun süre hava koşullarına karşı fazla işlev kaybına uğramadan dayanabilir.
- Yüksek ısı dayanımı ve düşük ısı iletkenliği: Geopolimer 1200°C'ye kadar herhangi bir işlev kaybı olmaksızın dayanabilir. Geopolimerin ısı iletkenliği 0.24-0.3 W/m.K arasındadır ve bu değer hafif tuğlaların ısı iletkenliğinden daha düşüktür.



Şekil 2. 2. Geopolimerizasyonun reaksiyon aşamaları (Kantarıcı, 2013)

2.1.3. Geopolimerlerin Kullanım Alanları

Geopolimerler olumlu yönleri sayesinde inşaat, otomotiv, havacılık, plastik, metalurji uçak gibi alanlarda kullanılmaktadır. Özellikle yapı endüstrisinde, yol yapım çalışmalarında, zemin iyileştirme ve taşıyıcı olan yapılarda malzeme olarak kullanılmaktadır. Seramik malzeme üretiminde de kullanılmıştır. Ayrıca bunlarla birlikte atık yönetimi, sanat ve dekorasyon gibi alanlarda kullanımı artmıştır.

Tarihteki mısır piramitleri ve roma amfi tiyatrosu gibi yapıların mikro yapısı incelendiğinde geopolimer beton kalıntılarına rastlanmıştır (Li vd., 2004).

Günümüze baktığımızda ise Avustralya da ki Queensland üniversitesindeki Küresel değişim enstitüsü binası dünya da ilk defa geopolimer beton kullanılarak yapılan yapıya örnek olmuştur (Ergin 2014). Yine aynı şekilde 1984 yılında Amerika da bir havaalanı betonu dökümünde geopolimer betonu karıştırılarak 6 saatte uçakların inebileceği sertlikte beton ve dayanım elde edilmiştir. 28 gün sonundaki betonun dayanımı ise yaklaşık 80 MPa olarak ölçülmüştür (Xu ve Deventer 1999).

2.2. Yüksek Fırın Cürufu

2.2.1 Yüksek fırın cürufu tarihsel gelişimi

Yüksek fırın cürufuyla ilgili ilk çalışmalara 1862'te Alman bir bilim adamı tarafından YFC granüle hale getirilerek başlanmıştır. Daha sonra 1865 yılında yine Almanya'da bir fabrikada YFC'lu çimento ilk kez üretilmiştir. Üretilen bu cürufllu çimento ise ilk defa 1892 yılında Almanya'da, 1896 yılında ise ABD'de ticari olarak üretilmeye başlanmıştır. Hatta bu cüruf içerikli çimento 1889 yılında Paris'te bir yeraltı metrosu yapımında kullanılmıştır. YFC'nin beton katkı malzemesi olarak kullanılması 1950 yılında çeşitli ülkelerde başlamıştır (Erdoğan ve Erdoğan 2007).

2.2.2 Yüksek fırın cürufu nedir?

Cüruf birçok çeşitli tesislerde atık bir ürün olarak ortaya çıkan yapay puzolan olarak değerlendirilebilir. Özünde cüruf maddesi içerisinde bazik esaslı bileşikler, kükürt, alümina ve silis gibi dayanıma katkı sağlayacak olan maddeleri barındıran tesislerde demir üretimi

sırasında yüksek sıcaklıklarda eriyik halde ortaya çıkan bir yan üründür (Dorum vd., 2009). YFC çeşitleri Şekil 2.3'de görülmektedir.

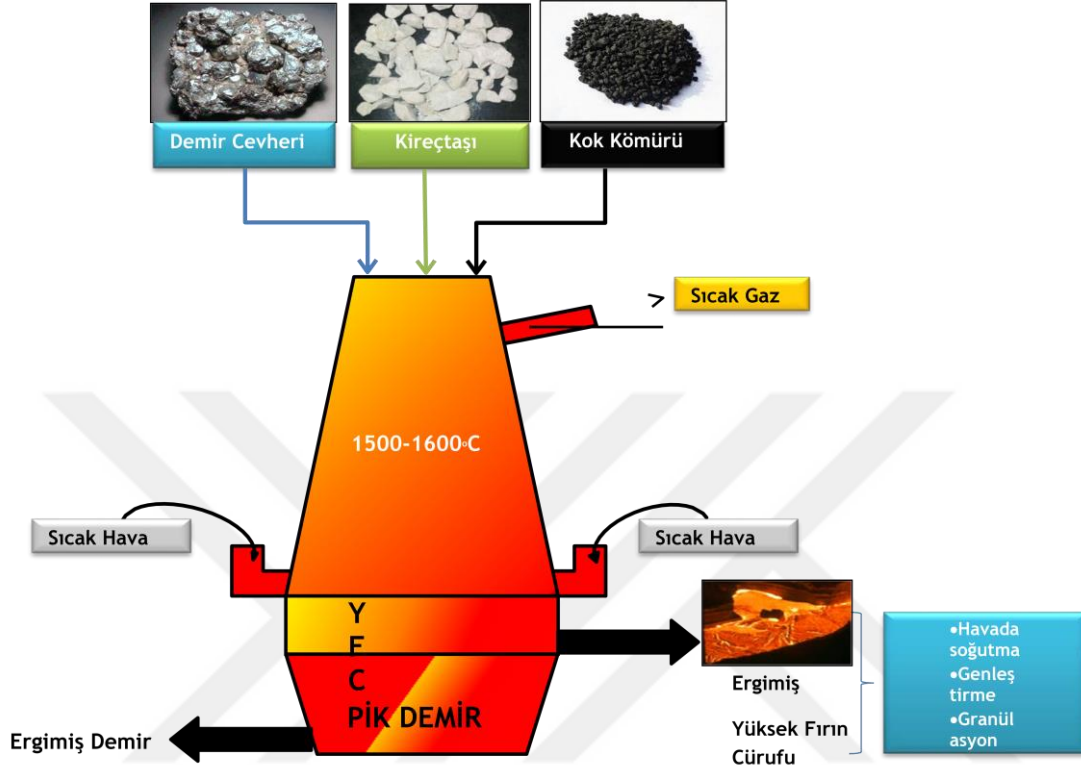


Şekil 2. 3. Yüksek fırın cürufu çeşitleri (Engin, 2015)

2.2.3. Yüksek fırın cürufunun elde edilmesi

Bilindiği gibi demir elementi doğada demir oksit olarak bulunmaktadır. Kullandığımız demiri elde edebilmek için demirin bir dizi aşamalardan geçmesi gerekmektedir. İşte bu yüzden demir oksitten demir elde edebilmek için önce demir oksit yabancı maddelerden temizlenir ve demir oksitin içerisindeki oksijenin uzaklaştırılması gerekir. Bu işlemlerin yapılabilmesi içinde yüksek fırınların içerisine kireçtaşı, demir cevheri ve kok kömürü düzenli bir şekilde konulmakta ve kok kömürü sayesinde yaklaşık 1500-1600°C ısı bu maddelere uygulanmaktadır. Böylece kok kömürü içerisindeki karbon ile demir oksitteki oksijen birleşerek CO ve CO₂ oluşturur. Böylece demir oksitteki oksijenden kurtulmuş olarak eriyik halde demir elde edilir. Bunun yanında ise yine eriyik halde aslında cüruf denilen yabancı maddeler topluluğu oluşur. Yapılan bu işlemlerin sonucunda yaklaşık olarak 1 ton sıcak demir eriyiğinden 200-600 kg cüruf oluşmaktadır. Bu oluşan cürufun yapısında ise önemli bir miktarda silika, alümina ve kalsiyum oksit yer alır (Erdoğan ve Erdoğan 2007). YFC'nin üretim süreci Şekil 2.4'de görülmektedir.

Türkiye de yıllık YFC üretimi yaklaşık olarak 3 milyon ton kadar, UK üretimi yaklaşık 14 milyon ton, plastik atıklar ise 200 bin ton civarındadır (Atabey 2018).

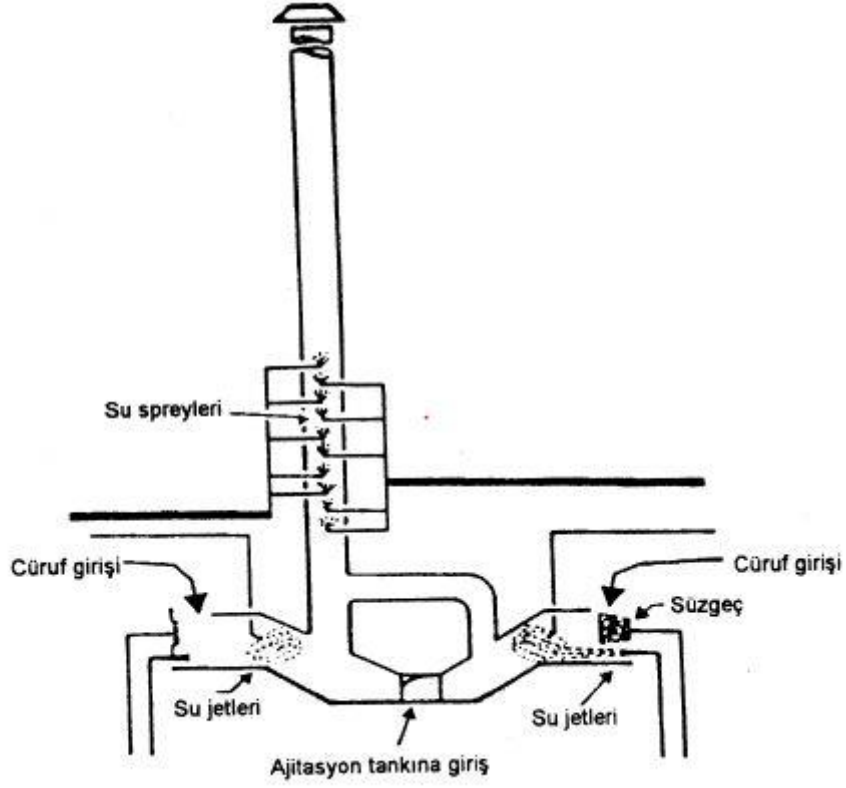


Şekil 2. 4. Yüksek fırın cürufunun üretim süreci

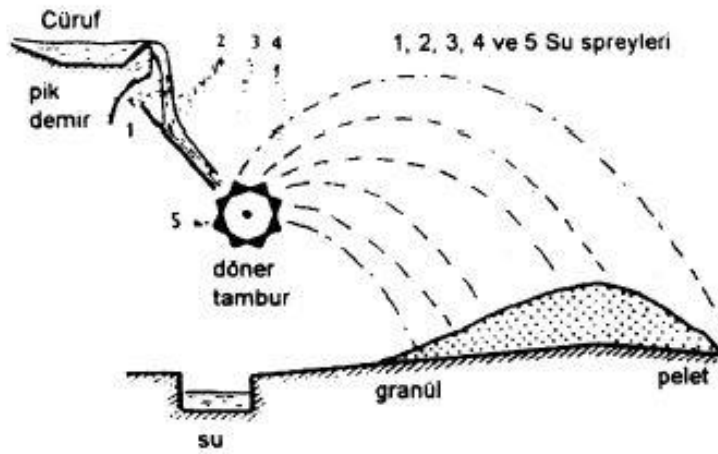
2.2.4.Yüksek fırın cürufunun soğutulması

YFC'ler tesislerde çok yüksek sıcaklıklarda elde edildiklerinden bir soğutma sürecinden geçmeleri gerekmektedir. Eğer cüruflar havada soğutulursa kristal bir yapıya sahip olurlar ve bu halleriyle kullanımları uygun olmamaktadır. Sıcak halde çıkarılan cüruflar granüle amorf yapıyı kazanabilmeleri için aniden soğutulmaları ya da su ile soğutulmaları gerekmektedir. Sıcak haldeki cürufun su ile soğutulması işlemine 'granülasyon yöntemi' denir (Şekil 2.5.). Böylece eriyik haldeki cüruf su ile soğutulurak iri taneli kum gibi granüle amorf bir yapıya gelir. Bu granüle haldeki cüruf ince öğütülerek beton içerisinde puzolan olarak kullanılabilir. Granülasyon yönteminin yanında daha az su ile cürufu soğutma yöntemi olan 'peletleme yöntemi' vardır (Şekil 2.6.). İki yöntem kıyaslandığında 1

ton cürufu soğutmak için granülasyon yöntemiyle 100 m³, peletleme yöntemi ile 1 m³ suya ihtiyaç vardır (Tokyay ve Erdoğan, 2009).



Şekil 2. 5. Granülasyon yöntemi (Tokyay ve Erdoğan 2009)



Şekil 2. 6. Peletleme yöntemi (Tokyay ve Erdoğan 2009)

2.2.5. Yüksek fırın cürufunun hidratasyonu

Hidratasyon reaksiyonları suya bağımlı reaksiyonlardır. YFC gibi bağlayıcılık özelliği gösteren maddelerle su tepkime vererek hidratasyon reaksiyonu oluşturur. Fakat normal portland çimentosunun hidratasyon tepkimesiyle karşılaştırıldığında YFC'nin hidratasyonu çok yavaş gerçekleşir. Bu hidratasyon hızını artırmak için alkali aktivatörler, çimento veya betonda mineral katkıları kullanılmalıdır. Bu yüzden YFC' nin hidratasyon hızını artırmak için alkali aktivatörler genellikle kullanılır.

YFC'li çimento üretiminde portland çimentosu su ile tepkimeye girerek dayanıma hiçbir katkısı olmayan kalsiyum hidroksit oluşur. İşte YFC bu oluşan $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girerek dayanım sağlayan C-S-H yapısını oluşturur. Bu yüzden yüksek fırın cüruf katkılı çimentoların dayanımları daha yüksek olmaktadır. Ayrıca $Ca(OH)_2$ azalması agrega ile hamur arasındaki aderansı artırır (Engin 2015).

2.2.6. Yüksek fırın cürufu ile portland çimentosunun karşılaştırılması

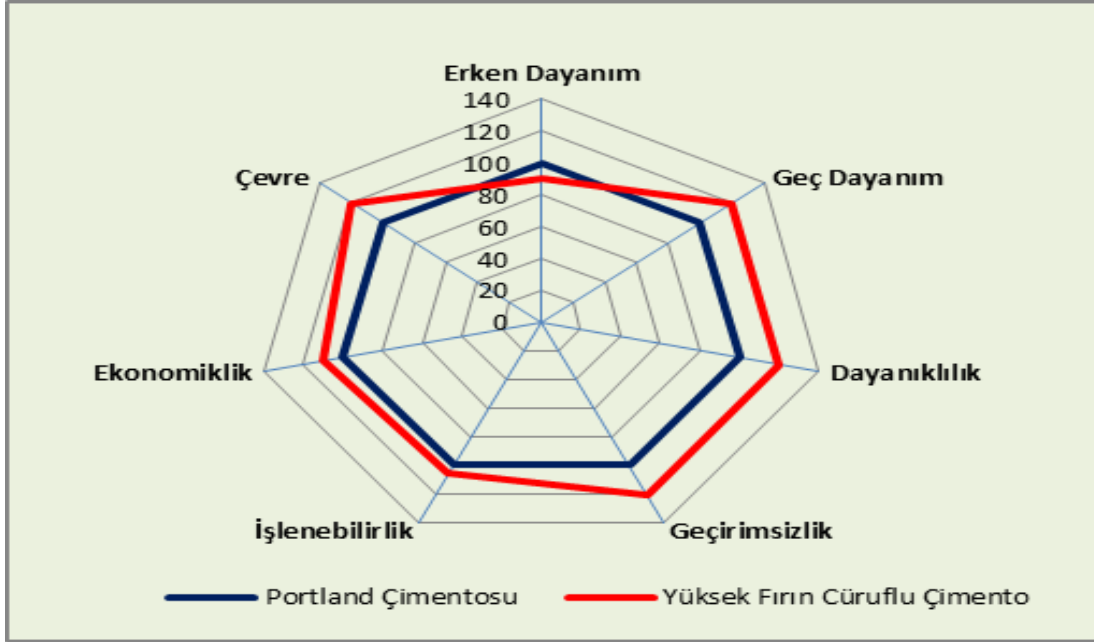
Çimento hidratasyonu sonucunda dikalsiyum silikat (C_2S), trikalsiyum silikat (C_3S), trikalsiyum alimünat (C_3A) gibi yapılar oluşur. Ancak bu yapılar YFC hidratasyonu sonucunda bunlardan sadece az miktarda C_2S yapısı içermektedir. Bu yüzden iki bağlayıcı madde farklı özelliklere sahiptir (Association, 2002).

Çimentoda erken dayanım kazandıran C_3S yapısı YFC'nin hidratasyonu sonucunda oluşmaz. Bu yüzden çimentonun erken dayanımı daha yüksek, YFC'nin erken dayanımı daha düşük ancak nihai dayanımı ise çimentodan daha fazla olmaktadır. Portland çimentosu ve YFC'li çimentonun karşılaştırılması Şekil 2.7'de verilmiştir.

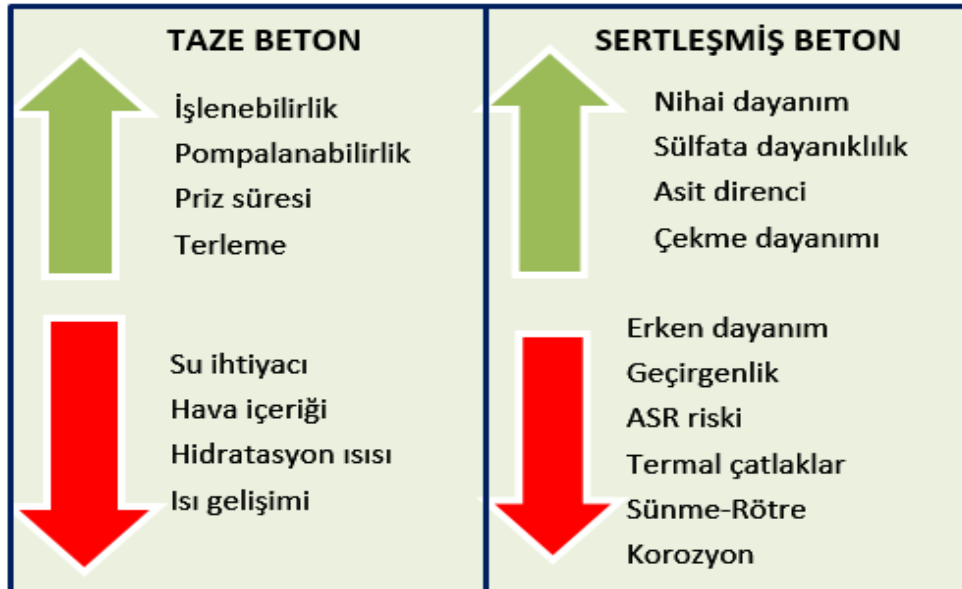
2.2.7. Yüksek fırın cürufunun faydaları

YFC'nin CO_2 emisyonunu azaltması, bir atık ürün olduğu için enerji tasarrufu ve çevre kirliliğini engellemesinin yanında yapısındaki silis, kalsiyum, alümina silis gibi dayanıma etkisi olan yapıların bulunması hidratasyon sırasında C-S-H gibi dayanıma etkisi olan yapı oluşturmasından dolayı dayanıklı yapılar oluşmasına katkı sağlar. Zichao ve Tarun (2007), YFC ve SD gibi mineral katkıların betonda kullanımı; ekonomik ve ekolojik yararlarının

yanı sıra betonun durabilitesinin gelişmesinde de önemli etkiye sahiptirler. Bunların yanında YFC'nin taze ve sertleşmiş betondaki etkileri Şekil 2.8 de verilmiştir.



Şekil 2. 7. Portland çimentosu ve YFC'li çimentonun kıyaslaması



Şekil 2. 8. Yüksek fırın cürufunun betona etkileri

YFC nin kimyasal yapısı dikkate alındığında erken dayanımı düşüktür. Ancak (28 günün sonunda) nihai dayanımı ciddi olarak artmaktadır. Bunların haricinde YFC çok ince yapıda olduğu için işlenebilmeyi artırır, su geçirimsizliğini azaltır. YFC'de çimentodaki hızlı reaksiyona sahip olan ve çok ısı açığa çıkaran C₃A fazı olmadığı için terlemeyi ve hidrasyon ısısını azaltır ve priz süresini geciktirir. Bunların yanında YFC'li betonların klorür geçirgenliği, sülfat ve alkali direnci, donatı korozyonu gibi çevresel etkiler üzerinde de olumlu etkileri vardır (Emiroğlu vd, 2011). YFC kullanım alanları Şekil 2.9'da gösterilmiştir.

Kütle Betonları	Deniz Yapıları	Sanat Yapıları
Barajlar Büyük temeller HES	Kıyı ve liman yapıları Açık deniz yapıları	Köprüler Tüneller
Kimyasal Tesisler	Altyapı	Yollar
Nükleer tesisler Biyolojik tesisler Kimyasal tesisler Depolar Arıtma tesisleri	Kanalizasyon boruları Menfezler Kuyular Fore kazıklar Sulama kanalları Zemin enjeksiyonları	Otoyollar Endüstriyel zeminler Havaalanı pistleri Köprü yolları

Şekil 2. 9. Yüksek fırın cürufu kullanım alanları

2.3. Geri Dönüştürülmüş Agrega

Dünyanın ciddi oranda artan nüfusunun bir sonucu olarak oluşan kaynak ve enerji yetersizliği hazır kaynakların verimli kullanılmasından ziyade atık pozisyonunda duran maddelerin geri dönüştürülüp kullanılması üzerinde daha çok durulmaya başlanmıştır. Bu bağlam da özellikle inşaat sektöründeki halihazırdaki atıklar çevresel ve ekonomik olarak ciddi bir önem arz etmektedir. Bu konuda çalışma yapan Oikonomou (2005) araştırmasının sonucunda sadece inşaat alanı doğal kaynakların ve enerjinin yaklaşık olarak %40-50 sini kullanmakta, bunun yanında dünyadaki atıkların %50'sinin inşaat sektörüne ait olduğunu tanımlamıştır.

Yine 2005 yılında riskli deprem bölgelerinde hasarlı binalara uygulanacak olan kentsel dönüşüm, artık bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır. Ve bu kentsel dönüşüm önümüzdeki yıllarda tamamlandığında yaklaşık 2 milyar tona yakın inşaat atığının oluşacağı öngörülmektedir (Yürek, 2013). Önümüzdeki yıllar boyunca oluşacak olan bu inşaat atıklarının yanında Türkiye Hazır Beton Birliğinin (2012) vermiş olduğu verilere göre yılda 93 milyon m³ ten fazla hazır beton üretimi vardır. Bu bilgiler göz önünde bulundurulduğunda GDA kullanımının çevresel, ekonomik ve yeni dünya düzeninde sürdürülebilirlik açısından ne kadar önemli olduğu ortaya çıkmıştır (Kadiroğlu vd., 2017).

GDA doğal agregaya kıyasla farklı özelliklere sahiptir. Örneğin yeniden düzenlenip kullanıldıkları için su emme oranı fazladır, yapılan deneyler sonucunda basınç dayanımının düşük olduğu görülmüştür. Yine agregalar içinde boşluk oranı fazladır, su ihtiyacı fazladır ve fazla gözeneklidir. Grondin(2011) tarafından yapılan bir çalışma sonucunda normal agregayla aynı işlenebilirlik özelliğine GDA'nın ulaşması için ekstra %15 daha su katılması gerekmektedir. Bu da dolayısıyla betonun basınç dayanımının düşmesine neden olmaktadır.

Yine de GDA'nın olumsuz etkilerinin yanında maliyet üzerinde yaklaşık olarak %40 kadar düşük maliyet ve CO₂ salınımının da ise yaklaşık %23 düşüş sağlamaktadır (Grondin, 2011).

2.4.Betonda Donma-Çözülme Olayı

Betonda donma-çözülme etkisiyle meydana gelen bozulmayı açıklamak için birçok kavram ortaya çıkmıştır. Betonun iki klasik donma-çözülme teorisi ilk olarak Powers tarafından yapılan çalışmalara dayanmaktadır. En çok bilinenlerden birisi Powers (1949) tarafından geliştirilen hidrolik basınç teorisi (bu teori günümüzde sadece çok doymuş şartlarda geçerlidir) ve daha sonra Powers ve Helmut (1953) tarafından teklif edilen osmotik basınç teorisi, özellikle çözücü tuzların negatif etkilerini açıklamakta önemli bir yere sahiptir. Öncü nitelikteki bu çalışmalardan sonra betonun donma-çözülme hasarı pek çok araştırmaya konu olmuştur. 1970'li yıllarda, Fagerlund donan bir betonda kritik doymunluk derecesi kavramını geliştirmiştir. Fagerlund'un bulgularına göre, malzemenin bir kez donmasından bile, malzemede çatlak ve zararlara neden olacak kritik doymunluk derecesi vardır. Litvan'a göre kapiler boşluklardaki su yerinde donmaz, ancak donma yapının dış yüzeylerinde yer alır. Aşırı soğuk su, boşluklu yapıda donma-çözülme zararlarına yol açan

kuruma ve su hareketine sebep olmaktadır. Daha sonra Setzer boşlukların yüzey gerilimini hesap ederek Litvan'ın teorisini tekrar gözden geçirip düzeltmiştir. Ayrıca Setzer ortaya koyduğu teori ile donma-çözülme çevrimleri esnasında çevreden emilen suyu açıklamaktadır. Penttala donma-çözülme çevrimleri esnasında, betonda ölçülen rölatif nem ve sıcaklıktan türetilen boşluk suyu basıncını termodinamik kurallara dayanarak hesap etmiştir. Eğer boşluk suyu miktarı bilinirse, beton yapıdaki basınç hesaplanabilir. Termodinamiğe dayanan bu teoriye göre, buz kütesine doğru boşluk suyunun hareketinin ana sebebi buzı çevreleyen küçük boşluklardaki donmayan boşluk suyu ile buz arasındaki kimyasal potansiyel farklılıktır (Penttala, 2006).

Bir beton belirli kür koşulları sağlandıktan sonra sertleşir. Ve bu sertleşmiş beton donma çözülme etkisinde kalınca bağlayıcı malzeme olan çimento hamurunun içindeki kapiler boşluklarda ki su donar. Suyun bir özelliği diğer maddelerle kıyaslandığında sıvı halden katı hale geçerken yani donarken hacminde yaklaşık %9 oranında bir artış görülür. Suyun bu özelliğinden dolayı betonun donmasında kapiler boşluktaki su donar ve hacmi artar. Sürekli art arda gelen donma çözülme etkisi bir betonun sadece donmasından daha tehlikelidir ve betonda daha büyük hasarlara yol açmaktadır. Örneğin bir önceki donma sırasında hacmin genişlemesiyle betonda oluşan ince bir çatlak peş peşe gelen çözülme ve tekrar donma esnasında büyüyebilir. Betonda oluşan bu sürekli gerilim ve donma çözülmeden sonra beton da dayanım azalması, ufalanma, çatlama, kabuk atma gibi olaylar yaşanabilir. Burada ilginç olan ise kalitesiz, yeteri kadar sıkışmamış, geçirimli bir betonun dayanımı, fiziksel ve mekanik özelliklerinin çok kötü olmasına karşın donma ve çözülme periyoduna maruz bırakıldığında çok etkilenmediği görülür. Bunun da nedeni betonun sıkıştırılmadığından geçirimli olduğundan içinde fazla miktarda hava boşluklarının olmasıdır (Baradan vd., 2002).

Betonun kapiler boşluklarında bulunan su normal bir su gibi davranış göstermez. Suyun normalde donma noktası 0°C iken beton içerisindeki kapiler boşluktaki sular daha düşük sıcaklıklarda donarken, daha küçük kapiler boşluklardaki sular -15 ile -20°C civarında donmaktadır. Jel boşluklarındaki sular ise -78°C donmaktadır. Bu kapiler boşlukların beton içerisinde farklı büyüklükte olmasından dolayı donma esnasında bir miktar su donarken diğer sular donmayabilir. Bu durumda da donan suyun hacmi belirli bir miktar arttığından henüz donmamış sulara hidrolik basınç uygulamaktadır. Bu hidrolik basınç ise çimento hamurunda çatlaklara ve bozulmalara yol açmaktadır (Erdoğan 2007).

Betonun donması aşamalı olarak gelişir. Bunun nedenlerini:

- a) Betonda ısı transferinin hızına,
- b) Henüz donmamış olan suda çözülmüş bulunan alkalilerin konsantrasyonlarının tedrici artışına ve
- c) Donma noktasının boşluğun boyutuna göre değişmesine bağlamak mümkündür.

Betonda teorik olarak donma ilk önce büyük kapiler boşluklardaki sulara başlar daha sonra küçük boşluklara yayılır (Öztütüncü 1992).

Beton içerisinde kapiler boşluklardan daha küçük boşluklar vardır. Bu boşluklar jel boşluklarıdır ve burada bulunan sular -78°C ve daha altında dondukları için jel boşluklarında donma olayı ya da buz oluşmaz. Ancak jel suyu ve oluşan buz arasında beton içerisinde sıcaklık farkı çok olduğundan bunun dengelenmesi için jel suları buz içeren kılcal boşluklara doğru hareket etmeye başlar. Bu hareketin sonucunda donmaması gereken sular da donar ve beton içerisinde kütleli bir genişleme oluşur. Esasen beton içerisindeki oluşan bu buz basıncının artmasını sağlayan iki sebep vardır.

1. Suyun sahip olduğu özellikten dolayı sıvı halden katı hale geçtiğinde yani donduğunda yaklaşık %9 hacim artışı meydana gelir. Betonun boşlukları içerisindeki su donduğunda hala donmamış olan suyu hacim artışından dolayı dışarıya atma eğilimindedir. Ve bu su ne kadar güçlü bir etkiyle karşılaşır o kadar fazla hidrolik basınç meydana gelir. Yani çimento hamuru ne kadar geçirimsizse o kadar fazla hidrolik basınç meydana gelir.

2. Betonda donma çözülme esnasında oluşan bir diğer basınç ise osmotik basınçtır. Hatta bazı kaynaklarda donma çözülme hasarının büyük sebebi osmotik basınç görülmüştür. Şöyle ki betonun içerisindeki kapiler boşluklar içerisindeki suların bir kısmı donar bir kısmı ise hala sıvı halde kalır. İşte suyun katı ve sıvı haldeki fazları arasında büyük oranda yoğunluk farkı oluşur. Oluşan bu yoğunluk farkından osmotik basınç oluşmaktadır (Neville 1995).

Betonda donma çözülme etkisini en aza indirmenin en etkili yolu hava sürükleyici katkı maddesi kullanmaktır. Hava sürükleyici katkı maddesi betonun içerisinde birbirinden bağımsız küçük homojen hava boşlukları oluşmasını sağlar. Kılcal boşluklarda su donduğu takdirde su bu oluşan hava boşluklarına doğru yayılarak donmanın etkisiyle oluşan hidrolik basınç ortadan kalkar (Pigeon ve Pleau, 1995). Betonun donma dayanıklılığının artması için hava sürükleyici katkı maddelerinin yanında betonun içeriği de önemlidir. Donmaya

karşı dayanıklı bir beton üretmek istiyorsak çimento hamurunun kompasitesi büyük kullanılan agregaların ise boşluk hacminin küçük olması gerekmektedir (Postacıoğlu, 1987).

2.5. Betonda Sülfat Etkisi

Betonarme yapılarda özellikle köprü ayakları, deniz suyunun etkisine maruz kalan bina temelleri, iskeleler gibi yapılarda sülfat betona mekanik ve fiziksel anlamda ciddi zararlar vermektedir. Beton sülfatı boşluklara emdiğinden dolayı hacim genişlemesine dolayısıyla betonun genişlemesine yol açar, bu olağanüstü genişmeden dolayı betonda bozulmalar ve ağırlık kaybı meydana gelir. Bunların sonucunda ise betonarme yapılarda basınç dayanımı düşüklüğü sülfat etkisinde ortaya çıkmaktadır. Ayrıca yer altı yapılarında topraktan gelen atık suları, yağmur suları, deniz suları aracılığıyla biriken sülfat iyonları betonda önemli derecede korozyona da neden olmaktadır (Al-Akhras, 2006).

Normal bir betonda çimento hidrasyonu sonucunda oluşan kalsiyum hidroksit ile ortamda bulunan sülfat iyonlarının reaksiyona girmesi ile alçıtaşı, etrenjit ve jips oluşmaktadır. Oluşan bu malzemelerin hacmi büyük olduğundan betonun genişlemesine neden olurlar. Normal bir betonun pH değeri 13 civarında olması lazımdır. Çimento hidrasyonu oluşan hidroksitler ile sülfat iyonları tepkimeye girerek ortamın pH seviyesini düşürürler bu da betona ciddi zararlar vermektedir. Çimento hidrasyonu sonucu oluşan ve betona ciddi dayanıklılık özelliği kazandıran C-S-H jelinin de yapısını sülfat iyonları bozmaktadır. Bunun bir sonucu olarak betonun basınç dayanımı azalmaktadır (Uyan, 2003).

Sülfat etkisinin bir diğer önemli etkisi ise betonarme yapılarda neden olduğu donatı korozyonudur. Beton normal pH seviyesinin altına düşerse betonarme yapılarda donatıyı koruyan tabaka da azalır donatı korozyonu ortamda su ve oksijenin bulunmasıyla başlamış olur. Bu korozyon genişlemeye sebep olur ve beton pas payını çatlatır. Böylece donatı bütün dışardan gelecek tehlikelere açık halde olur (Ilıca vd., 2008).

Beton içerisinde sülfat etkisini en aza indirmek için uzun yıllardır araştırmalar yapılmaktadır. En etkili yöntem ise sülfatın özellikle çimentonun hidrasyonu esnasında reaksiyona girip beton yapısını bozduğu için betonda çimento yerine silis dumanı, cüruf, UK vb. gibi mineral katkı malzemelerinin betonda sülfat direncini artırıcı etkileri gözlemlenmiştir (Lee vd., 2005). Örneğin Al-Akhras (2006) tarafından yapılan bir çalışmada, %5 oranında Na₂SO₄ çözeltisine maruz kalan numunelerde mineral katkı olarak metakaolin eklenen numunelerde sülfattan dolayı genişleme daha az görülmüştür.

Yapılan başka bir çalışmada betona çimento yerine ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında metakaolin katarak sülfat direncini incelemişlerdir. Bu kullanılan metakaolin içeriği sülfat direncine karşı betonda olumlu sonuçlar vermiştir (Güneyisi vd., 2007).

2.6. Daha Önce Yapılan Çalışmalar

Porthiban ve Mohan (2017) yaptıkları çalışmada GDA'ların mühendislikte etkisi ve alkali aktif cüruf katkılı betonun durabilite özelliklerini incelemişlerdir. Kullanılan GDA'lar 4.75 mm'lik elekten geçirildikten sonra 2M sülfürik asitte 5 gün bekletilmiştir. Normal portland çimentosu ve öğütülmüş fırın cürufu kullanılmıştır. Aktivatör olarak sodyum silikat kullanılmıştır. OPC AAS0, AAS25, AAS50, AAS75, AAS100 oranlarında olmak üzere 6 karışım hazırlanmıştır. Numunelerin işlenebilirlik, basınç dayanımı, klorür difüzyonu ve sülfat direncine bakılmıştır. İşlenebilirliğin çökme hunisi sonuçlarına göre OPC'de 120 mm olan çökme değerinin ASS'de cüruf oranı arttıkça düştüğü gözlemlenmiştir. Basınç dayanımı 7 ve 28 günlük küller sonucunda en iyi sonuç ASS50 de alındı. Su emme hacminde büyük değişim görülmemiştir. Klorür difüzyonu penetrasyon derinliği aktif cüruf oranı arttıkça arttı. Sülfat direnci ise kütle kaybı ve mukavemet kaybı en çok magnezyum sülfata batırılan numunelerde görülmüştür.

Shaikh (2016) yaptığı çalışmada GDA ve UK katkılı betonun mekanik ve durabilite özelliklerini incelemiştir. F sınıfı UK doğal agrega ve GDA kullanılarak %0 GDA, %15GDA, %30GDA, %50GDA olmak üzere 4 karışım hazırlanmıştır. Numuneler 60 derecede 24 saat kürlenmiştir. Numunelerin basınç dayanımı (7 ve 28 günlük) elastisite modülü, su emme ve klorür penetrasyon derinliğine bakılmıştır. Basınç mukavemetinin ve elastisite modülünün eklenen GDA oranında 7 ve 28 günlük kür sürelerinin ikisinde de azaldığı görülmüştür. Su emme oranı ise betondaki GDA oranı arttıkça artmıştır. Geçirmezlik emilim klorür iyonu penetrasyonu ve geopolimer beton boşlukları GDA'nın eklenmesinden olumsuz etkilenmiştir.

Nuaklong vd., (2016) yaptıkları çalışmada UK geopolimer betonunda GDA'nın etkisi farklı molar NaOH altında incelenmiştir. Bağlayıcı olarak yüksek kalsiyum içerikli UK kullanılmıştır. Yapılan toplam 6 numunenin 3 karışımı doğal agregadan üretilip 8M, 12M, 16M NaOH çözeltileri kullanılmıştır. Diğer 3 karışımda GDA ve NaOH 8M, 12M, 16M kullanılarak 7 günlük kür süresi sonucunda numunelerin basınç dayanımı, su emme,

işlenebilirlik, klorür penetrasyon derinliğine ve sülfürik asit direncine bakılmıştır. Eklenen NaOH miktarına göre işlenebilirlik iki numunede de azalma göstermiştir. Su emme ise optimum NaOH miktarının 12 M olduğunda en iyi sonuç vermiştir. NaOH konsantrasyonuna bağlı olarak basınç dayanımı ve yoğunluk genel olarak GDA'lı geopolimer betonda artış gösterdi ama taze geopolimer betonda azalış göstermesine rağmen yine de taze geopolimer betonun basınç dayanımı daha yüksek elde edilmiştir. En iyi basınç değeri GDA da NaOH içeriği 12 M olan karışımda elde edilmiştir.

Corinaldesi ve Moriconi (2009) yaptıkları çalışmada GDA kullanılarak üretilen betonların performanslarında mineral malzemelerin basınç dayanımına ve elastisite modülüne etkisi incelenmiştir. GDA %26 oranında kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak UK ve SD kullanılmıştır. 4 karışım yapılmıştır; 1) doğal agregadan yapılan 2) GDA 3) GDA+UK 4)GDA+SD 100 mm lik küp numuneler 1, 3, 7, 14, 28 ve 56 gün kür edilmiştir. Sonuç olarak GDA ile SD ve UK birlikte kullanıldığında doğal agrega yerine geçme silis dumanının basınç dayanımı daha iyi sonuç vermiştir. UK'lı GDA nın ise elastisite modülü daha iyi sonuç vermiştir.

Junior vd., (2017) yaptıkları çalışmada GDA kullanılarak üretilen betonda donma-çözülme döngüsünün basınç dayanımı, porozite ve yoğunluk, gözeneklilik, su emme ve elastisite modülünü incelemişlerdir. Bağlayıcı olarak portland çimentosu kullanılmıştır. GDA %0, %15, %25 ve %50 oranlarında kullanılarak 4 farklı grup elde edilmiştir. Numuneler 3, 7, 28, 56 ve 90 gün sırasıyla kür edilmiştir. Daha sonra numuneler 300 donma-çözülme çevrimine tabii tutulmuştur. Sonuç olarak basınç dayanımı en iyi sonucu 90 gün sonunda %15 GDA'lı referans betonun dayanımına yaklaşmıştır. Gözeneklilik döngüden sonra tüm numunelerin gözenekliliği artmıştır. Yoğunluk döngüden sonra tüm numunelerde yoğunluk azalmıştır. Su emme döngü sonrası referans numunede su emme azalırken diğer numunelerde su emme oranı artış göstermiştir. Elastisite modülü 300 döngü sonunda GDA katkılı numunelerde elastisite modülü referans numuneye göre daha fazla olduğu görülmüştür.

Nuaklong ve Sata (2017) yaptıkları çalışmada metakaolin ve UK ile yapılan geopolimer betonun özelliklerine GDA etkisini incelemişlerdir. UK ile metakaolin kuru bir şekil de önce karıştırılmıştır. Daha sonra 12M NaOH çözeltisi ilave edilmiştir. Kaba ve ince agregalarda ilave edildikten sonra beton karıştırılarak 25 defa şişlenerek sıkıştırılmıştır. 1.seri de yüzde olarak 0MK-L, 10MK-L, 20MK-L, 30MK-L, 2. seride ise 0GDA, 10GDA,

20GDA, 30GDA kullanılmıştır. İlk seride ki L ler kireçtaşı agregalarını 2.Serideki C ler ise geri dönüştürülmüş agregaları anlatmaktadır. Toplamda 8 karışım elde edilmiştir. Numunelerin işlenebilirlik, basınç dayanımı, porozite, su emme ve klorür penetrasyon derinliği incelenmiştir. Sonuçta GDA'larda kireçtaşı agregalarına göre akışkanlaştırıcı koymadan da işlenebilirlik daha yüksektir. Ancak metakaolin yüzdesi arttıkça işlenebilirlik azalmıştır. Basınç dayanımında her iki seride de metakaolin miktarı arttıkça dayanıklılık artmıştır. Porozite yüzdesi ve yüzey aşınmasına karşı dayanıklılık ve su emme geri dönüşümlü agregalarda daha fazla olmasına rağmen metakaolin yüzdesi arttıkça azalmıştır. Klorür penetrasyon derinliği metakaolin yüzdesi arttıkça artmıştır.

Sata ve Wangsa (2013) yaptıkları çalışmada geçirgen geopolimer betonun basınç dayanımı, su geçirgenliği ve boşluk oranı gibi özellikleri incelemiştir. %10, %15 ve %20 oranlarında NaOH konsantrasyonları karıştırılmıştır. 4.5-9.5 mm boyutunda 3 çeşit agrega kullanılmıştır. Kaba agrega türleri ezilmiş kil tuğla, ezilmiş yapısal beton elemanı ve doğal kaba agrega bu deneyde kullanılmıştır. Örneklerin su geçirgenliği darcy yasasına göre karşılaştırılmıştır. Aşınma deneyleri Los Angeles metoduyla yapılmıştır. Sonuç olarak hem kırılmış yapısal beton elemanı ve kırılmış kil tuğlanın normal agrega yerine kullanılabileceği gösterilmiştir. Geri dönüştürülmüş agrega ve kırık küller doğal agregaya göre basınç dayanımı daha düşük çıkmıştır.

Duan vd., (2017) tarafından yapılan çalışmada UK, cüruf ve metakaolin katkılı geopolimer betonun geçirgenlik katsayısına bakılmıştır ve donma çözülme döngüsüne tabi tutulmuştur. Döngüsel donma çözülme testleri 25, 50, 75 ve 100 kez yapılmıştır. 1, 3 ve 28 gün kür edilmiştir. Yapılan geopolimer betonda su geçirgenlik katsayısı 1.7 boşluk oranı ise %25-30 oranında çıkmıştır. Basınç ve eğilme dayanımında 6 örnek grubu 1, 3 ve 28 günlük kürlerde bırakıldı en iyi sonuç 28 günlük kür sonucunda alınmıştır. Donma çözülme döngülerinde 75 döngüden sonra ciddi kütle kaybının yaşandığı gözlemlenmiştir.

Mineral katkı maddelerinin betonda dayanıklılığı arttırıcı etkilerinin en başında, beton boşluk yapısını iyileştirmeleri ve dolayısı ile geçirimliliği azaltmaları gelmektedir. Betonun bir fiziksel özelliği olarak bahsedilebilen kılcallık veya geçirimlilik, dayanıklılığının önemli bir belirleyicisidir. Betonda geçirimlilik, bağlayıcı malzeme miktarı, su içeriği, agrega tane dağılımı ve kür koşulları gibi etkenlere bağlıdır (Uyan vd., 1998).

Türkmen ve Gavgalı (2003) tarafından yapılan çalışmada portland çimentosu yerine %10SD+%20 YFC katılarak üretilen betonun normal üretilen bir betona göre en düşük geçirimsizlik katsayısına sahip olduğu görülmüştür.

Türkmen (2002), tarafından yapılan çalışmada SD ve YFC betonun kılcallığı üzerindeki etkisi araştırılmış ve; %10 SD değerine kadar kılcallık katsayısı azalmıştır. Bu açıdan, YFC katkılı yüksek dayanımlı betonların kılcallık katsayıları SD katkılı olanlardan daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. İnceliği yüksek olan puzzolanik malzemeler agrega bağlayıcı ara yüzeyinde bulunan boşlukları daha iyi doldurduğundan, betonun basınç mukavemetini arttırmakta, kılcal geçirimsizliğini azaltmaktadır. SD'nın YFC'ye göre daha ince olması betonun pek çok özelliğinde iyileşmeler meydana gelmesine sebep olmuştur.

Anuar vd.,(2011) geopolimer beton üretimi üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Sodyum hidroksit ve sodyum silikatı karıştırarak 2 farklı molarlarda (8M ve 14M) karışım yaparak bunları kıyaslamışlardır. 3, 7, 14, 21 ve 28 günlük kür süresine tabi tuttuktan sonra basınç dayanımlarını ölçmüşlerdir. Deneyin sonucu olarak molaritesi artırılan geopolimer betonun basınç dayanımının da arttığı gözlemlenmiştir.

Koushbaghi vd. (2019) yaptıkları çalışmada farklı monomer oranlarının ve GDA geopolimer beton üzerindeki mekanik özelliklerini ve durabilite özelliklerini incelemişlerdir. Bağlayıcı madde olarak metakaolin kullanılmış olup GDA %0, %10, %20 ve %30 olarak alınmış ve her serinin sodyum silikat/sodyum hidroksit oranları 2, 2.5 ve 3 olarak alınarak toplam 12 karışım yapılmıştır. 28 günlük kür süresinden sonra basınç dayanımı, GDA arttıkça azalmıştır. Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı arttıkça basınç dayanımı artmış ve su emme oranı azalmıştır.

Xie vd.,(2019) yaptıkları çalışmada GDA ile geopolimer betonun mekanik özelliklerinde UK ve granüle YFC'nin kombinasyonunun etkilerini incelemişlerdir. Numuneler hazırlanırken normal agrega ve GDA'dan normal portland çimento kullanarak ve su/bağlayıcı madde oranı:0,5 alınmış referans numunesi yapılmıştır. Geopolimer beton numuneleri hazırlanırken YFC/UK oranı sırasıyla %25, %50 ve %75 alınmış her bir grupta ayrıca su/bağlayıcı madde oranı 0.5, 0.4 ve 0.3 alınarak toplam referans numuneleriyle birlikte 11 grup hazırlanmıştır. Sonuç olarak yapılan basınç dayanımı çökme deneyleri sonucunda UK ve YFC kombinasyonunun GDA ile kullanılabilir olduğu gözlemlenmiştir.

Hu vd.,(2019) yaptıkları çalışmada GDA ile UK yerine kullanılan YFC'nin fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. GDA oranları sırasıyla %0, %50 ve %100'dür. UK yerine YFC ise sırasıyla %0, %10, %20 ve %30 olarak kullanılmış ve toplam 12 grup oluşturulmuştur. Numunelerin mekanik ve fiziksel incelemeler sonucunda normal agrega yerine GDA kullanılması iyi sonuç vermemiş ama YFC'nin UK yerine belirli oranlarda kullanılmasının betonu iyileştirdiği gözlenmiştir.

Zhang vd.,(2019) yaptıkları çalışmada UK ve YFC ve belirli oranlarda kullanılan GDA katkılı geopolimerik betonun özelliklerini incelemişlerdir. GDA oranları sırasıyla %0,%30,%50,%70 ve %100 dür. Her seride su/bağlayıcı madde oranı 0.3-0.4-0.5 olarak alınmış ve toplamda referans numuneleriyle birlikte 17 grup oluşturulmuştur. Molarite 8M alınmış olup YFC ve UK oranı numunelerde 1:1 kullanılmıştır. Deneysel sonuçlara göre GDA varlığı işlenebilirliği olumlu yönde etkilemiştir. Basınç dayanımında ise GDA oranı arttıkça artmış su/bağlayıcı oranı arttıkça azalmıştır.

Bouassi vd.,(2019) tarafından yapılan çalışmada UK, YFC ve yüksek magnezyumlu nikel cürufu kullanarak geopolimer betonun mekanik ve yapısal özelliklerine bakılmıştır. Yapılan çalışmada F sınıfı UK yerine %5, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında granüle YFC konularak harç hazırlanmış ve bunların 7, 14 ve 28 günlük dayanımlarına bakılmıştır. Diğer taraftan F sınıfı UK yerine %5, %10, %15 ve %20 oranlarında yüksek magnezyumlu nikel cürufu kullanılarak 7 ve 14 günlük basınç dayanımlarına bakılıp karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak en iyi dayanım oranını granüle YFC'de %20'lik karışım yüksek magnezyumlu nikel cürufunda ise %10'luk karışım vermiştir.

Zhao vd.,(2019) tarafından yapılan çalışmada UK ve belirli oranlarda cüruf katarak yapmış oldukları geopolimer betonun donma çözülme döngüsüne maruz bırakarak betonun mekanik ve yapısal özelliklerine bakılmıştır. Geopolimer betonda kullanılan F sınıfı UK yerine %10,%30 ve %50 oranlarında cüruf kullanarak referans numunesiyle beraber toplam 4 grup oluşturmuşlardır. Molarite 12M alınmıştır. Donma çözülme döngüsü 125 çevrimdir. Sonuçlara bakıldığında donma çözülme döngüsü sonrası kütle kaybına bakıldığında en fazla kütle kaybı %10 cüruf içeren karışımda olmuştur. Numunelerdeki cüruf oranı arttıkça kütle kaybı azalmış en iyi etkiyi ise %50 cüruf içeren karışım vermiştir. Basınç dayanımı testine göre donma çözülme çevrimi öncesi en iyi basınç dayanımını %50 cüruf içerikli numune vermiştir. Donma çözülme etkisine numuneler maruz bırakıldıktan

sonra en az basınç kaybını %50 cüruf içerikli numune vermiştir. Buradan da anlaşılacağı gibi cüruf oranının artması betonu olumlu yönde etkilemiştir.

Bui vd.,(2018) tarafından yapılan çalışmada %100 GDA içeren betonun mekanik özellikleri incelenmiştir. Karışımlar hazırlanırken su/çimento oranı sırasıyla 0.52-0.45-0.39 alınmıştır. Ayrıca karışımlara %3, %5 ve %7 oranlarında SD eklenerek mekanik özellikleri incelenmiştir. Referans numuneleriyle birlikte toplam 15 karışım hazırlanmıştır. Basınç dayanımı sonucuna göre SD oranı arttıkça dayanım artmıştır. Su/çimento oranı arttıkça dayanım azalmıştır. GDA içeren betona SD'nın katılması betonda olumlu etki oluşturmuştur.

Topçu vd.,(2004) tarafından yapılan çalışmada %0, %5, %10 ve %15 oranlarında SD katılarak yapılan geopolimer betonun donma ve çözülme döngüsü sonrasındaki basınç dayanımı, su emme oranı ve SEM analizlerine bakılmıştır. Donma ve çözülme döngüsü olarak -20°C ile +20°C arasında 25 çevrim yapılmıştır. Sonuçlara bakıldığında silis dumanının %15 katılması yaklaşık dayanımı %12 oranında artırmıştır. SD arttıkça betonun su emme oranı azalmış ancak donma ve çözülme etkisine sonraki betondaki ağırlık kaybı düzenli bir değişme göstermemiştir.

Ryu vd.,(2013) yaptıkları çalışmada %100 UK geopolimer betonda alkali aktivatörlerin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemiştirlerdir. 1.seride geopolimer betonda sodyum hidroksit molaritesi sırasıyla 6M, 9M ve 12M alınmıştır. 2. seride ise sodyum hidroksit/sodyum silikat oranı sırasıyla 0:100, 25:75, 50:50, 75:25, 100:0 alınarak 5 karışım hazırlanmıştır. Dayanım sonuçlarına bakıldığında 1. seride en iyi dayanım değerini 28 günlük kür sonucunda 12M karışım vermiştir. 2.seride ise en iyi basınç dayanım değerini sodyum hidroksit/sodyum silikat oranının 50:50 olduğu karışım vermiştir.

Shi vd.,(2012) yaptıkları çalışmada UK bazlı geopolimer betonda farklı oranlardaki GDA kullanılarak betonun mekanik ve yapısal özellikleri incelemiştirlerdir. GDA %0, %50 ve %100 oranlarında kullanılmıştır. 3 karışım normal portland çimentosu ile hazırlanmış diğer 3 karışım UK kullanılarak geopolimer beton hazırlanmış ve bunlar arasındaki farklılıklar incelenmiştir. Toplamda 6 karışım hazırlanmıştır. Basınç dayanım sonuçlarında GDA oranı arttıkça dayanımda azalma meydana gelmiştir ancak, uçucu külün katılması normal çimentoya göre dayanımı artırmıştır.

Nnaemeka ve Singh (2020) yaptıkları çalışmada UK bazlı geopolimer betona belirli oranlarda kaolin katarak bunun betona olan mekanik ve durabilite özelliklerini araştırmışlardır. UK'ün yanında sırasıyla kaolin oranlarını %0, %20, %30 ve %40 olarak referans numunesiyle birlikte 5 karışım hazırlanmıştır. 28 günlük kür süresi sonucunda numunelerin sülfat direnci, asit direnci, basınç dayanımı ve ağırlık kaybı gibi özelliklerine bakılmıştır. Kaolin miktarının artması sülfat direncinde betona olumlu yansımıştır.

Karakoç vd. (2016) yaptıkları çalışmada bağlayıcı malzeme olarak ferrokrom cüruf kullanarak hazırladıkları geopolimer betonun sülfata olan etkisini incelemişlerdir. Agregası olarak hem dere agregası hem de kırma kum agregası kullanmışlardır. Hazırlanan numuneler 28, 90 ve 180 gün kür edilerek %3, %5 ve %7 konsantrasyonlu sülfat çözeltilerinde 24 hafta bekletmişlerdir. Numunelerin basınç dayanımları artan sülfat yüzdesiyle beraber azalmıştır ve dayanım kaybı gözlemlenmiştir. Numunelerin ağırlık kayıplarında ise dere agregası kullanılan karışımlarda %0.86 ile %1.86 ağırlık artışı olurken kırma kum kullanılan karışımlarda ağırlık artışı %0.84 ile %2.11 arasında olmuştur.

Sun ve Wu (2013) yaptıkları çalışmada donma çözülme direncine geopolimer betonda en iyi sonucu hava sürükleyici katkı maddelerin verebileceğini göstermişlerdir. Uçucu küllü geopolimer beton ve normal portland çimentolu karışım hazırlamışlardır. Geopolimer beton hava sürüklenmesi olmadan 300 donma çözülme döngüsü sonrası %8.4 mukavemet kaybı görülmüştür. Hava sürükleyici kullanıldığında ise geopolimer betonda 300 döngü sonunda %6.8 mukavemet kaybı elde edilmiştir. Normal çimentolu bir betonda ise hava sürüklenmesi olmadan %20 kayıp yaşanırken hava sürükleyici kullanıldığı takdirde bu oran yalnızca %5 azalmıştır.

3.MATERYAL ve YÖNTEM

3.1.Materyal

3.1.1.Doğal Agrega

Üretilen geopolimer beton numuneleri için ince agrega olarak dere kumu, iri agrega olarak dere agregası kullanılmıştır. Üretilen geopolimer beton numunelerinde kullanılan agreganın en büyük tane boyutu 8 mm olarak seçilmiştir. Betonun iskeletini oluşturan agreganın tane dağılım oranı, maksimum tane büyüklüğüne göre TS 802 (2016)'de belirtilen uygun bölgeye düşecek şekilde seçilmiştir. İnce agreganın tane boyutu 0-4 mm ve iri agreganın tane boyutu 4-8 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 3.1). Temin edilen dere agregası musluk suyu ile yıkanıp laboratuvar ortamında bir gün bekletildikten sonra elek sarsma aletinde gerekli tane boyutlarına göre ayrılıp depolanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan agregalardan alınan örnekler üzerinde yapılan deney sonuçları Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

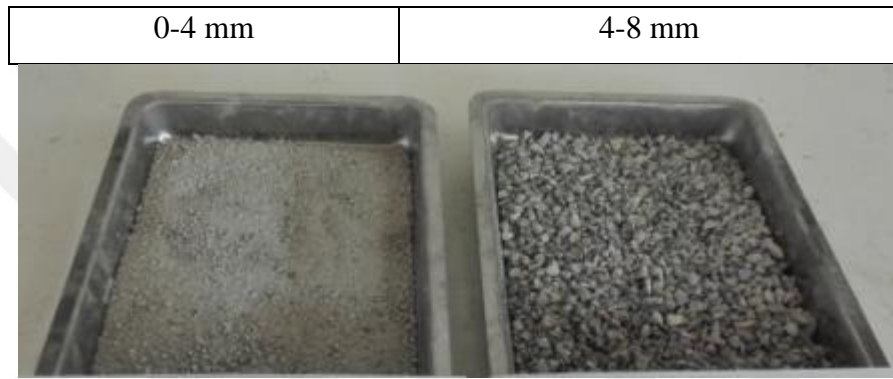


Şekil 3. 1. Doğal agrega

3.1.2.Geri dönüştürülmüş agrega

Üretilen geopolimer betonlar için kullanılan GDA, daha önce C30 normal beton olarak kullanılan bir betondan alınan numunelerin kırılması ve öğütme makinesinde öğütülmesiyle elde edilmiştir. Kullanılan GDA içinde önceki betona ait hem hamur hem de

agrega kısmı bulunmaktadır. Öğütülen agregalar 4 mm ve 8 mm eleklerden geçirildi. Betonun iskeletini oluşturan agreganın tane dağılım oranı, maksimum tane büyüklüğüne göre TS 802 (2016)'de belirtilen uygun bölgeye düşecek şekilde seçilmiştir. İnce agreganın tane boyutu 0-4 mm ve iri agreganın tane boyutu 4-8 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 3.2). Temin edilen kaba ve ince agregaların doygun yüzey özgül ağırlığı için 1 gün suda bekletildikten sonra ısıtılıp özgül ağırlığı bulunmuştur. Agregaların kuru yüzey özgül ağırlığı için etüvde 24 saat bekletilip Arşimed deneyi yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan agregalardan alınan örnekler üzerinde yapılan deney sonuçları Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.



Şekil 3. 2. Geri dönüştürülmüş agrega

3.1.3. Yüksek fırın cürufu ve özellikleri

YFC, Karabük ilindeki Karçimsa firmasından temin edilmiştir. Temin edilen malzeme öğütülmüş halde olup özgül yüzeyi $3996 \text{ cm}^2/\text{g}$ ve özgül ağırlığı 2.86 g/cm^3 'tür. Malzeme yeterli incelikte olduğundan dolayı mevcut haliyle kullanılmıştır. YFC'nin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1'de verilmiştir.

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

3.1.4. Aktivatörler

Bu çalışmada üretilen geopolimer beton numunelerinde sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum metasilikat (Na_2SiO_3) alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Geopolimer beton karışımında kullanılan katı NaOH, musluk suyu ile karıştırılarak belirlenen molaritede hazırlanmıştır. Kullanılan aktivatörlerin kimyasal içerikleri Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3. 2. Sodyum hidroksit ve sodyum metasilikatın kimyasal özellikleri

Özellikler	Sodyum Hidroksit	Sodyum Metasilikat
Molekül formülü	NaOH	Na_2SiO_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_2O içeriği (%)	-	8.9
SiO_2 içeriği (%)	-	27.5
H_2O içeriği (%)	-	63.6

3.1.5. Sülfatlar

MgSO_4 ve Na_2SO_4 içme suyu ile %1.5 MgSO_4 +%1.5 Na_2SO_4 konsantrasyonlu olarak karıştırılmıştır. Aynı yerde ise %3 MgSO_4 içme suyu ile karıştırılıp 4, 8 ve 12 hafta sonunda numunelerin basınç dayanımı, UPV, kılcal geçirimsizlik, su emme, ağırlık değişimi gibi beton özellikleri incelenmiştir. Deneyde kullanılan sülfatlar Şekil 3.3 de verilmiştir.



Şekil 3. 3. Sülfatlar

3.1.6.Aletler

3.1.6.1.Agrega öğütme makinesi

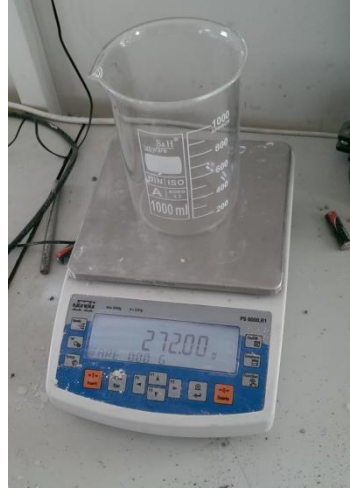
Geopolimer beton karışımında kullanılacak GDA için daha önce kullanılmış normal beton numune parçaları kırılarak belirli büyüklüğe kadar öğütülmüştür. Agregaya öğütme makinesi olarak kullanılan çeneli kırıcı Şekil 3.4'de görülmektedir.



Şekil 3. 4. Agregaya öğütme makinesi olarak kullanılan çeneli kırıcı

3.1.6.2.Hassas terazi

Deneyler de kullanılan malzemelerin deneylerden önce ve sonra ağırlıklarının tespiti için numunelerin ağırlık ölçümlerinde Şekil 3.5'deki Radwag marka 0.01 g hassasiyetli terazi kullanılmıştır.



Şekil 3. 5. Hassas terazi

3.1.5.3.Etöv

Agregaların özgül ağırlık ve su emme oranı tayini deneylerinde ve geopolimer beton numunelerin kür aşamasında Şekil 3.6'deki Mikrotest marka dijital termostatlı etöv kullanılmıştır.



Şekil 3. 6. Etöv

3.1.6.4. Mikser

Geopolimer beton üretimi için 5 litre kapasiteli düşük ve yüksek hızda karışım seçeneklerine sahip UTEST markalı laboratuvar tipi beton karışım mikseri kullanılmıştır. Beton karışım mikseri Şekil 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3. 7. Beton karışım mikseri

3.1.5.5. Çelik kalıplar

Hazırlanan geopolimer beton karışımları, Şekil 3.8'de görülen 50x50x50 mm boyutlara sahip çelik kalıplara yerleştirilmiştir.



Şekil 3. 8. Çelik kalıplar

3.1.5.6. Donma çözülme makinası

Numunelerin donma çözülme dayanıklılığının belirlenmesinde, ASTM C666-A prosedürüne uygun olan ve Şekil 3.9'da görülen donma çözülme makinesi kullanılmıştır. Numuneler 100 donma-çözülme çevrimine tabii tutulmuşlardır.



Şekil 3. 9. Donma- çözülme makinesi

3.1.6.7. Ultrasonik geçiş hızı ölçüm cihazı

Numunelerin UPV ölçümleri için Şekil 3.10'daki Proceq marka UPV ölçüm cihazı kullanılmıştır. Numunelerin ölçüm yapılacak yüzeylerine ultrason jeli sürülmüştür.



Şekil 3. 10. UPV ölçüm cihazı

3.1.6.8. Basınç dayanım cihazı

Numunelerin basınç dayanımlarının belirlenmesinde Şekil 3.11'deki ELE marka 3000 kN yükleme kapasitesine sahip otomatik tek eksenli basınç dayanım test cihazı kullanılmıştır. Numune boyutları 50x50x50 mm olduğundan dolayı yükleme başlıkları arasına 50x50 mm yükleme başlığına sahip aparat yerleştirilmiştir.



Şekil 3. 11. Basınç dayanım test cihazı

3.1.6.9. SEM Cihazı

Üretilmiş olan geopolimer beton numunelerin iç yapısını görebilmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Bu çalışmada numunelerin iç yapısını analiz etmek için Şekil 3.12'deki LEO EVO 40 isimli cihaz kullanılmıştır.



Şekil 3. 12. SEM cihazı

3.2. Yöntem

Bu bölümde normal ve geri dönüşümlü agregaların özgül ağırlıklarının bulunması, geopolimer beton karışım oranlarının belirlenmesi, karışımların bu oranlara göre

hazırlanması, kalıplara yerleştirilmesi, kür edilmesi ve sertleşmiş beton deneylerinde kullanılan yöntemler ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

3.2.1.Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler

GDA 'lar kırılıp öğütüldükten sonra en büyük tane boyutu 8 mm olarak seçilmiş ve öğütülen agregalar 4 mmlik ve 8 mm lik elekten geçirilmiştir. İnce ve kaba agregalar olarak adlandırılan bu agregaların özgül ağırlığını belirlemek için deneyler yapılmıştır.

Kaba agregalardan bir miktar alınarak 24 saat etüv kurusu olacak şekilde etüvde bekletilmiştir. Etüv kurusu numuneler tartılıp arşimed deneyiyle hacimleri bulunduktan sonra kaba agreganın kuru yüzey özgül ağırlığı hesaplanmıştır. Kaba agregalardan bir miktar daha alınarak 24 saat suya bırakılmış, 24 saatten sonra yüzeyleri kurularak tartılmış ve daha sonra arşimed deneyiyle (Şekil 3.13) hacim bulunarak kaba agreganın doymuş yüzey özgül ağırlığı bulunmuştur.

İnce agregalardan bir miktar alınarak 24 saatte etüvde bırakılmış, etüv kurusu ağırlığı tartıldıktan sonra yapısı çok ince olduğundan dereceli silindir kap yardımıyla hacmi ölçülmüş ve ince agreganın kuru yüzey ağırlığı hesaplanmıştır. İnce agregadan bir miktar alınarak 24 saat suda bekletilmiş, yüzeylerinin kurumması için bir ısıtıcı yardımıyla kurutulduktan sonra hacmi ölçülüp doymuş yüzey özgül ağırlığı hesaplanmıştır.

Agregaların hacimce yüzdeleri iri ve ince agregalar için sırasıyla %40 ve %60 olarak TS802(2016)'ya uygun olacak şekilde belirlenmiştir.

3.2.2.Geopolimer beton karışım seçeneklerinin belirlenmesi

Geopolimer beton üretiminde bağlayıcı malzeme olarak YFC kullanılmıştır. Geopolimer beton karışımlar için bağlayıcı dozaj miktarı 300, 400 ve 500 kg/m³ olmak üzere 3 farklı dozaj kullanılmıştır. Her bir dozaj için GDA oranları %0, %25, %50, %75 ve %100 olmak üzere oranlanmış ve toplamda 15 farklı grup oluşmuştur. Oluşturulan beton karışımlarının kodları Çizelge 3.3'de verilmiştir. Yapılan denemeler sonucu optimum silis modülü 1.5, s/b oranı 0.43, NaOH çözeltisinin molaritesi 10 M ve ağırlıkça sodyum oksit içeriği %10 olarak belirlenmiştir. Bu değerlere göre aktivatör miktarı ve hacmi hesaplanmıştır. Bağlayıcı malzemelerin ve aktivatörlerin hacimlerinin 1 m³'den çıkarılması ile toplam

agrega hacmi hesaplanmıştır. Belirlenen geopolimer beton karışım miktarları Çizelge 3.4-3.6'da verilmiştir.



Şekil 3. 13. Arşimet deneyi

Çizelge 3. 3. Üretilen geopolimer beton numune kodları

GDA oranları (%)	300	400	500
0	3G0	4G0	5G0
25	3G25	4G25	5G25
50	3G50	4G50	5G50
75	3G75	4G75	5G75
100	3G100	4G100	5G100

Çizelge 3. 4. Dozajı 300 kg/m³ olan geopolimer beton karışım miktarları

Karışımlar	0	25	50	75	100
YFC, (kg)	300				
Na ₂ SiO ₃ , (kg)	163,64				
NaOH çözeltisi, (kg)	77,85				
0-4 mm		238	476,06	714	952
GDA 4-8 mm		172,35	344,71	517,07	689,44
normal 0-4 mm	1013,63	760,21	506,84	253,42	0
agrega 4-8 mm	719,53	539,64	359,73	179,86	0
teorik birim hacim ağırlık, (kg/m ³)	2274,65	2251,69	2228,83	2205,84	2182,93

Çizelge 3. 5. Dozajı 400 kg/m³ olan geopolimer beton karışım miktarları

Karışımlar	0	25	50	75	100
YFC(kg)	400				
Na ₂ SiO ₃ (kg)	218,18				
NaOH çözeltisi, (kg)	46,48				
0-4 mm		222,81	447,29	670,94	894,61
GDA 4-8 mm		161,35	323,9	485,85	647,8
normal 0-4 mm	952,45	714,32	476,21	237,19	
agrega 4-8 mm	676,06	507,06	338,03	168,39	
teorik birim hacim ağırlık, (kg/m ³)	2293,17	2290,2	2270,09	2247,3	2227,07

Çizelge 3. 6. Dozajı 500 kg/m³ olan geopolimer beton karışım miktarları

Karışımlar	0	25	50	75	100
YFC, (kg)	500				
Na ₂ SiO ₃ , (kg)	181,82				
NaOH çözeltisi, (kg)	42,33				
0-4 mm		222,81	447,29	670,944	894,61
agrega 4-8 mm		161,346	323,9	485,85	647,8
normal 0-4 mm	952,45	714,324	476,21	237,188	
agrega 4-8 mm	676,06	507,064	338,03	168,388	
teorik birim hacim ağırlık, (kg/m ³)	2332,15	2329,694	2309,58	2286,52	2266,56

3.2.3. Geopolimer beton üretimi, numunelerin yerine konması ve bakımı

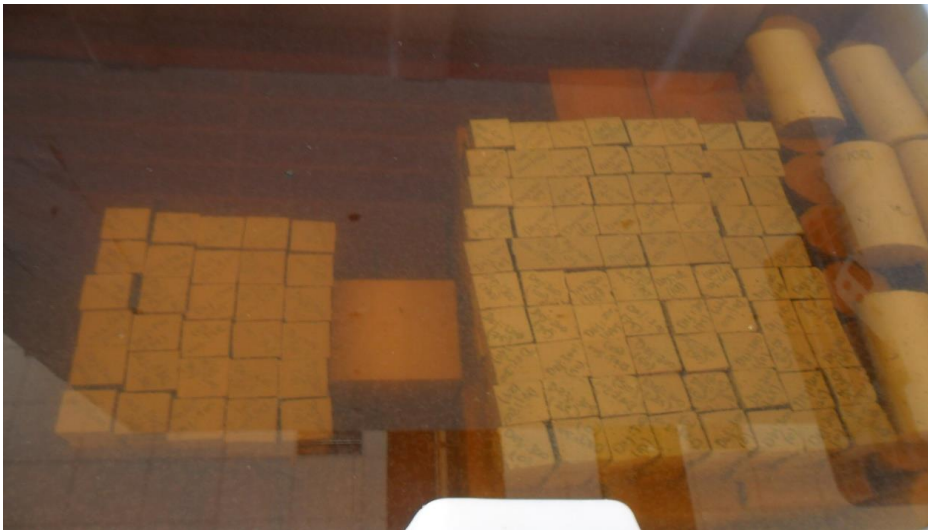
Geopolimer beton üretiminde kullanılan malzemeler belirlenen oranlarda 0.1 g hassasiyetli terazide tartılarak alınıp karışıma başlamadan önce kullanıma hazır hale getirilmiştir. İlk

olarak alkali aktivatörler 5 dakika süresince karıştırılıp ardından sırasıyla bağlayıcı malzeme, ince agrega ve iri agrega mikser kabına eklenerek karıştırılmıştır.

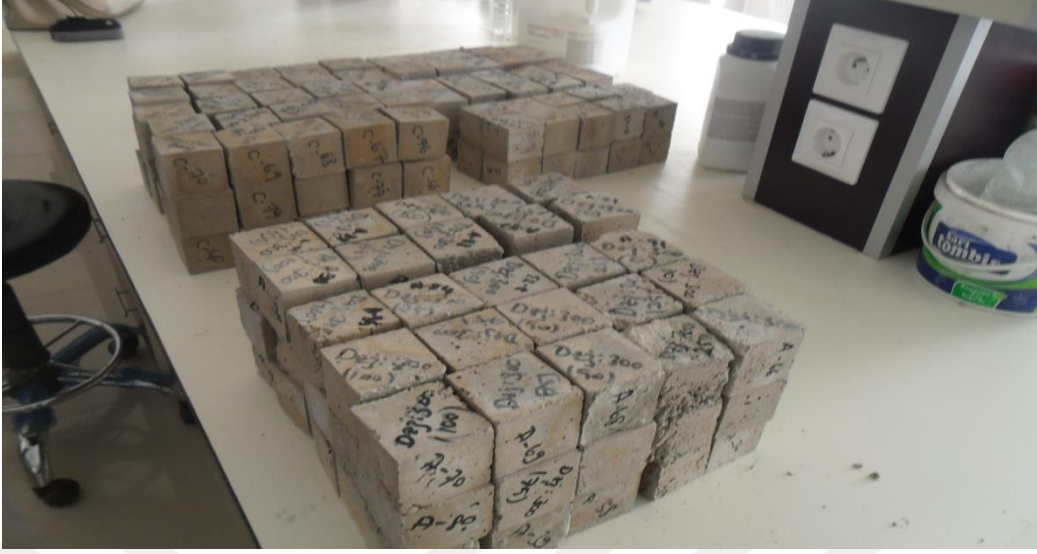
Hazırlanan geopolimer beton karışımı 50x50x50 mm boyutlarındaki çelik kalıplara yerleştirilmiştir. Karışımlar kalıplara döküldükten sonra, karışımın kalıp içerisine düzgün bir de yerleşmesi için kalıplara tokmakla vurularak titreşim etkisi uygulanmıştır. Geopolimer beton karışımı kalıplara yerleştirildikten sonra kalıplar alüminyum folyo ile sarılarak 80 °C'deki etüve konulmuştur (Şekil 3.14) Etüvde 24 saat bekleyen ve ardından kalıplardan çıkartılan numuneler kür havuzunda 27 gün boyunca 23±1°C sıcaklıkta kür edilmiştir (Şekil 3.15). Üretilen geopolimer beton numunelerinden bir kısmı Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3. 14. Numunelerin etüve konması



Şekil 3. 15. Numunelerin su kürüne konması



Şekil 3. 16.Geopolimer beton numuneler

3.2.4.Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler

Bu çalışma kapsamında üretilen geopolimer beton numuneleri 28 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra UPV'leri, basınç dayanımları, kılcal su emme miktarları, numunelerin su emme oranları, donma çözülme ve sülfat etkisine bakılmıştır. Elde edilen deney verileri kontrol numuneleri ile karşılaştırılmıştır.

3.2.4.1. Ultrasonik ses hızı ölçümü

Ultrasonik ses metodu ile beton içerisine yollanan ultrasonik dalganın geçiş hızı ölçülmektedir. Bu geçiş hızı ile betonun mukavemeti, elastisite modülü, homojenliği vb. özellikleri belirlenebilmektedir. Genel olarak 4570 m/s üzerindeki hızlarda beton çok kaliteli kabul edilirken, 3050 m/s altındaki hızlarda ise betonun kalitesiz olduğu düşünülmektedir (Şimşek, 2010).

UPV ölçümü ASTM C 597'deki prosedüre uygun olarak ölçülmüştür. İlk olarak ölçümlere başlamadan önce UPV ölçüm cihazının kalibre olup olmadığı kontrol edilmekte ve eğer cihaz kalibre değilse kalibre malzemesi ile cihaz kalibre edilmektedir. Ölçüm için

numuneler çözüldükten çıkarılıp musluk suyunda yıkanıp ardından kağıt havlu ile yüzeyleri kurulanmıştır. Kurulanan numunelerin ölçüm yapılacak yüzeylerine bir miktar ultrason jeli sürüldükten sonra alıcı ve gönderici uçlar ölçüm yüzeylerine tutturularak ölçüm yapılır. Her bir numune için 3 kez UPV ölçümü yapıp bu sonuçların ortalaması alınmıştır. Numunelerin UPV ölçüm değerleri Denklem 3.1 yardımıyla değerlendirilmiştir.

$$V = \frac{L}{T} \quad (3.1)$$

V: Dalga hızı, (m/s).

L: Pundit yüzeyleri merkezi arasındaki mesafe, (m).

T: Geçiş süresi, (s).

3.2.4.2. Basınç dayanımı

Geopolimer beton numunelerin basınç dayanımının belirlenmesi için TS EN 12390-3/ (2012) test metodu kullanılmıştır. Yapılan tüm deneylerden sonra numunelerin basınç dayanımı test edilmiştir. Referans numunesiyle sonuçlar kıyaslanmıştır.

Geopolimer beton numuneleri basınç dayanım test cihazına, numunelere uygulanacak yükleme yönü numunelerin döküm yönüne dik gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Numuneler cihaza yerleştirilmeden önce cihazın yükleme yüzeyleri temizlenmiştir. Numuneler aparata düzgün şekilde yerleştirildikten sonra cihaz ekranından numune boyutları seçilip, otomatik olarak cihaz tarafından numuneler 1.40 kN/s yük hızıyla yüklenmektedir. Numunelerin basınç dayanımları Denklem 3.2'deki eşitlik kullanılarak elde edilmiştir. Basınç dayanımları belirlenirken, her bir karışım için 3'er adet numune üretilmiş ve bu 3 numunenin basınç dayanımlarının aritmetik ortalaması kullanılmıştır.

$$F_c = \frac{P}{A_c} \quad (3.2)$$

F_c: Basınç dayanımı, MPa.

P: Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N.

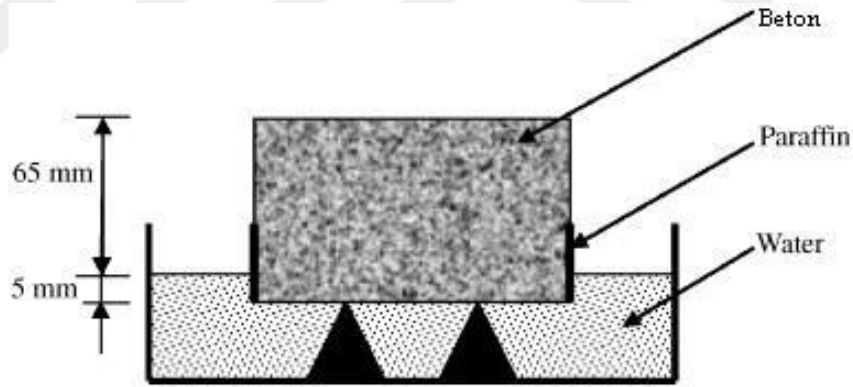
A_c : Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı, mm^2 .

3.2.4.3. Kılcal geçirimsizlik deneyi

Yapı malzemelerinin yüzeyleri su ile temas ettiği vakit, suyun yüzey gerilimi dolayısı ile numunedeki boşluklar suyu kapiler olarak içeriye doğru çekerler. Bu deney kapiler su emme veya kılcal su emme deneyi diye adlandırılan deney tekniği ile yapılabilir. Betonda yapılan kılcal su emme pratikte betonun alt yüzeyiyle temasa geçen suyun beton içerisinde boşluklarda yayılarak betonun üst yüzeyine doğru hareket etmesidir (Kocataşkın 2000, Uyan 1975). Su beton ile temasa geçtikten t süre sonunda, beton içerisindeki boşluklarda yükselmeye başlar. Belli bir h yüksekliğine ulaşır ve durur. Kılcallık katsayısının hesabında,

$$Q^2 = k \cdot t \quad (3.3)$$

eşitliğinden yararlanılmıştır. Burada; Q: birim alanda emilen su miktarı (cm^3/cm^2), k: kılcallık katsayısı (cm^3/dak), t: zaman (s) olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada, süre 5, 15, 30, 60 dakika ve 24 saat (1440 dak) olarak alınmıştır.



Şekil 3.17. Kılcal su emme düzeneği

ASTM C1585'e uygun bir şekilde kılcal geçirimsizlik deneyi yapılmıştır. Kılcal geçirimsizlik deneyi için her gruptan 3 numune alınmıştır. Numuneler 24 saat etüvde 105 ± 5 °C'de kurutulmuştur. Daha sonra yan yüzeylerinden su almaması için suya dayanıklı bir bant ile numunenin kenarları sarılmıştır. Daha sonra numuneler 5 mm suya girecek şekilde alt yüzeyinden su ile temas ettirilmiştir (Şekil 3.17). Numuneler 5, 15, 30, 60 dakika ve 24 saat sonra çıkarılarak tartılmıştır. Numunenin 24 saat içinde birim alanda kılcal olarak

emdiği su miktarından hareketle, kılcal geçirimlilik katsayısı Denklem 3.3 yardımı ile hesaplanmıştır. Kılcal geçirimlilik düzeneğindeki numuneler Şekil 3.18'de görülmektedir.



Şekil 3. 18. Kılcal geçirimlilik düzeneğindeki numuneler

Donma çözülme ve sülfat etkisine maruz kalan numunelerin kılcal geçirimlilik değerleri belirlenirken yukarıda belirtilen yöntem kullanılmıştır.

3.2.4.4.Su Emme Tayini

Su emme deneyinde, TS 12390-7 (2010)'da açıklandığı gibi, etüvde kurutulan numuneler 24 saat 23 ± 2 °C 'deki suda bekletilmiştir. Daha sonra numunelerin ıslak ağırlığı ve etüv kurusu ağırlıkları tartılmıştır. Her bir numunenin ıslak ağırlığından kuru ağırlığı çıkartılıp kuru ağırlığa bölerek yüzdesi bulunmuştur. Donma çözülme ve sülfat deneylerinden önce ve sonra su emme deneyi yapılmıştır. Numunelerin ağırlıkça su emme yüzdeleri de şu formül yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\text{Su emme} = \frac{W_d - W_0}{W_0}, (\%) \quad (3.4)$$

W_d : numunenin suya doymun durumda havadaki ağırlığı,

W_0 = Numunenin 24 saat 105 ± 5 °C'de kurutulmuş ağırlığı,

3.2.4.5. Ağırlık Kaybı

Numunelerde donma çözülme ve sülfat etkisi ile meydana gelen deformasyonları belirlemek amacıyla parametrelerden biri olarak birim ağırlık kaybı deneyi yapılmıştır. Bir numunenin ağırlık kaybını bulmak için donma çözülme ve sülfat etkisi öncesi ve sonrasında 0.01 hassasiyetteki terazide tartılmış ve bu iki ağırlık arasındaki farkın 100'e oranlanmasıyla ağırlık kaybı hesaplanmıştır. Deney sonuçları her 3 numunenin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Ağırlık kaybı, Denklem 3.4 yardımıyla hesaplanmıştır.

Ağırlık kaybı

$$(\%) = \left[\frac{(W - W_0)}{W_0} \right] \times 100 \quad (3.5)$$

W_0 : Numunenin başlangıçtaki ağırlığı, g.

W : Numunenin deney sonrası ağırlığı, g.

3.2.4.6. Donma ve Çözülme Dayanımı

Bu çalışmada donma çözülme çevrimleri ASTM C666'ya uygun olarak yapılmıştır. Bu standartta açıklanan A prosedürü uygulanmıştır. A prosedüründe donma ve çözülme su içinde gerçekleşmektedir. Bu kapsamda maksimum ve minimum sıcaklıklar sırasıyla +4°C ve -18°C olup, bir çevrim süresi 2 ile 5 saat arasında olacak şekilde donma çözülme çevrimleri tamamlanmıştır.

Geopolimer numuneler 28 gün kür havuzunda bekletilip çıkarıldıktan sonra 100 çevrim olacak şekilde donma çözülme makinesine konulmuştur (Şekil 3.19). Donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılan numuneler çıkarıldıktan sonra basınç dayanımı, UPV, kılcal geçirimsizlik, su emme, ağırlık kaybı gibi deneylere tabi tutulmuştur. Elde edilen deney verileri aynı karışım oranına sahip olan ve GDA içermeyen numunelerle karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

3.2.4.7. Sülfat etkisi

Oluşturulan geopolimer beton numuneler 28 günlük kür süresinin sonucunda %1.5 MgSO₄ + %1.5 Na₂SO₄ ve %3 MgSO₄ çözeltilerine konulmuştur. Çözeltilere bırakılan numuneler Şekil 3.20 de gösterilmiştir. Sülfat etkisine maruz bırakılan geopolimer beton numunelerin

4,8 ve 12 hafta aralıklarla basınç dayanımı, UPV, ağırlık kaybı, kılcal geçirimsizlik, su emme gibi özellikleri incelenmiştir. 15 farklı grup arasında kıyaslamalar yapılmıştır.



Şekil 3. 19. Donma çözülme döngüsündeki numuneler



Şekil 3. 20. Sülfat çözeltisinde bekletilen numuneler

3.2.4.8 SEM analizi

SEM analizlerine başlamadan önce, hem donma-çözülme sonrası hem sülfat etkisi sonrası hem de kontrol numunelerinden küçük numune örnekleri alınmıştır. Daha sonra bu numunelerde analiz sırasında elektronlar bir tarafta toplanmasınlar diye numuneler altın paladyum tozları ile kaplanmıştır. SEM analizleri İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır.

4.ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1.Agrega Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma

GDA'lar, normal beton numuneler kırılarak ve öğütme makinesinde öğütüldükten sonra elde edilmiştir. Öğütülen GDA 4 mm ve 8 mm eleklerden geçirilmiştir. Elde edilen iri ve ince agregaların kuru yüzey özgül ağırlık, görünen yüzey özgül ağırlık, doymun yüzey özgül ağırlıklarını ve su emme oranlarını bulmak için Arşimed deneyi yapılmış ve sonuçlar ayrı ayrı ince ve iri agregalar için belirlenmiştir. Çizelge 4.1'de elde edilen değerler gösterilmiştir. Labaratuvar ortamında elenmiş halde olan ince ve iri dere agregaların da özgül ağırlıklarına bakılmıştır.

Çizelge 4. 1. Geri dönüştürülmüş agreganın ve dere agregasının özgül ağırlıkları ve su emme oranı

ÖZELLİK	GDA		Doğal Agrega	
	0-4 mm	4-8 mm	0-4 mm	4-8 mm
Kuru özgül ağırlık,(g/cm ³)	2,76	2,42	2,39	2,6
Doymun kuru yüzey ağırlık,(g/cm ³)	2,18	2,47	2,47	2,63
Görünen özgül ağırlık,(g/cm ³)	2,57	2,55	2,55	2,65
Su emme (%),(g/cm ³)	6,9	2,13	2,4	1,3

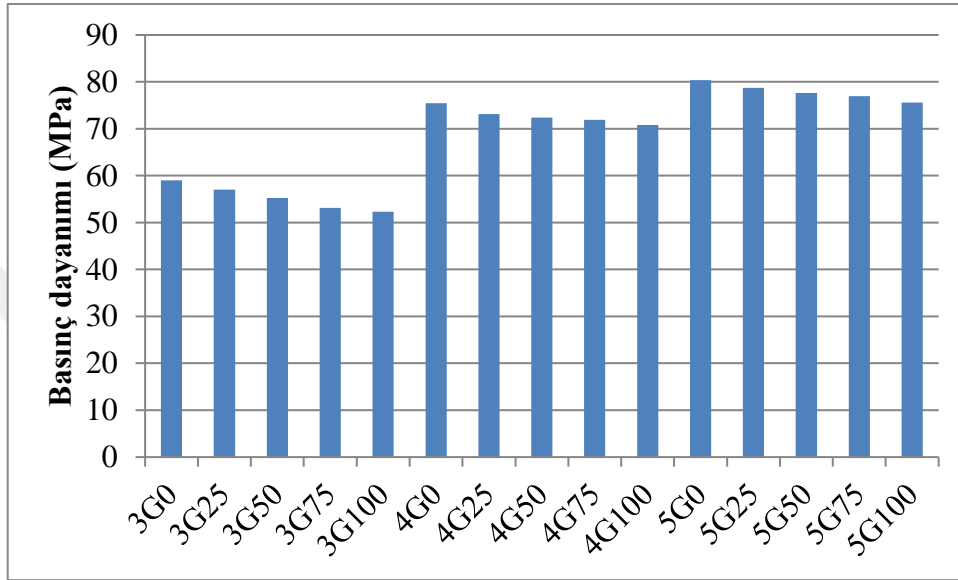
4.2.Sertleşmiş Beton Deneyleri İle İlgili Bulgular ve Tartışma

4.2.1.Kontrol numuneleri basınç dayanımları

Üretilen 15 grup geopolimer beton numunelerin 28 günlük kür süresi sonunda basınç dayanımları ölçülmüştür. Numunelerin basınç dayanımları Çizelge 4.2 ve Şekil 4.1'de verilmiştir. Çizelge 4.2'den görüldüğü gibi geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları dozaj arttıkça artmış, ancak GDA miktarı arttıkça azalmıştır. Bunun yanında üretilen 15 farklı geopolimer beton grubun ortalama basınç dayanım değeri 50 MPa'ın üzerindedir.

Çizelge 4. 2. 28 günlük geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları (MPa)

Dozaj	GDA (%)				
	0	25	50	75	100
300	58,98	57,05	55,27	53,16	52,32
400	75,47	73,13	72,37	71,88	70,82
500	80,04	78,75	77,63	76,95	75,62



Şekil 4.1. 28 günlük geopolimer beton numunelerin basınç dayanım değerleri

GDA'nın basınç dayanımı üzerindeki etkisine dair bugüne kadar birçok çalışma yapılmıştır. Parthiban vd (2016), yaptıkları çalışmada GDA kullanmış ve bağlayıcı olarak alkali aktif cürufunu %0, %25, %50, %75, %100 kullanarak, referans numunesinde ise normal portland çimentosu kullanıp toplam 6 karışım yapmışlardır. Bu karışımların durabilite özellikleri incelenmiştir. Yaptıkları çalışmada basınç dayanım değerleri sonuçları 28 gün kür süresi sonrası GDA ve portland çimentosuyla hazırlanan referans numunesi 40 MPa çıkmış, artan aktif alkali cüruf miktarına göre en iyi basınç dayanım değerini %50 alkali aktif içeren karışımda yaklaşık 57 MPa olarak ölçülmüştür. Shaikh (2016), yaptığı çalışmada beton karışımı için bağlayıcı olarak UK kullanmıştır. GDA oranlarını ise %15, %30 ve %50 olarak almıştır. Basınç dayanım sonuçları referans numunesinden başlamak üzere artan GDA oranlarına göre: 45.3MPa, 41.8MPa, 37.6MPa, 36.8MPa bulunmuştur. UK katkılı geopolimer betonda GDA miktarları arttıkça basınç dayanımı azalmıştır. Corinaldesi vd. (2009), yaptıkları çalışmada %100 GDA kullanarak karışım yapmışlardır. Karışımlarda su/çimento oranı 0.40 olarak alınmıştır. Referans

numunesi olarak doğal agrega kullanılmış, 2. karışımda %100 GDA, 3. karışımda geri dönüşümlü agregaya bağlayıcı malzeme olarak dozaj ağırlığına %1 UK, 4.karışıma dozaj ağırlığına %1.5 SD kullanılmış ve toplam 4 karışım hazırlanmıştır. Bu karışımların basınç dayanımları ise 28 gün kür süresi sonunda sırasıyla; 33.9 MPa, 31.1 MPa ,34,1 MPa, 42 MPa olarak bulunmuştur. Sata vd. (2017) yaptıkları çalışmada ilk seriyi normal kireçtaşı agregası ile hazırlamışlar diğer seride ise GDA kullanmışlardır. Her seride %0, %10, %20 ve %30 oranlarında metakaolin ve UK kullanarak toplam 8 karışım hazırlamışlardır. Bu karışımlara yapılan basınç değeri sonuçlarına göre eklenen metakaolin ve UK oranları arttıkça basınç dayanım değeri artmış ancak GDA ile hazırlanan karışımlarda basınç değerinin yaklaşık %10 azaldığı görülmüştür. Castel vd.(2015) yaptıkları çalışmada GDA oranları %0,%20,%40,%60,%80 ve %100 olarak karışım hazırlanmış geopolimer betonda bağlayıcı malzeme olarak UK, yüksek performanslı kül ve öğütülmüş granüle YFC kullanılmış ve aynı oranlarda GDA ile hazırlanan bağlayıcı olarak normal portland çimentosu kullanılarak basınç dayanımları kıyaslanmıştır. Basınç dayanım sonuçlarına göre normal portland çimentolu karışımlarda GDA oranı arttıkça dayanım azalmış, geopolimer betonlarda en yüksek dayanımı %20 oranında olan karışımda 51 MPa olarak elde edilmiştir. Mohseni vd. (2019) yaptıkları çalışmada farklı monomer oranlarının ve GDA geopolimer beton üzerindeki mekanik özelliklerini ve durabilite özelliklerini incelemişlerdir. Bağlayıcı madde olarak metakaolin kullanılmış ve GDA oranları %0, %10, %20 ve %30 olarak alınmış ve her serinin sodyum silikat/sodyum hidroksit oranları 2, 2.5 ve 3 olarak alınarak toplam 12 karışım yapılmıştır. 28 günlük kür süresinden sonra basınç dayanımının GDA arttıkça azaldığı görülmüştür. Xie vd.(2019) yaptıkları çalışmada GDA ile geopolimer betonun mekanik özelliklerinde UK ve granüle YFC kombinasyonunun etkilerini incelemişlerdir. Basınç dayanımının su/bağlayıcı madde oranı azaldıkça ve YFC miktarı arttıkça arttığını gözlemlemişlerdir. Yapılan çalışmada YFC UK'e göre daha fazla dayanım sağlamıştır. Hu vd.(2019) yaptıkları çalışmada GDA ile UK ve YFC ile üretilen numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. GDA oranları sırasıyla %0, %50 ve %100 dür. UK yerine YFC ise sırasıyla %0, %10, %20 ve %30 olarak kullanılmış ve toplam 12 grup oluşturulmuştur. Basınç dayanım sonuçlarına göre GDA oranı arttıkça dayanım azalmış YFC oranı arttıkça dayanımda artmıştır. Zhang vd.(2019) yaptıkları çalışmada UK ve YFC ve belirli oranlarda kullanılan GDA katkılı geopolimerik betonun özelliklerini incelemişlerdir. GDA oranları sırasıyla %0, %30, %50, %70 ve %100 dür. Her seride su/bağlayıcı madde oranı 0.3, 0.4 ve 0.5 olarak alınmış ve toplamda referans numuneleriyle birlikte 17 grup oluşturulmuştur. Yapılan 28 günlük kürden sonra yapılan

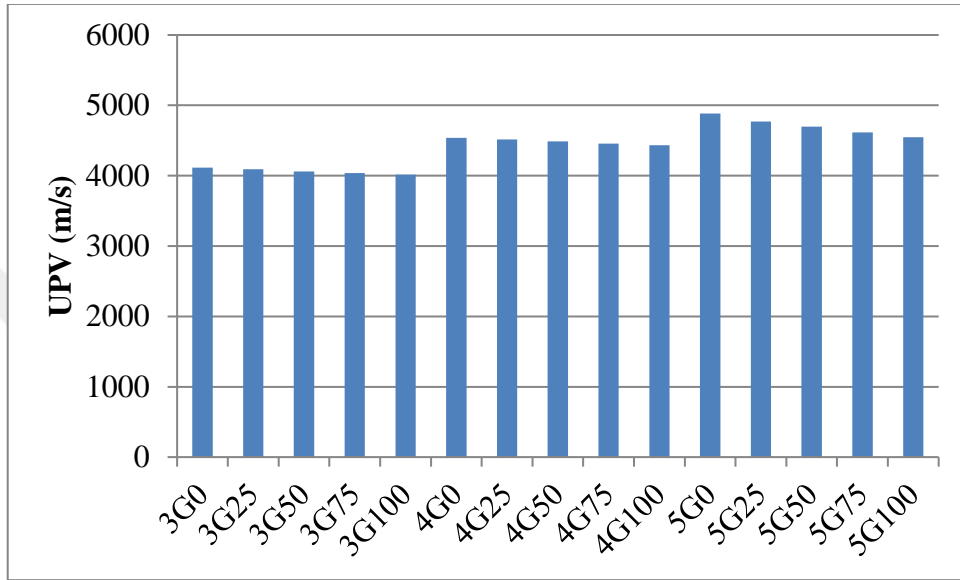
basınç dayanımına göre GDA oranı arttıkça dayanım artmıştır. Zhao vd. (2019) yaptıkları çalışmada UK ve belirli oranlarda cüruf katarak yapmış oldukları geopolimer betonun donma çözülme döngüsüne maruz bırakarak betonun mekanik ve yapısal özelliklerine bakılmıştır. Geopolimer betonda kullanılan F sınıfı UK yerine %10, %30 ve %50 oranlarında cüruf kullanarak referans numunesiyle beraber toplam 4 grup oluşturmuşlardır. Donma çözülme öncesi basınç dayanımlarına bakıldığında cüruf oranı arttıkça dayanım artmıştır. Referans numunesine en yakın sonucu %50 cüruf içerikli numune vermiştir. Cüruf miktarının artması dayanımı olumlu yönde etkilediği sonucuna varılmıştır. Satomi vd. (2018) yaptıkları çalışmada %100 GDA içeren betonun mekanik özellikleri incelenmiştir. Karışımlar hazırlanırken su/çimento oranı sırasıyla 0.52, 0.45 ve 0.39 alınmıştır. Ayrıca karışımlara %3,%5 ve %7 oranlarında SD eklenerek mekanik özellikleri incelenmiştir. Basınç dayanımına bakıldığında GDA ile SD'nin kullanılması dayanımı artırmıştır. Shi vd.(2012) yaptıkları çalışmada UK bazlı geopolimer betonda farklı oranlardaki GDA kullanılarak betonun mekanik ve yapısal özellikleri incelenmiştir. GDA %0, %50 ve %100 oranlarında kullanılmış olup 3 karışım normal portland çimentosu ile hazırlanmış diğer 3 karışım UK kullanılarak geopolimer beton hazırlanmış ve bunlar arasındaki farklılıklar incelenmiştir. Basınç dayanım sonuçlarında GDA oranı arttıkça dayanımda azalma meydana gelmiştir ancak UK'ün katılması normal çimentoya göre dayanımı artırmıştır. Özcan (2018), yaptığı çalışmada bağlayıcı olarak YFC ve elazığ ferrokrom cürufu, kullanmış agrega olarakta dere agregası kullanılmıştır. Hazırlanan geopolimer karışımın NaOH çözelti konsantrasyonu 10M, silis modülü 1.5, Na₂O içeriği %10 olarak belirlenmiştir. Numunelerin basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, YFC oranındaki artışa bağlı olarak dayanım değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Meydana gelen bu artış YFC'nin ferrokrom cürufuna göre yapısında bulunan silikat ve kalsiyum oranı içeriğinin fazla olmasına bağlanmıştır.

4.2.2.Kontrol numunelerinin UPV değerleri

300,400 ve 500 dozaja sahip toplam 15 grup geopolimer beton numuneleri 28 günlük kür süresi sonucunda her bir kontrol numunesinin UPV değerleri ölçülmüştür. Çizelge 4.3 ve Şekil 4.2'de UPV değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 4. 3. Kontrol numunelerinin UPV değerleri

Dozaj	GDA(%)				
	0	25	50	75	100
300	4116	4093	4061	4038	4014
400	4538	4517	4486	4457	4432
500	4885	4771	4697	4615	4547



Şekil 4.2. 28 günlük geopolimer kontrol numunelerinin UPV değerleri

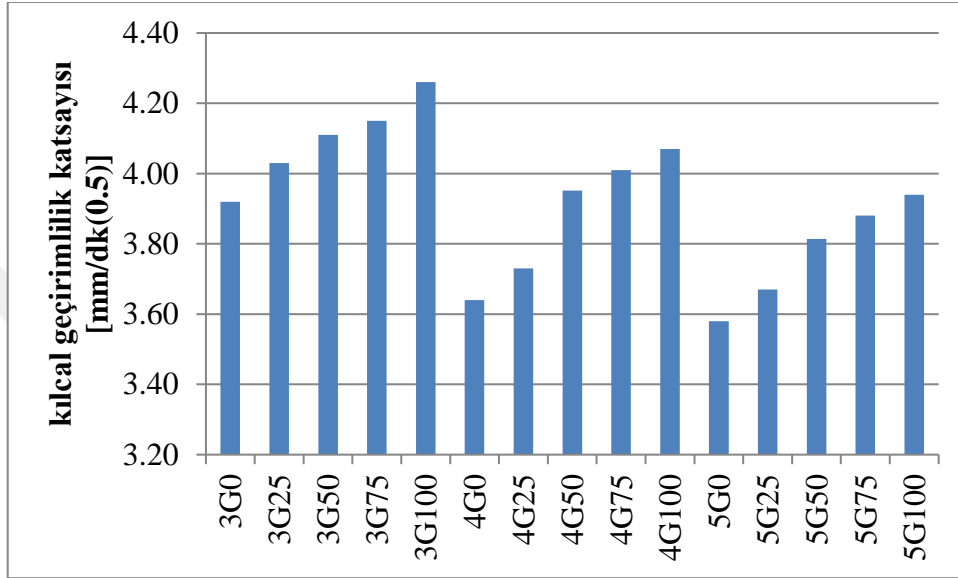
Çizelge 4.3 ve Şekil 4.2'ye bakıldığında UPV değerleri basınç dayanımlarıyla paralellik göstermiştir. Basınç dayanımında da olduğu gibi en fazla UPV değeri 500 dozaja sahip numunelerde görülmüştür. GDA miktarı arttıkça UPV değeri azalmıştır.

4.2.3. Kontrol numunelerinin kılcal su emme miktarları ve su emme oranları

Geopolimer beton numuneler 28 gün kürde bekletildikten sonra kılcal geçirimsizlik katsayıları ve su emme yüzdeleri belirlenmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.4-4.5'de verilmiş olup, Şekil 4.3-4.4'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kılcal geçirimsizlik katsayısı ve su emme oranları dozaj miktarı arttıkça azalmıştır. GDA oranlarındaki artma ise hem kılcal geçirimsizlik katsayısını hem de su emme oranını arttırmıştır.

Çizelge 4. 4. Kontrol numunelerinin kılcal geçirimlilik katsayısı

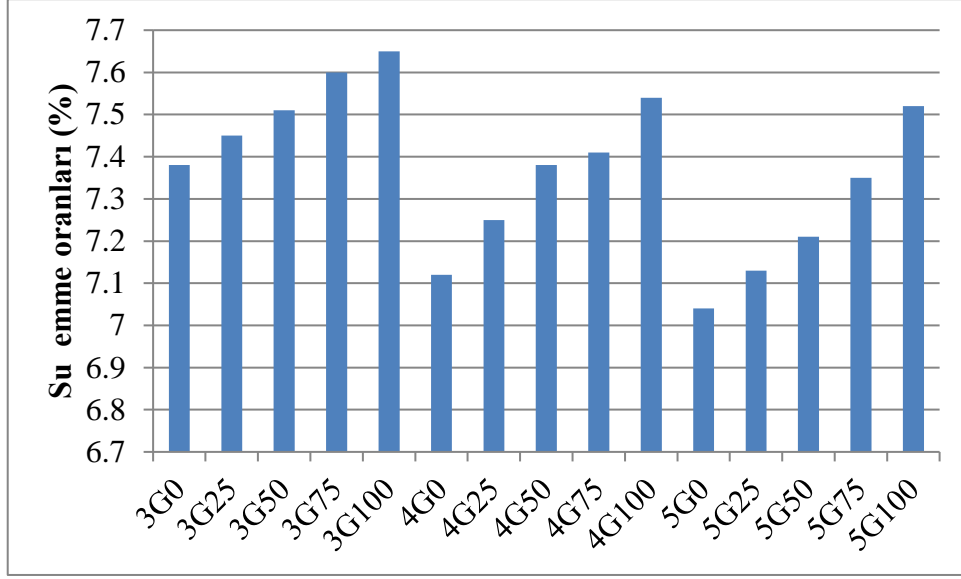
Dozaj	GDA(%)				
	0	25	50	75	100
300	3,92	4,03	4,11	4,15	4,26
400	3,64	3,73	3,95	4,01	4,07
500	3,58	3,67	3,81	3,88	3,94



Şekil 4.3. Farklı oranlarda GDA miktarına ve dozaja göre değişen kılcal geçirimlilik katsayısı

Çizelge 4. 5. Kontrol numuneleri su emme oranları(%)

Dozaj	GDA(%)				
	0	25	50	75	100
300	7,38	7,45	7,51	7,6	7,65
400	7,12	7,25	7,38	7,41	7,54
500	7,04	7,13	7,21	7,35	7,52



Şekil 4.4. Kontrol numunelerin su emme yüzdeleri (%)

Shaikh (2016), yaptığı çalışmada beton karışımı için bağlayıcı olarak UK kullanmış ve GDA oranlarını %15, %30 ve %50 olarak kullanmıştır. Su emme oranları karışımlarda GDA oranı karışımlarda arttıkça artmıştır. Nuaklong vd. (2014) yaptıkları çalışmada bir seride normal agrega kullanmış diğer seride GDA kullanarak her seride 3 farklı molarite oranlarını kullanarak toplam 6 karışım yapmışlardır. Bunlardan molaritesi 12M olan karışımın su emme oranları normal agrega ile yapılan karışımda %5, GDA ile yapılan karışımda %10 olarak elde edilmiştir. Sata vd., (2017) yaptıkları çalışmada ilk seriyi normal kireçtaşı agregası ile hazırlamışlar diğer seride ise GDA kullanmışlardır. Her seride %0,%10,%20 ve %30 oranlarında metakaolin ve UK kullanarak toplam 8 karışım hazırlamışlardır. Elde edilen su emme oranı GDA ile yapılan karışımlarda eklenen metakaolin oranı arttıkça su emme oranı azalmıştır. Hu vd., (2019) yaptıkları çalışmada GDA ile UK yerine kullanılan YFC'nin fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. GDA oranları sırasıyla %0, %50 ve %100'dür. Uçucu kül yerine YFC ise sırasıyla %0-%10,%20 ve %30 olarak kullanılmış ve toplam 12 grup oluşturulmuştur. GDA oranı arttıkça su emme oranı artmış ancak YFC miktarı arttıkça betonun su emme miktarı azalmıştır.

4.3. Donma Çözülme Döngüsüne Maruz Kalan Geopolimer Beton Numuneler İle İlgili Araştırma Bulguları Ve Tartışma

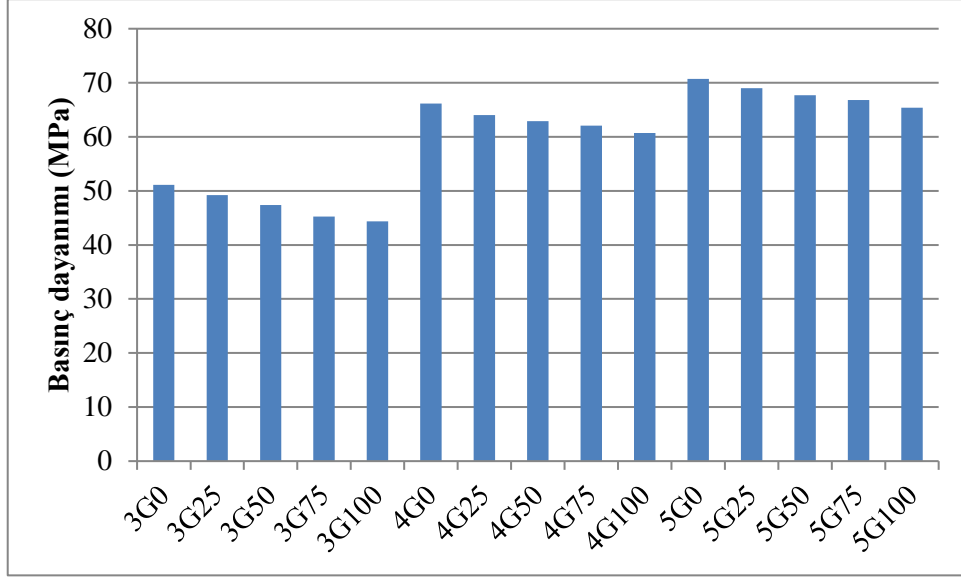
28 gün kürde bekletildikten sonra çıkarılan numuneler donma çözülme döngüsünde 100 çevrim olacak şekilde cihaza yerleştirilmiştir. 100 donma çözülme çevriminden sonra numunelerin basınç dayanımı, UPV ölçümleri, kılcal geçirimsizlik katsayıları su emme oranları ve ağırlık değişimlerine bakılarak kontrol numuneleri ile karşılaştırılmıştır.

4.3.1. Donma çözülme etkisine maruz kalan numunelerin basınç dayanımları

Geopolimer beton numuneleri 28 gün kürde bekletildikten sonra 100 çevrimlik donma çözülme döngüsüne konulmuş ve basınç dayanımları ölçülmüştür. Basınç dayanım değerleri Çizelge 4.6 ve Şekil 4.5'de gösterilmiştir. 100 donma çözülme çevrim sonrası geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları yaklaşık olarak dozajı 300 olan numunelerde %44 , dozajı 400 olan numunelerde %33, dozajı 500 olan numunelerde ise ortalama %38 azalmıştır. Dozaj miktarı arttıkça ortalama basınç değeri artmış. GDA oranı artıkça basınç dayanım değeri azalmıştır.

Çizelge 4. 6. Donma çözülme sonrası numunelerin basınç dayanım değerleri

Dozaj	GDA(%)				
	0	25	50	75	100
300	51,13	49,19	47,41	45,24	44,35
400	66,16	64,00	62,88	62,04	60,71
500	70,70	69,02	67,67	66,82	65,37



Şekil 4.5. Donma çözülme sonrası basınç dayanım değerleri

Junior vd., (2017) yaptıkları çalışmada GDA ile üretilen betonlarda donma-çözülme etkisini araştırmışlardır. GDA oranları %15, %25 ve %50'dir. Numuneler 300 çevrim donma çözülme çevrimine tabi tutulmuştur. 300 çevrim sonucunda basınç dayanımı eklenen GDA oranları arttıkça azalmıştır. Zhao vd. (2019) yaptıkları çalışmada UK ve belirli oranlarda cüruf katarak yapmış oldukları geopolimer betonun donma çözülme döngüsüne maruz bırakarak betonun mekanik ve yapısal özelliklerine bakılmıştır. Geopolimer betonda kullanılan F sınıfı UK yerine %10, %30 ve %50 oranlarında cüruf kullanarak referans numunesiyle beraber toplam 4 grup oluşturmuşlardır. 125 donma çözülme çevrimine maruz kalan numunelerin basınç dayanımlarına bakıldığında donma çözülme çevrimi öncesindeki dayanıma göre en az basınç dayanım kaybına uğrayan %50 cüruf içerikli numune olmuştur. Diğer bir deyişle geopolimer betonda cüruf oranının artması olumlu yönde etki yapmıştır.

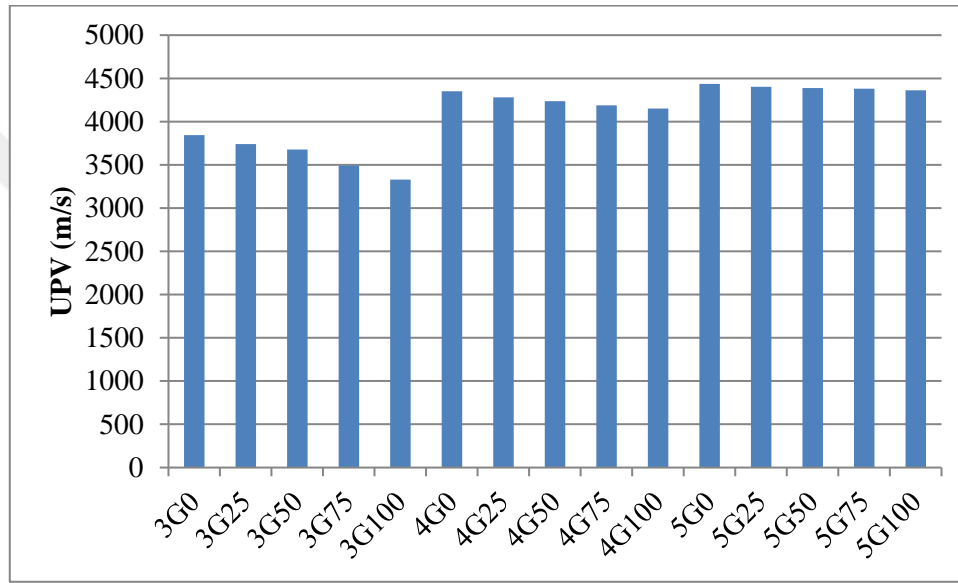
4.3.2. Donma çözülme etkisine maruz kalan numunelerin UPV değerleri

Geopolimer numuneler donma çözülme 100 çevrim etkisine maruz kaldıktan sonra numunelerin UPV ölçümleri yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.7 ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Elde edilen verilerden anlaşılacağı gibi 100 çevrim donma çözülme

döngüsüne maruz kalan numunelerin basınç dayanımlarındaki azalmaya paralel olarak UPV değerlerinin de azaldığı görülmüştür.

Çizelge 4. 7. Donma çözülme sonrası UPV değerleri

Dozaj	GDA(%)				
	0	25	50	75	100
300	3843	3741	3878	3493	3328
400	4351	4281	4236	4189	4152
500	4435	4404	4388	4381	4361



Şekil 4.6. Donma çözülme sonrası UPV değerleri

4.3.3. Donma çözülme etkisine maruz kalan numunelerdeki ağırlık değişimi

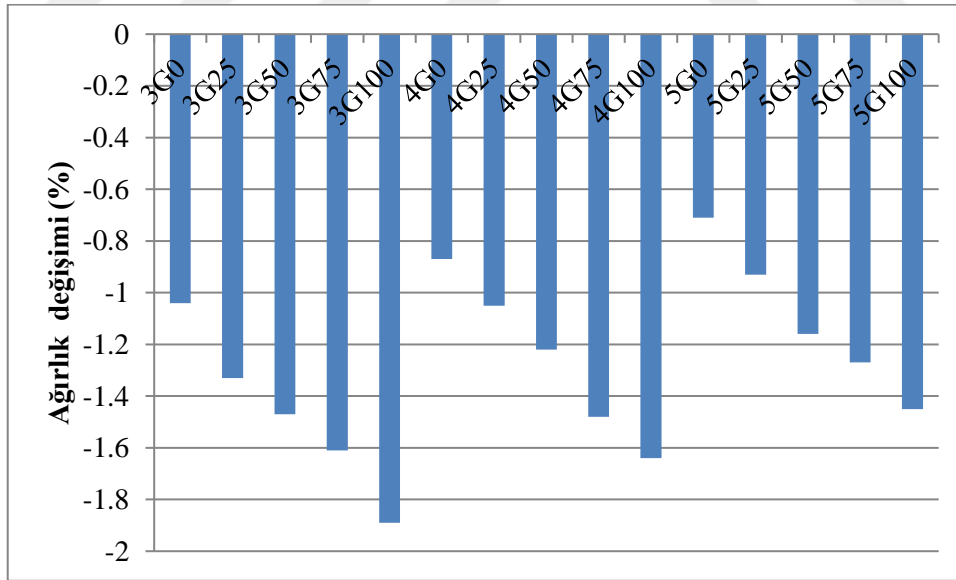
Geopolimer beton numunelerini hem başlangıçta hem de donma çözülme döngüsü sonrası ağırlıkları tartılmıştır. Çizelge 4.8 ve Şekil 4.7'de beton numunelerin ağırlık değişimleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi bütün numunelerdeki ağırlık donma çözülme döngüsü sonrasında azalmıştır. Ortalama olarak numunelerdeki ağırlık kaybı %1.25 ile %1.3 arasında olmuştur.

Duan vd. (2017) yaptıkları çalışmada metakaolin, UK, cüruf katkılı geopolimer betonun donma çözülme etkisi altında özelliklerini incelemişlerdir. Donma çözülme döngüsünü sırasıyla 0, 25, 50, 75 ve 100 çevrim yapmışlardır. Donma çözülme çevrimi arttıkça betonda ağırlık kaybı görülmüştür. Zhao vd., (2019) yaptıkları çalışmada UK ve belirli

oranlarda cüruf katarak yapmış oldukları geopolimer betonun donma çözülme çevrimine maruz bırakarak betonun mekanik ve yapısal özelliklerine bakmışlardır. Geopolimer betonda kullanılan F sınıfı UK yerine %10, %30 ve %50 oranlarında cüruf kullanarak referans numunesiyle beraber toplam 4 grup oluşturmuşlardır. 125 donma çözülme çevrimine maruz kalan numunelerin daha sonra kütle kaybına bakıldığında en az kaybı %50 cüruf içerikli numune vermiştir. Geopolimer betonda cüruf oranı arttıkça donma çözülme çevrimi sonunda ağırlık kaybı azalmıştır. Cüruf oranının artması ağırlık kaybını olumlu yönde etkilemiştir.

Çizelge 4. 8. Donma çözülme sonrası numunelerin ağırlık değişimi

Dozaj	GDA(%)				
	0	25	50	75	100
300	-1,04	-1,33	-1,47	-1,61	-1,89
400	-0,87	-1,05	-1,22	-1,48	-1,64
500	-0,71	-0,93	-1,16	-1,27	-1,45



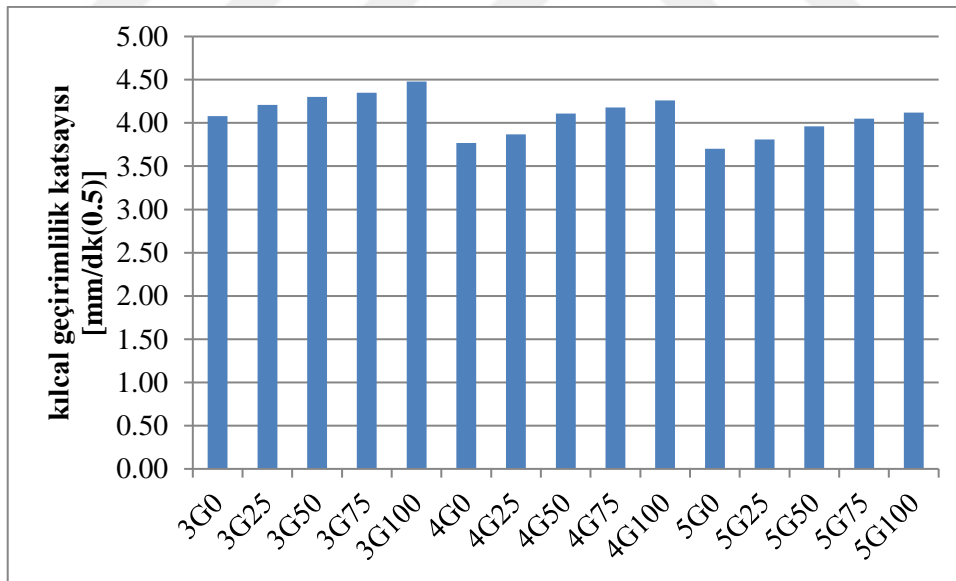
Şekil 4.7. Donma çözülme sonrası ağırlık değişimi

4.3.4. Donma çözülme etkisine maruz kalan numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı ve su emme oranları

Geopolimer beton numuneler donma çözülme döngüsüne 100 çevrim maruz bırakıldıktan sonra numuneler 24 saat etüvde bekletilmişlerdir. Etüv kurusu haline gelen numunelerin önce kuru ağırlıkları tartılmış daha sonra ise beton numunelerinin 4 tarafı elektrik bandı ile kaplanarak alt tabanı 5cm suyla temas edecek biçimde 5-15-30-60-1440 dk suda bekletilerek sırasıyla ağırlıkları ölçülmüş ve kılcal geçirimsizlik katsayısı ile su emme oranları sırasıyla Çizelge 4.9 ve 4.10 da verilmiş olup, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 4. 9. Donma çözülme sonrası kılcal geçirimsizlik katsayısı

Dozaj	GDA(%)				
	0	25	50	75	100
300	4,08	4,21	4,3	4,35	4,48
400	3,77	3,87	4,11	4,18	4,26
500	3,7	3,81	3,96	4,05	4,12

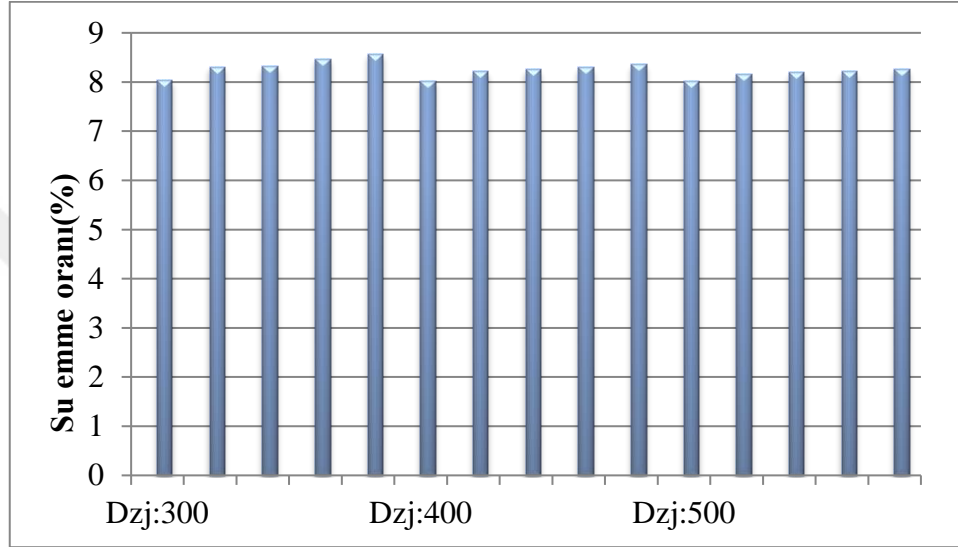


Şekil 4.8. Farklı oranlarda GDA miktarına ve dozaja göre değişen donma çözülme sonrası kılcal geçirimsizlik katsayısı

Tablolardan görüldüğü gibi 100 donma çözülme döngüsüne maruz kalan numunelerde kılcal geçirimsizlik katsayısı ve su emme oranları artmıştır.

Çizelge 4. 10. Donma-çözülme sonrası su emme oranları, (%)

Dozaj	GDA(%)				
	0	25	50	75	100
300	8,04	8,31	8,32	8,47	8,57
400	8,02	8,22	8,25	8,30	8,35
500	8,02	8,15	8,19	8,21	8,27



Şekil 4.9. Donma çözülme sonrası su emme yüzdeleri (%)

4.4. Sülfat etkisine maruz kalan geopolimer beton numuneler ile ilgili araştırma bulguları ve tartışma

Üretilen farklı dozajlardaki ve farklı oranlardaki GDA içeriğine sahip geopolimer beton numuneler 28 günlük kür süresini tamamladıktan sonra %1.5 $MgSO_4$ +%1.5 Na_2SO_4 çözeltisine ve %3 $MgSO_4$ çözeltilerine bırakılmıştır. Sülfata maruz kalan numunelerin 4, 8 ve 12 hafta boyunca basınç dayanımı, UPV değerleri, su emme, kılcal geçirimsizlik, ağırlık değişimi gibi özellikler normal kontrol numuneleri ile kıyaslanarak incelenmiştir.

4.4.1. Sülfat etkisindeki numunelerin basınç dayanımları

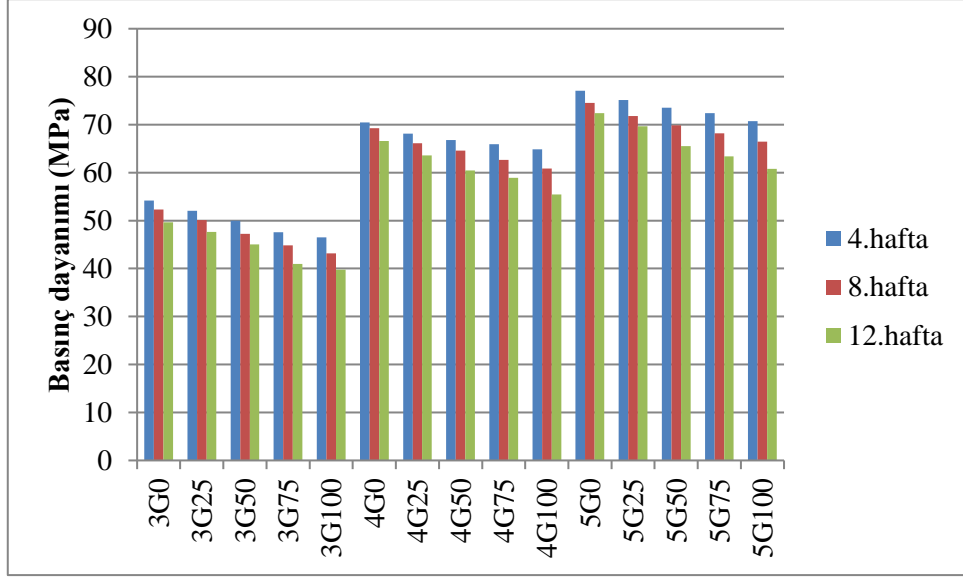
Sülfat çözeltilerine bırakılan geopolimer beton numunelerin sırasıyla 4, 8 ve 12 hafta zaman aralıklarıyla basınç dayanımları ölçülmüştür. Ölçülen basınç dayanımları aşağıda

tablo halinde Çizelge 4.11 de, grafik halinde ise Şekil 4.10 ve 4.11'de verilmiştir. 12 haftanın sonucunda beton basınç dayanımları normal suda bekletilen numunelerle kıyaslandığında;

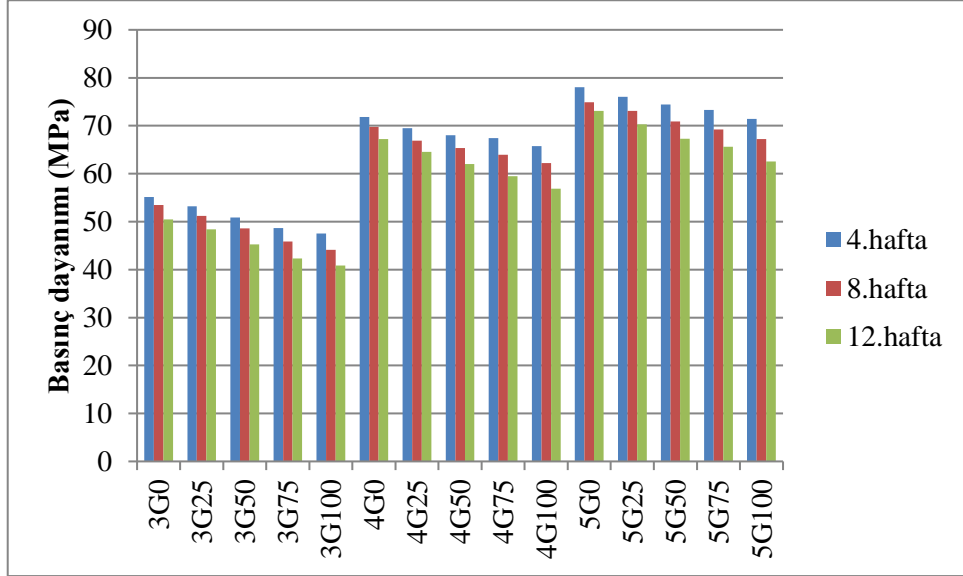
- Tüm numunelerde sülfatta bekletilme süresi arttıkça basınç dayanım değeri azalmıştır. Yine aynı şekilde geopolimer betonlardaki GDA içeriği arttıkça da basınç dayanım değeri azalmıştır.
- Dozaj olarak değerlendirildiğinde, dozajı 300 olan numunelerde sülfatta bekletilme süresine göre kıyaslandığında 8. ve 12. haftada sırasıyla %6 ve %12 oranında basınç dayanımında azalma görülmüştür. Dozajı 400 olan numunelerde bu oran sırasıyla yaklaşık olarak %4.47 ve %10 olmuştur. Dozaj 500 iken bu oranlar %4.1 ve %9.5 olarak ölçülmüştür. Bu ölçümler neticesinde dozaj miktarının artması basınç dayanım kaybını azaltmıştır.

Çizelge 4. 11. % 1.5MgSO₄ + % 1.5Na₂SO₄ ve % 3MgSO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri, (MPa)

	zaman (hafta)					
	4	8	12	4	8	12
karışımlar	% 1.5MgSO ₄ + % 1.5Na ₂ SO ₄			% 3MgSO ₄		
3G0	54,17	52,34	49,65	55,12	53,46	50,45
3G25	52,05	50,11	47,62	53,19	51,18	48,37
3G50	49,95	47,24	45,01	50,87	48,56	45,23
3G75	47,56	44,85	40,97	48,65	45,87	42,35
3G100	46,52	43,15	39,74	47,51	44,15	40,86
4G0	70,48	69,25	66,58	71,84	69,73	67,25
4G25	68,15	66,12	63,56	69,46	66,89	64,56
4G50	66,82	64,57	60,48	68,01	65,35	61,98
4G75	65,92	62,65	58,89	67,42	63,94	59,47
4G100	64,87	60,86	55,47	65,78	62,24	56,87
5G0	77,05	74,56	72,37	78,06	74,89	73,12
5G25	75,12	71,78	69,64	76,05	73,12	70,29
5G50	73,56	69,84	65,53	74,45	70,89	67,28
5G75	72,37	68,17	63,36	73,26	69,23	65,63
5G100	70,75	66,45	60,81	71,42	67,21	62,57



Şekil 4.10. % 1.5MgSO₄ + % 1.5Na₂SO₄ çözeltide bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri



Şekil 4.11. % 3MgSO₄ çözeltide bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri

Parthiban ve Mohan (2017) yaptıkları çalışmada GDA oranları %0,25,50,75 ve 100 olmak üzere karışımlar hazırlamışlardır ve bağlayıcı olarak granüle YFC kullanmışlardır. 28 gün kür süresinden sonra %5 sodyum sülfat ve %5 magnezyum sülfat çözeltilerinde 90 gün bekletildikten sonra kuvvet kaybı magnezyum sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerde daha fazla olmuştur. GDA oranı arttıkça her iki çözeltide de basınç dayanım kaybı artmıştır. Sodyum sülfata maruz kalan numunelerde sırasıyla GDA artma oranına göre

basınç dayanım kaybı %5.89, 6.63, 7.93, 9.24 ve 10.58 oranlarında görülmüştür. Magnezyum sülfatta ise sırasıyla bu oranlar %6.09, 7.26, 8.59, 11.73 ve 14.32 olarak görülmüştür. En fazla basınç dayanım kaybı %100 GDA oranı içeren ve magnezyum sülfatta bekletilen numunede % 14.32 olarak görülmüştür. Normal porland çimentosuyla hazırlanan referans numunesinde ise basınç dayanım kaybı sodyum sülfatta bekletilen numunelerde yaklaşık %8, magnezyum sülfatta bekletilen numunelerde ise yaklaşık %12'dir. Zhuang vd., (2015) yapmış oldukları çalışmada UK'li geopolimer betonun durabilite ve mekanik özelliklerini normal portland çimentosuyla hazırlanan betonla kıyaslamışlardır. Hazırlanan geopolimer beton numuneler %5 sodyum sülfat ve %5 magnezyum sülfat çözeltilerinde 5 ay bekletilmişlerdir. Bu süreç sonunda dayanım kaybı sodyum sülfatta %10.8 magnezyum sülfatta bekletilen numunelerde ise bu değer %21,6 olmuştur. Sülfatlı ortamda etrenjit ve alçıtaşı oluşumu gözlenmiştir ve sülfat betona dayanıklılık veren C-S-H bağlarını olumsuz etkilediği saptanmıştır. Nnaemeka ve Singh (2020) yaptıkları çalışmada UK bazlı geopolimer betona belirli oranlarda kaolin katarak bunun betona olan mekanik ve durabilite özelliklerini araştırmışlardır. Uçucu külün yanında sırasıyla kaolin oranları %0, %20, %30 ve %40 alarak referans numunesiyle birlikte 5 karışım hazırlanmıştır. 28 günlük kür süresi sonucunda numuneler %5 sodyum sülfat çözeltilerinde 90 gün bekletilmiştir. Kaolin oranı arttıkça basınç dayanım kaybında yüzde olarak azalma görülmüştür. Gopalakrishnan ve Chinnaraju (2019) tarafından yapılan çalışmada YFC içeren geopolimer betona %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında UK katarak sülfat dirençleri incelenmiştir. Karışımlar %5 içerikli sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltilerinde 180 gün bekletilmiştir. Bu süreçte 28, 60, 120 ve 180 günün sonunda aralıklı olarak basınç dayanımı ölçülmüştür. Sülfat etkisine maruz kalmadan en yüksek basınç dayanımını %10UK+ %90YFC içeren karışım vermiştir. Bu karışımın 180 gün sonunda basınç dayanımı 69.8 MPa olarak ölçülmüştür. En düşük basınç dayanımı değeri ise %50UK+%50YFC içeren karışım da 48 MPa olarak ölçülmüştür. %5 sodyum sülfat ve magnezyum sülfata maruz kalan numunelerde basınç dayanım kaybı yaşanmıştır. En fazla ise UK oranının en fazla olduğu (%50) karışımda görülmüştür. Sülfat direncine karşı en iyi sonuç %40UK+%60YFC içeren karışımdan alınmıştır. Karakoç vd., (2016) yaptıkları çalışmada bağlayıcı malzeme olarak ferrokrom kullanarak hazırladıkları geopolimer betonun sülfata dayanıklılığını incelemiştir. Agregası olarak ayrı ayrı hem dere agregası hem de kırma kum agregası kullanmışlardır. Hazırlanan numuneleri 28.90 ve 180 gün kür edilerek %3, %5 ve %7 konsantrasyonlu sülfat çözeltilerinde 24 hafta bekletmişlerdir. Numunelerin basınç dayanımları artan sülfat yüzdesiyle beraber azalmıştır

ve dayanım kaybı gözlemlenmiştir. Basınç dayanım değerlerine bakıldığında kırma kum kullanılarak hazırlanan numunelerde, dere agregası kullanılarak hazırlanan numunelere kıyasla oran olarak daha az dayanım kaybı elde edilmiştir.

4.4.2. Sülfat etkisindeki numunelerin UPV ölçümleri

Sülfat etkisine maruz bırakılan geopolimer numunelerin 4, 8 ve 12 hafta aralıklarla UPV ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.12'de verilmiş olup Şekil 4.12 ve 4.13 de sonuçlar gösterilmiştir. 12 haftanın sonucunda beton UPV değerleri normal suda bekletilen numunelerle kıyaslandığında;

Genel olarak UPV sonuçları basınç dayanımı ile paralellik göstermiştir. Tüm numunelerde sülfatta bekletilme süresi arttıkça UPV değerleri azalmıştır. Yine aynı şekilde geopolimer betonlardaki GDA içeriği arttıkça da UPV değeri azalmıştır.

Dozaj olarak değerlendirildiğinde ise dozajı 300 olan numunelerde %1.5MgSO₄+%1.5Na₂SO₄ içerikli çözeltide sülfatta bekletilme süresine göre kıyaslandığında 8. ve 12. haftada sırasıyla %5.2 ve %10 oranında UPV değerinde azalma görülmüştür. Dozajı 400 ve 500 olan numunelerde ise 4. haftaya göre kıyaslandığında UPV değerlerindeki kayıp %2 den daha az olmuştur.

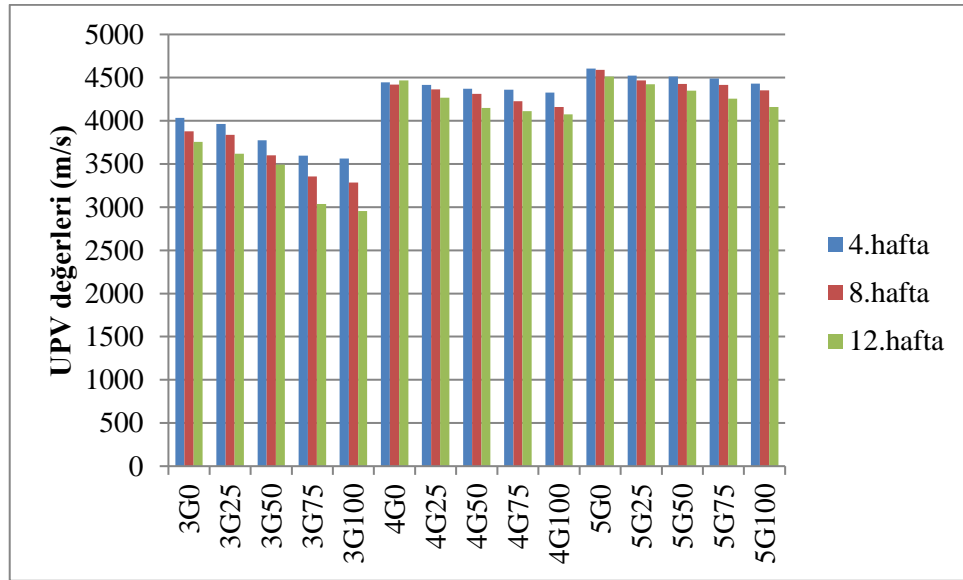
%3 MgSO₄ içerikli çözeltide bekletilen numunelerle %1.5MgSO₄+%1.5Na₂SO₄ içerikli çözeltelerde bekletilen numunelerde UPV değerleri ve kayıpları neredeyse paralellik göstermiştir.

4.4.3. Sülfat etkisi sonrası kılcal geçirimlilik katsayısı

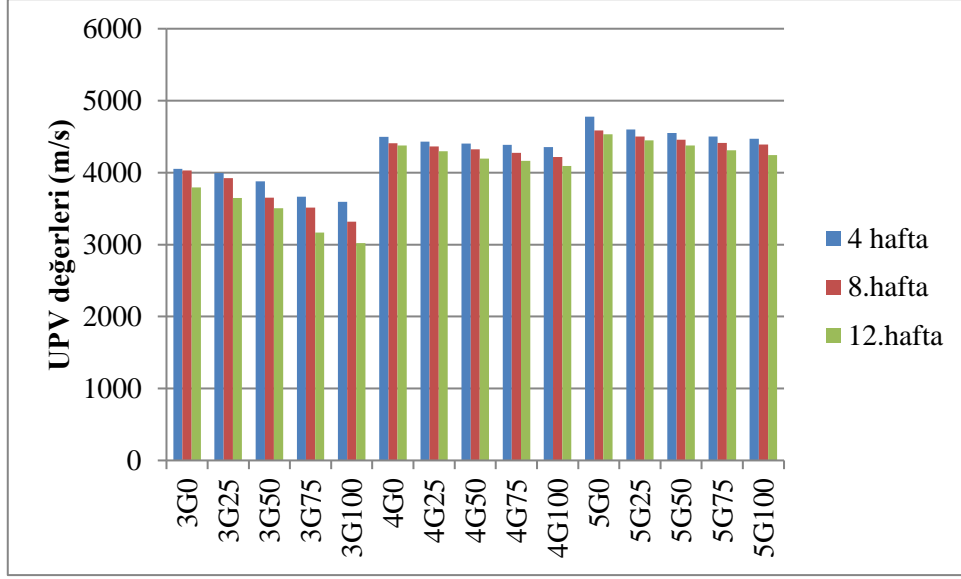
28 günlük kür süresi sonucunda %1.5MgSO₄+%1.5Na₂SO₄ ve %3MgSO₄ içeriğinde 4, 8 ve 12 hafta bekletilen numunelere kılcal geçirimlilik deneyi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.13'te verilmiş olup, Şekil 4.14 ve 4.15 de gösterilmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre dozaj miktarı arttıkça kılcal geçirimlilik katsayısı azalmış, GDA oranı beton içerisinde arttıkça kılcal geçirimlilik katsayısı artmıştır.

Çizelge 4. 12. % 1.5MgSO₄ + % 1.5Na₂SO₄ ve % 3MgSO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin UPV değerleri

	zaman (hafta)					
	4	8	12	4	8	12
Karışımlar	% 1.5MgSO ₄ + % 1.5Na ₂ SO ₄			% 3MgSO ₄		
3G0	4034	3878	3755	4051	4031	3794
3G25	3965	3837	3618	3994	3924	3648
3G50	3774	3601	3494	3878	3651	3503
3G75	3596	3356	3036	3665	3512	3167
3G100	3563	3284	2953	3593	3317	3021
4G0	4445	4421	4467	4496	4410	4375
4G25	4416	4364	4269	4431	4365	4296
4G50	4371	4311	4147	4404	4323	4197
4G75	4359	4227	4113	4388	4275	4163
4G100	4327	4161	4075	4357	4218	4094
5G0	4603	4591	4513	4778	4587	4533
5G25	4523	4467	4423	4601	4501	4448
5G50	4511	4427	4347	4552	4457	4379
5G75	4489	4415	4255	4504	4412	4311
5G100	4432	4354	4160	4469	4391	4245



Şekil 4.12. % 1.5MgSO₄ + % 1.5Na₂SO₄ çözeltide bekletilen numunelerin UPV değerleri



Şekil 4.13. %3MgSO₄ çözeltilde bekletilen numunelerin UPV değerleri

Çizelge 4. 13. % 1.5MgSO₄ + % 1.5Na₂SO₄ ve % 3MgSO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı

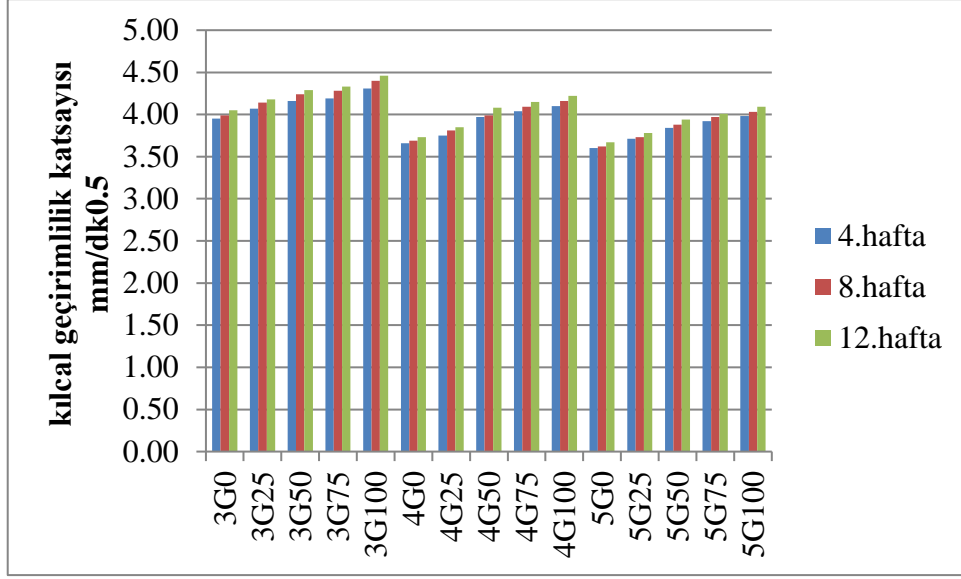
	zaman (hafta)					
	4	8	12	4	8	12
Karışımlar	% 1.5MgSO ₄ + % 1.5Na ₂ SO ₄			% 3MgSO ₄		
3G0	3,94	4,01	4,07	3,95	3,99	4,05
3G25	4,06	4,13	4,20	4,07	4,14	4,18
3G50	4,15	4,26	4,28	4,16	4,24	4,29
3G75	4,21	4,29	4,34	4,19	4,28	4,33
3G100	4,31	4,40	4,48	4,31	4,40	4,46
4G0	3,67	3,67	3,75	3,66	3,69	3,73
4G25	3,75	3,83	3,86	3,75	3,81	3,85
4G50	3,96	4,01	4,10	3,97	3,99	4,08
4G75	4,05	4,12	4,17	4,04	4,09	4,15
4G100	4,11	4,18	4,25	4,10	4,16	4,22
5G0	3,60	3,63	3,68	3,60	3,62	3,67
5G25	3,72	3,75	3,80	3,71	3,73	3,78
5G50	3,83	4,00	3,95	3,84	3,88	3,94
5G75	3,94	4,02	4,04	3,92	3,97	4,01
5G100	4,00	4,05	4,10	3,98	4,03	4,09



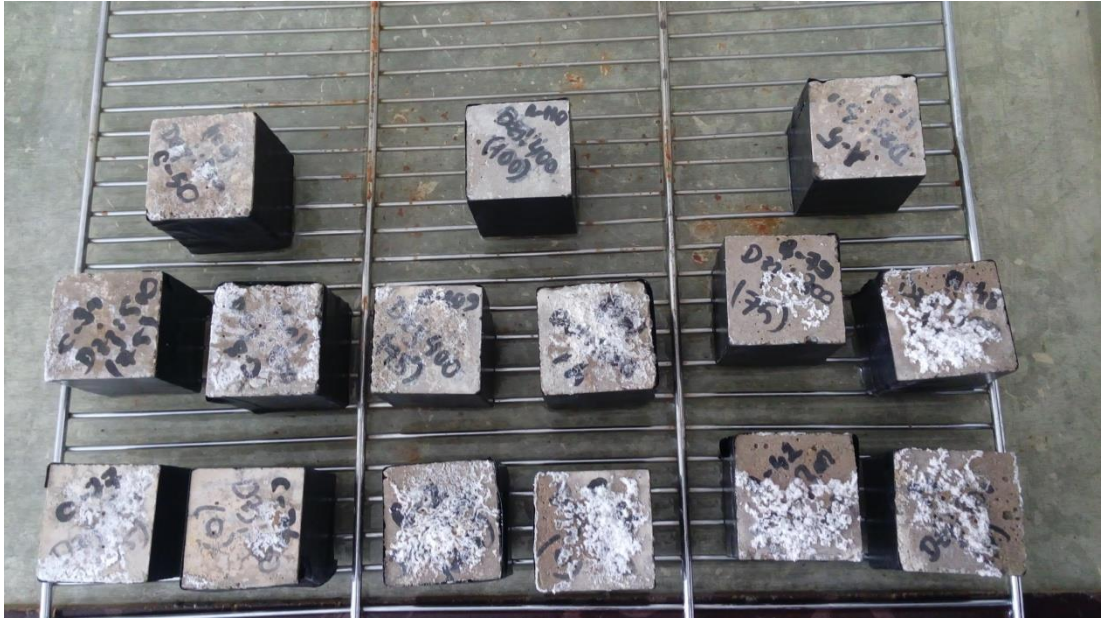
Şekil 4.14. % 1.5MgSO₄ + % 1.5Na₂SO₄ çözeltilde bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı

Dozaj miktarı arttıkça kılcal geçirimsizlik katsayısı azalmıştır. 4. haftada %1.5MgSO₄+ %1.5Na₂SO₄ çözeltilde bekletilen ve dozajı 400 ve 500 olan numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısında, dozajı 300 olan numunelerinkine göre sırasıyla %5.5 ve %7.6 azalma görülmüştür. Yine aynı şekilde 8. haftaya bakılırsa, diğer dozajı 400 ve 500 olan numunelerde, dozajı 300 olan numunelere göre sırasıyla %6.1 ve %7.8 oranında azalma görülmüştür. Bu azalma değerlerinin 12.hafta için ise sırasıyla %5.8 ve %8.4 oranında olduğu görülmüştür. 4. haftada %3MgSO₄ çözeltilde bekletilen ve dozajı 400 ve 500 olan numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısında, dozajı 300 olan numunelerinkine göre sırasıyla %5.6 ve %7.9 azalma görülmüştür. Yine aynı şekilde 8. haftaya bakılırsa, diğer dozajı 400 ve 500 olan numunelerde, dozajı 300 olan numunelere göre sırasıyla %6.2 ve %8.6 oranında azalma görülmüştür. Bu azalma değerlerinin 12.hafta için ise sırasıyla %6 ve %8.5 oranında olduğu görülmüştür.

Yukarıdaki deney sonuçlarında kılcal geçirimsizlik katsayısı 1440 dakika için bakılmıştır. İki farklı sülfat konsantrasyonunda bekletilen numunelerde ciddi bir fark görülmemiştir. Sülfat içeriklerinin her ikisinde de GDA oranı arttıkça kılcal geçirimsizlik katsayısı artmıştır. Dozaj miktarı yükseldikçe kılcal geçirimsizlik katsayısında azalma görülmüştür. Sülfatta bekletildikten sonra kılcal geçirimsizlik uygulanan numunelerin görüntüleri Şekil 4.16'da görülmektedir.



Şekil 4.15. %3MgSO₄ çözeltide bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısı



Şekil 4.16. Sülfatta bekletildikten sonra kılcal geçirimlilik uygulanan numunelerin görüntüleri

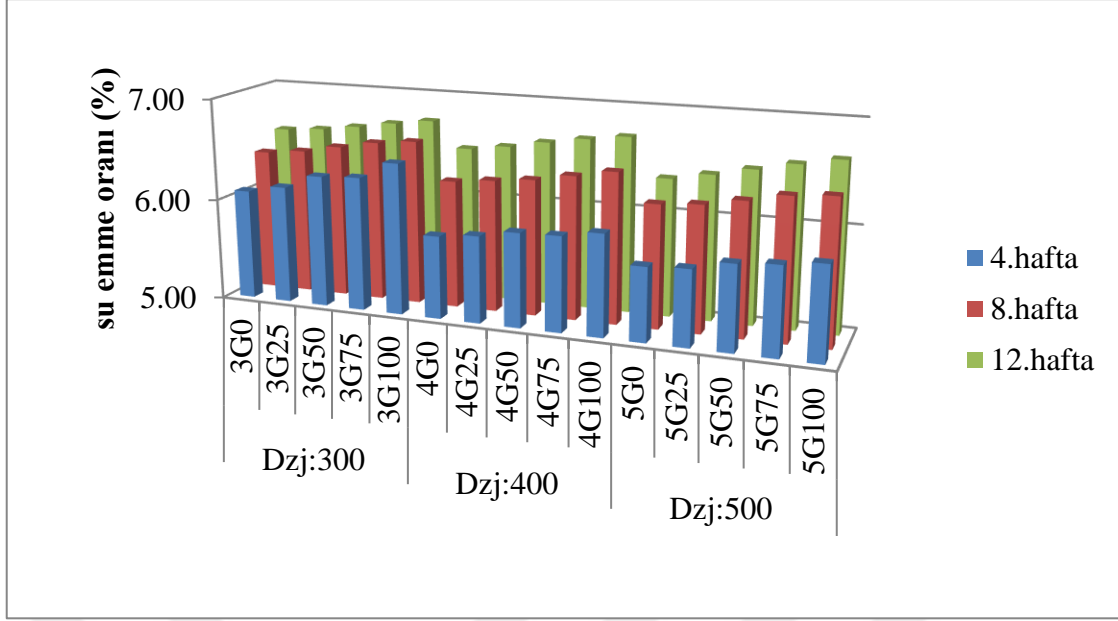
4.4.4. Sülfat etkisi sonrası su emme oranı

Üretilen geopolimer numunelerin 4, 8 ve 12 hafta sülfat çözeltisinde bekletildikten sonra su emme oranları Çizelge 4.14'de verilmiştir. Grafikselsel olarak Şekil 4.17 ve 4.18'de gösterilmiştir.

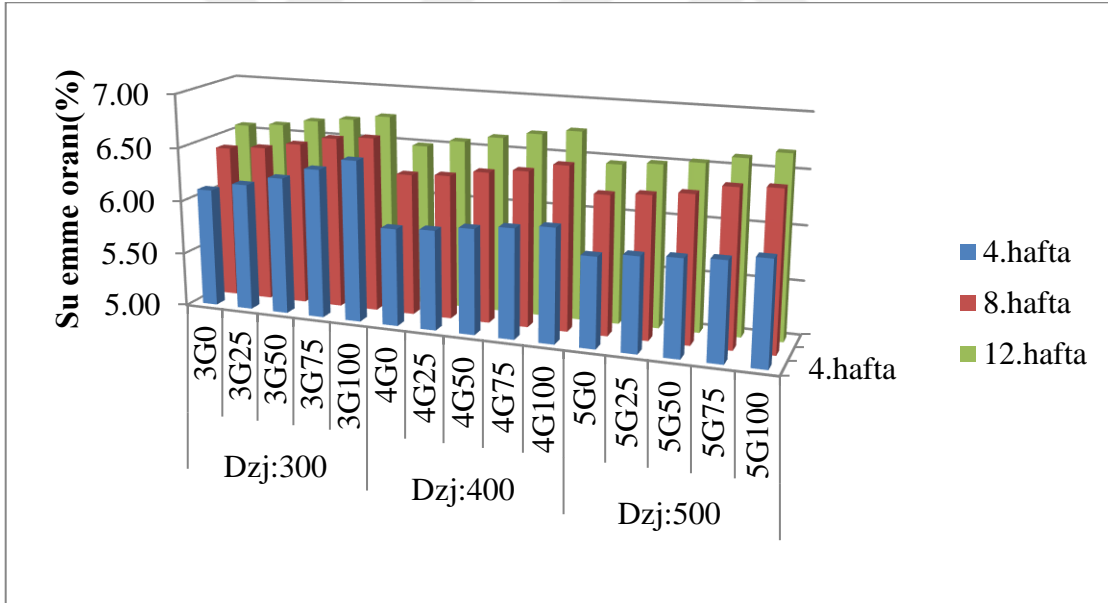
Çizelge 4. 14. % 1.5MgSO₄ + % 1.5Na₂SO₄ ve % 3MgSO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin su emme oranları

	zaman (hafta)					
	4	8	12	4	8	12
Karışımlar	% 1.5MgSO ₄ + % 1.5Na ₂ SO ₄			% 3MgSO ₄		
3G0	6,08	6,39	6,55	6,10	6,42	6,57
3G25	6,15	6,43	6,58	6,18	6,45	6,60
3G50	6,29	6,50	6,63	6,27	6,51	6,66
3G75	6,31	6,57	6,69	6,38	6,59	6,70
3G100	6,48	6,61	6,74	6,49	6,62	6,75
4G0	5,81	6,25	6,49	5,90	6,31	6,50
4G25	5,85	6,29	6,54	5,92	6,33	6,57
4G50	5,92	6,33	6,61	5,97	6,39	6,63
4G75	5,93	6,40	6,67	6,01	6,43	6,69
4G100	5,99	6,47	6,72	6,05	6,51	6,74
5G0	5,72	6,20	6,35	5,83	6,28	6,47
5G25	5,74	6,23	6,42	5,87	6,31	6,50
5G50	5,83	6,30	6,50	5,89	6,35	6,54
5G75	5,86	6,38	6,58	5,91	6,44	6,61
5G100	5,91	6,41	6,65	5,96	6,46	6,68

Dozaj miktarı arttıkça su emme miktarı azalmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde % 1.5MgSO₄+% 1.5Na₂SO₄ konsantrasyonlu sülfat çözeltisi ile % 3MgSO₄ kıyaslandığında ciddi farklar olmadığı görülmüştür. 4. haftada % 1.5MgSO₄+% 1.5Na₂SO₄ çözeltide bekletilen ve dozajı 400 ve 500 olan numunelerin su emme miktarında, dozajı 300 olan numunelerinkine göre sırasıyla %5.8 ve %7.2 oranında azalma görülmüştür. Yine aynı şekil de 8. haftaya bakılırsa, dozajı 400 ve 500 olan numunelerde, dozajı 300 olan numunelere göre sırasıyla %2.3 ve %3 oranında azalma görülmüştür. Bu azalma değerlerinin 12.hafta için ise sırasıyla %0.5 ve %2.1 oranında olduğu görülmüştür.



Şekil 4.17. % 1.5MgSO₄ + % 1.5Na₂SO₄ çözeltide bekletilen numunelerin su emme oranları



Şekil 4.18. % 3MgSO₄ çözeltide bekletilen numunelerin su emme oranları

4. haftada %3MgSO₄ çözeltide bekletilen ve dozajı 400 ve 500 olan numunelerin su emme miktarında, dozajı 300 olan numunelerinkine göre sırasıyla %5 ve %6.2 oranında azalma görülmüştür. Yine aynı şekil de 8. haftaya bakılırsa, dozajı 400 ve 500 olan numunelerde, dozajı 300 olan numunelere göre sırasıyla %1.9 ve %2.3 oranında azalma görülmüştür. Bu azalma değerlerinin 12.hafta için ise sırasıyla %0.5 ve %1.4 oranında olduğu görülmüştür.

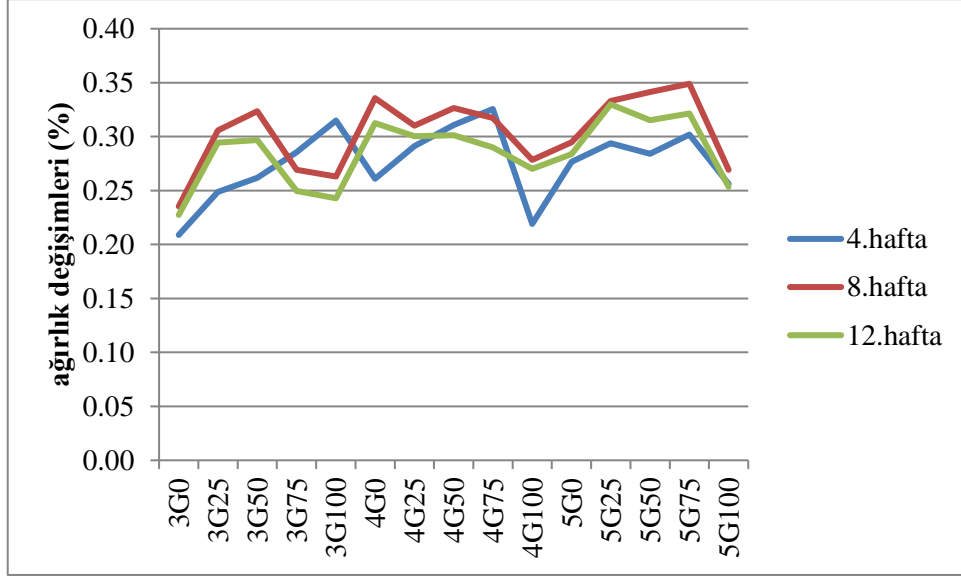
Her iki çözeltide de maksimum su emme oranı 12. haftanın sonunda dozaj miktarı 3G100 adlı numunede görülmüştür. En düşük su emme oranı ise 4.haftanın sonunda 5G0 adlı numunede görülmüştür. Genel olarak sonuçlara bakıldığında su emme oranı GDA yüzdesi arttıkça artmış, dozaj miktarı arttıkça azalmıştır.

4.4.5. Sülfat etkisi sonrası ağırlık değişimi

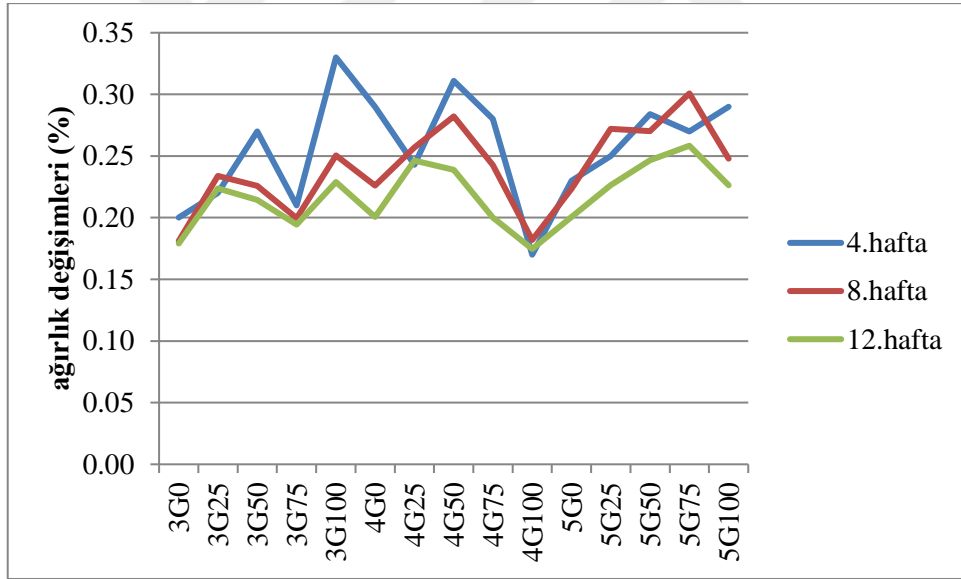
4, 8 ve 12 hafta süreyle sülfatta bırakılan numunelerin zamanla ağırlık değişimleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar grafik olarak Şekil 4.19 ve 4.20'de gösterilmiştir. Çizelge 4.15'de deney sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4. 15. % 1.5MgSO₄+% 1.5Na₂SO₄ ve % 3MgSO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri, (%)

	zaman (hafta)					
	4	8	12	4	8	12
Karışımlar	% 1.5MgSO ₄ + % 1.5Na ₂ SO ₄			% 3MgSO ₄		
3G0	0,21	0,24	0,23	0,20	0,18	0,18
3G25	0,25	0,31	0,29	0,22	0,23	0,22
3G50	0,26	0,32	0,30	0,27	0,23	0,21
3G75	0,29	0,27	0,25	0,21	0,20	0,19
3G100	0,31	0,26	0,24	0,33	0,25	0,23
4G0	0,26	0,34	0,31	0,29	0,23	0,20
4G25	0,29	0,31	0,30	0,24	0,26	0,25
4G50	0,31	0,33	0,30	0,31	0,28	0,24
4G75	0,33	0,32	0,29	0,28	0,24	0,20
4G100	0,22	0,28	0,27	0,17	0,18	0,17
5G0	0,28	0,29	0,28	0,23	0,22	0,20
5G25	0,29	0,33	0,33	0,25	0,27	0,23
5G50	0,28	0,34	0,32	0,28	0,27	0,25
5G75	0,30	0,35	0,32	0,27	0,30	0,26
5G100	0,26	0,27	0,25	0,29	0,25	0,23



Şekil 4.19. % 1.5MgSO₄ + % 1.5Na₂SO₄ çözeltide bekletilen numunelerin zamana bağlı ağırlık değişimleri



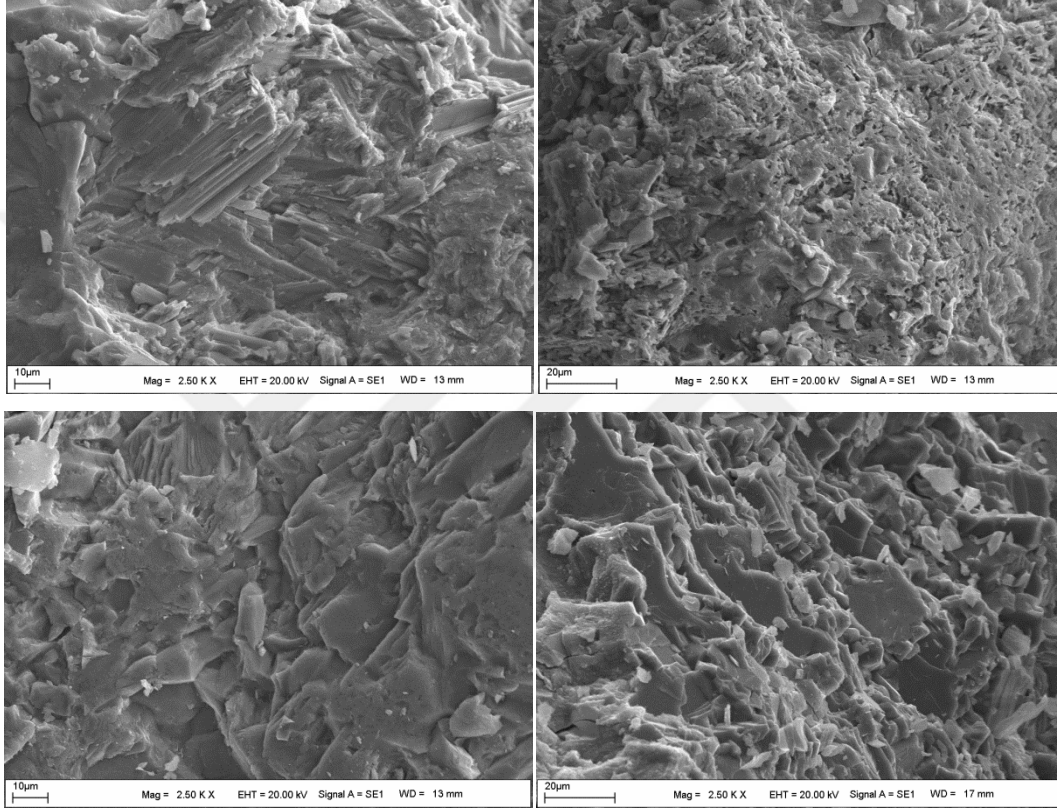
Şekil 4.20. % 3MgSO₄ çözeltide bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri (%)

Yapılan deneylerden yola çıkılarak %3MgSO₄ ve %1.5MgSO₄+%1.5Na₂SO₄ iki farklı konsantrasyon içerikli çözeltiler birbirleriyle kıyaslandığında %1.5MgSO₄+%1.5Na₂SO₄ çözeltisi daha büyük ağırlık değişimlerine yol açmıştır. Fakat numune üzerinde sülfat tortuları biriktiği için ağırlık değişimleri düzenli bir şekilde olmamıştır.

Porthiban ve Mohan (2017) yılında yaptıkları çalışmada GDA oranları %0, 25, 50, 75 ve 100 olmak üzere karışımlar hazırlamışlardır ve bağlayıcı olarak granüle YFC kullanmışlardır. 28 gün kür süresinden sonra %5 sodyum sülfat ve %5 magnezyum sülfat çözeltilerinde 90 gün bekletildikten sonra ağırlık kayıplarına bakılmıştır. Magnezyum sülfatta bekletilen numunelerin ağırlık kaybı daha fazla olmuştur. Artan GDA oranına göre sırasıyla sodyum sülfata maruz kalan numunelerde ağırlık kaybı %0.68, 0.90, 1.63, 2.25 ve 3.13, magnezyum sülfatta bekletilen numunelerde ise bu oranlar %2.37, 3.00, 4.10, 4.96 ve 6.34 olarak ölçülmüştür. Ancak normal portland çimentosuyla yapılan referans numunesiyle kıyaslandığında iyileşme görülmüştür. Referans numunesinde ki ağırlık kaybının sodyum sülfatta %2-2.5 arası, magnezyum sülfatta ise %6- 6.5 arasında olduğu tespit edilmiştir. Nnaemeka ve Singh (2020) yaptıkları çalışmada UK bazlı geopolimer betona belirli oranlarda kaolin katarak mekanik ve durabilite özelliklerini araştırmışlardır. Uçucu külün yanında sırasıyla kaolin oranları %0, %20, %30 ve %40 alarak referans numunesiyle birlikte 5 karışım hazırlanmıştır. 28 günlük kür süresi sonucunda numuneler %5 sodyum sülfat çözeltisinde 90 gün bekletildikten sonra ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Normal çimento ile hazırlanan referans numunesinde ağırlık kaybı %5.8 olurken, %0, %20, %30 ve %40 oranlarında kaolin içeren karışımlarda ağırlık kaybı sırasıyla %3.65, %3.48, %3.5 ve %3.36 olmuştur. Gopalakrishnan ve Chinnaraju (2019) yaptıkları çalışmada YFC içeren geopolimer betona %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında UK katarak sülfat dirençleri incelenmiştir. Karışımlar %5 içerikli sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltisinde 180 gün bekletilmiştir. Ağırlık kayıpları sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen numuneler için %10UK içerikli karışımda %1.12 olurken %50UK içerikli numunede %1.68 olmuştur. Magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen karışımlarda ise %10UK içeren karışımda %0.585 ağırlık kaybı olurken %50UK içeren karışımda %0.73 ağırlık kaybı tespit edilmiştir. Karakoç vd. (2016) yaptıkları çalışmada bağlayıcı malzeme olarak ferrokrom kullanarak hazırladıkları geopolimer betona sülfat etkisini incelemiştir. Agregası olarak ayrı ayrı hem dere agregası hem de kırma kum agregası kullanmışlardır. Hazırlanan numuneleri 28, 90 ve 180 gün kür edilerek %3, %5 ve %7 konsantrasyonlu sülfat çözeltilerinde 24 hafta bekletmişlerdir. Sonuçlara bakıldığında dere agregasıyla üretilen numunelerde ağırlık artışı %0.62 ile %1.86 arasında olurken kırma kum ile üretilen numunelerde ağırlık artışı %0.84 ile %2.11 arasında olmuştur.

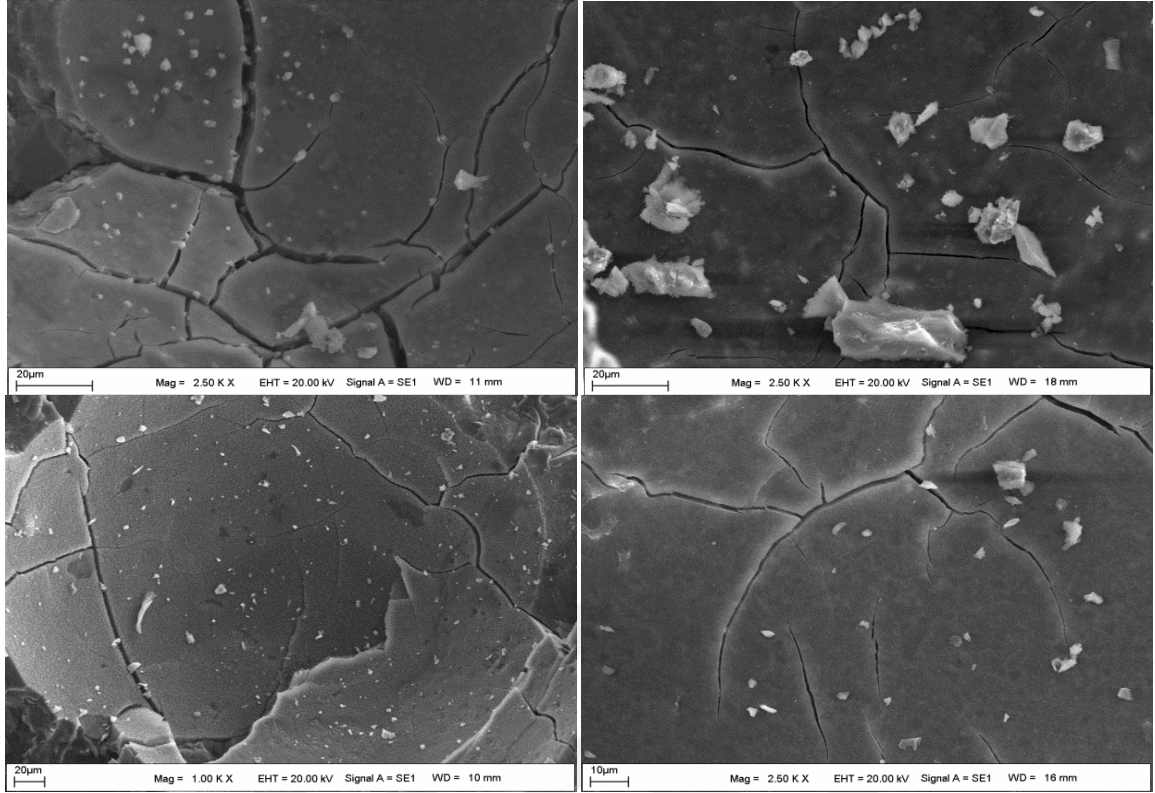
4.5. Geopolimer Beton Numunelerin İçyapı Analizleri

YFC bağlayıcılı geopolimer beton numunelerin içyapı analizleri SEM görüntüleri çekilerek yapılmıştır. Özellikle karışımlardaki dozaj arttıca geopolimer beton numunelerin iç yapısının daha yoğun olduğu görülmektedir (şekil 4.21). Bu yoğunluk farkı daha önce yapılan deney sonuçları ile de örtüşmektedir.

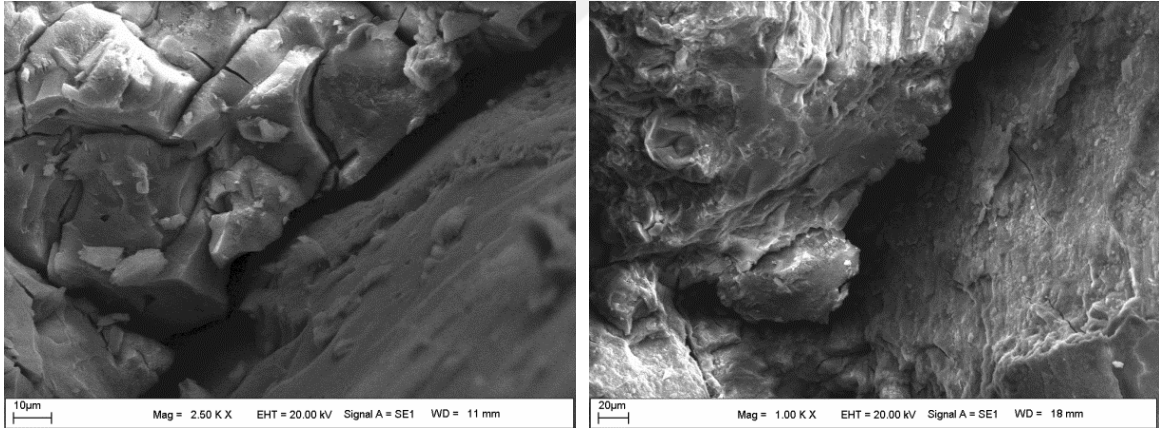


şekil 4.21. Geopolimer beton numunelerde görülen yoğun jel yapısı

Geopolimer beton numuneler 100 çevrim donma zlme etkisine maruz kaldıktan sonra numunelerde çatlaklar oluşmuş olup, bu çatlaklar numunelerin mekanik davranışında etkili olmuştur. Geopolimer beton numunelerde donma zlme etkisinde görülen çatlaklar şekil 4.22'de görülmektedir. Bu çatlakların numunelerdeki donma-zlme sonrası buz hacminin genleşmesi sonucu oluşan gerilmelerin betonun çekme gerilmelerini aşması ile ortaya çıktığı bilinmektedir. Geopolimer beton numunelerde donma-zlme etkisinde görülen agrega-hamur ara yüzey görüntüleri şekil 4.23'de görülmektedir.



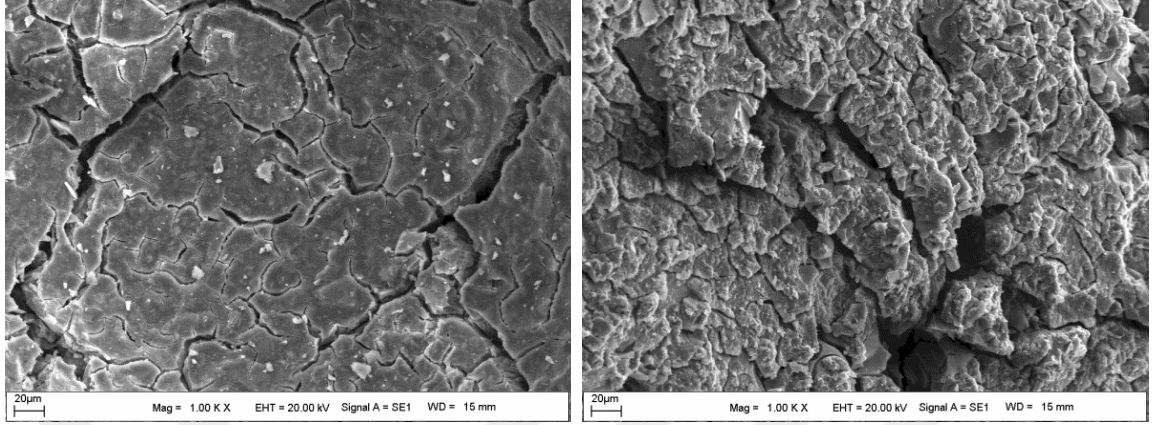
Şekil 4.22. Geopolimer beton numunelerde donma-çözülme etkisinde görülen çatlaklar



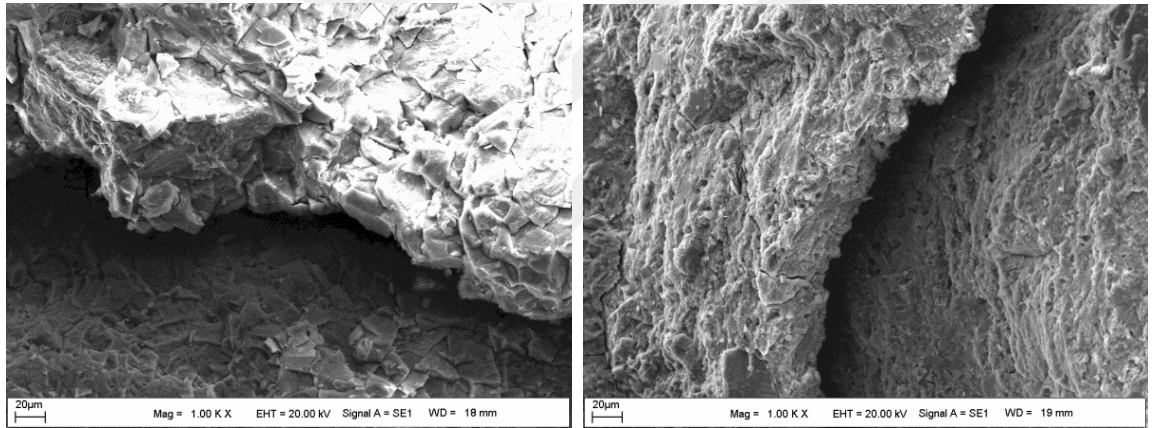
Şekil 4.23. Geopolimer beton numunelerde donma-çözülme etkisinde görülen agregahamur ara yüzey görüntüleri

%3 $MgSO_4$ ve %1.5 $MgSO_4$ +%1.5 Na_2SO_4 çözeltilerinde 12 hafta bekletilen geopolimer beton numunelerden alınan SEM görüntüleri Şekil 4.24-26'da verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere, sülfat etkisiyle numunelerin içyapılarında çatlakların oluştuğu, jel yapısının bozulduğu, yer yer sülfat etkisi ile genişleyen ürünlerden olan etrenjit oluştuğu ve numunenin içyapısında boşlukların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu çatlaklar

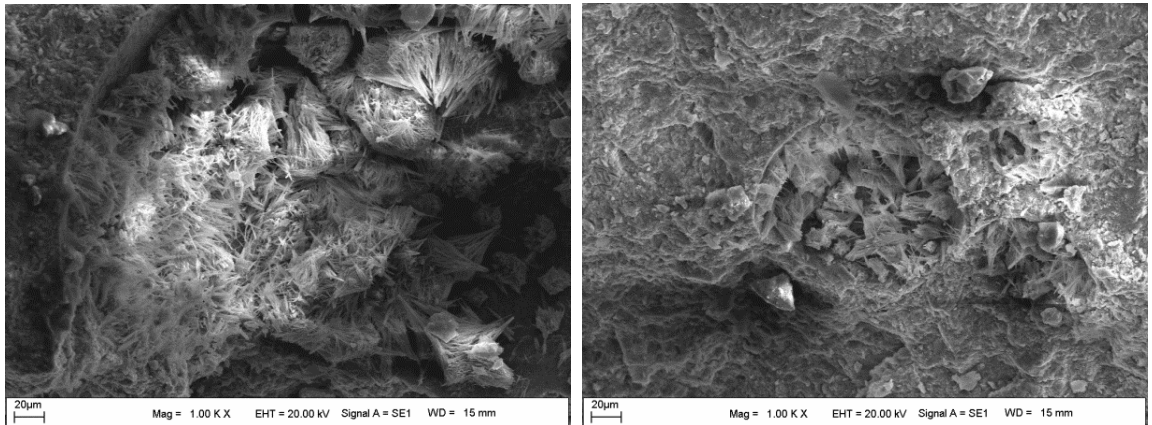
geopolimer jelin yapısını bozarak, durabilite kayıplarına neden olmaktadır. Böylelikle numunelerin mekanik özellikleri olumsuz etkilenmektedir.



Şekil 4.24. Geopolimer beton numunelerde sülfat etkisinde görülen çatlaklar



Şekil 4.25. Geopolimer beton numunelerde sülfat etkisinde görülen agrega-hamur ara yüzey görüntüleri



Şekil 4.26. Geopolimer beton numunelerde sülfat etkisinde görülen etrenjit görüntüleri

Xie vd., (2019) yaptıkları çalışmada GDA ile geopolimer betonun mekanik özelliklerinde UK ve granüle YFC'nin kombinasyonunun etkilerini incelemiştir. Bağlayıcı madde olarak UK ve YFC kullanılmıştır. Numunelere uygulanan Sem analizi sonucunda C-S-H jeli, Ca(OH)₂ az miktarda etrenjit görülmüştür. Sem analizleri normal portland çimentolu numunelere göre kıyaslandığında, GDA içeren numunelerde çatlaklar daha fazla görülmüştür. Bunun nedeni de GDA ile agrega ara yüzey geçiş bölgesinde meydana gelen bozukluklar olarak belirtilmiştir.

Hu vd., (2019) yaptıkları çalışmada GDA ile UK yerine kullanılan cürufun fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. GDA oranları sırasıyla %0,%50 ve %100 dür. UK yerine YFC ise sırasıyla %0,%10,%20 ve %30 olarak kullanılmıştır. GDA kullanılması ile çatlaklar oluşmuş ve oluşan yapıların çok fazla kusuru ortaya çıkmıştır. YFC' nin dahil edilmesiyle yoğunlukta artma ve gözenek yapısında iyileşme görülmüştür.

Bakharev (2005) yaptığı çalışmada %5 NaOH çözeltisinde beklettiği UK esaslı geopolimer beton numunelerin SEM analizi sonucunda derin çatlaklar ve betonda gözenekliliğe neden olan genişleyen ürün ve kristaller görülmüştür. Bu oluşan çatlakların ve genişleyen ürünlerin basınç dayanımını azalttığı belirtilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada donma-çözülme ve sülfat etkisine maruz bırakılan YFC esaslı geopolimer betonun GDA oranlarına göre (%0, 25, 50, 75 ve 100) ve farklı dozaj miktarına göre (300, 400 ve 500 kg/m³) basınç dayanımı, UPV, kılcal geçirimsizlik katsayısı, su emme oranları ve ağırlık kaybı değişimleri kontrol numuneleri ile kıyaslanarak incelenmiştir. Dozaj miktarı ve agrega oranlarına göre 15 farklı grup oluşturulmuştur. Üretilen numunelere yapılan deneylerin sonucu aşağıda özetlenmiştir.

1. Agrega oranları %0, %25, %50, %75 ve %100 ve dozaj miktarı 300, 400, 500 kg/m³ alınarak yapılan 15 farklı numunelerde GDA oranı arttıkça basınç dayanımının azaldığı ancak dozaj miktarının artmasıyla basınç dayanımının arttığı görülmüştür. En yüksek basınç dayanımı 80.04 MPa, en düşük basınç dayanımı 52.32 MPa olarak ölçülmüştür.
2. UPV değerleri basınç değerleriyle paralellik göstermiştir. Numunelerin maksimum değerleri dozaj miktarı arttıkça artmış GDA oranı arttıkça azalmıştır. Bu bağlamda UPV de maksimum değer 5G0 adlı numunede ölçülürken, minimum değer 3G100 adlı numunede ölçülmüştür.
3. Geopolimer beton numunelerde GDA oranı arttıkça su emme oranında da artış görülmüştür. Ancak dozaj miktarının artması su emme oranını azaltmıştır.
4. Donma çözülme döngüsüne maruz kalan numuneler de genel olarak basınç dayanımında azalma gözlemlenmiştir. Donma çözülme sonrasında en yüksek basınç dayanımı 5G0 adlı numunede yaklaşık 70.7 MPa, en az basınç dayanımı ise 3G100 adlı numunede yaklaşık 44.35 MPa olarak ölçülmüştür.
5. Donma çözülmeye maruz kalan numuneler kontrol numuneleriyle kıyaslandığında kılcal geçirimsizlik katsayısında ve su emme oranlarında artma gözlemlenmiştir.
6. Donma çözülme sonrasında en fazla ağırlık kaybı dozaj 3G100 adlı numune de görülmüştür. En az ağırlık kaybı ise 5G0 adlı numunede gözlemlenmiştir.
7. %1.5Na₂SO₄+%1.5MgSO₄ ve %3MgSO₄ çözeltilisine maruz kalan numunelerde sülfatta kalma süresi arttıkça basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. GDA oranı artan numunelerde basınç dayanımı değerinde daha fazla azalma görülürken dozaj miktarının artması dayanımı artırmıştır.

8. Sülfat çözeltisine maruz kalan numuneler de kılcal geçirimsizlik katsayısı ve su emme sülfatta bekletme süresi arttıkça ve GDA oranı arttıkça artmış, dozaj miktarı arttıkça ise azalma göstermiştir.

9. Yapılan deneylerden yola çıkılarak %3MgSO₄ ve %1.5MgSO₄+%1.5Na₂SO₄ iki farklı konsantrasyon içerikli çözeltiler birbirleriyle kıyaslandığında büyük farklılıklar görülmemiştir. Genel olarak GDA oranı arttıkça ağırlık değişimi artmıştır. Fakat numune üzerinde sülfat tortuları biriktiği için ağırlık artışı düzenli bir şekilde olmamıştır.

Üretilen geopolimer betonlara yapılan deneyler sonucunda donma çözülme dayanıklılığını araştırma açısından veriler neticesinde GDA oranını optimum verim alınacak düzeyde tutup, dozaj miktarını artırarak basınç dayanımında, kılcal geçirimsizlikte ve diğer betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinde iyileşme sağlanabilir. Bunun yanı sıra alkali aktivasyon türü miktarı değiştirilerek veya YFC yerine başka puzolanlar kullanılarak GDA içerikli betonlar donma çözülme etkisine karşı kullanılabilir. Geopolimer beton bileşenlerinden bir veya birkaçı değiştirilerek farklı çalışmalar yapılabilir.

6.KAYNAKLAR

- Akbarnezhad A., Huan M., Mesgari S., Castel A.,(2015) Recycling of geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, **101**, 152–158
- Al-Akhras N.M. (2006) Durability of etakaolin concrete to sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, **36**, 1727–1734
- Albitar, M., Mohamed Ali, M.S., Visintin, P., Drechsler, M. (2017). Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes. *Construction and Building Materials*, **136**, 374-385.
- Anuar K.A, Ridzuan A.R.M., Ismail S., (2011), Strength Characteristic of Geopolymer Concrete Containing Recycled Concrete Agregate, *International Journal of Civil Environmental Engineering*, Vol: 11, No: 01,81-85.
- ASTM C597 (2002). Standart test method for pulse velocity through concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C666 / C666M-15 (2015). Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing. 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.
- Atanur, A., Yol Yapımında Yüksek Fırın Cürufu (1983), Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara
- Babu, K.G., Babu D.S., (2004) performance of fly ash concretes containing lightweight EPS aggregates. *Cement and concrete composites*, **26**, 605-611.
- Bakharev, T. (2005). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*, **35**, 1233-1246.
- Bakri A.M.M.A., Mohammed H. , Kamarudin H. , Niza and Zarina Y.,(2011) Review On Fly Ash-Based Geopolymer Concrete Without Portland Cement , *Journal of Engineering and Technology Research* ,Vol.:3(1), 1-4.
- Baradan, B., Yazıcı H., Ün H., (2002) Betonarme yapılarda kalıcılık (Durabilite). Dokuz Eylül Üniversitesi Müh. Fak. Yayınları, İzmir.
- Bouaissi A., Li L., Abdullah M.M.A.B., Bui Q. (2019) Mechanical properties and microstructure analysis of FA-GGBS-HMNS based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, **210**, 198-209.
- Bougara A., Khatib, J., Khellafi, H.,(1999) Workability and Mechanical Properties of Alkali Activated Slag Concrete, *Cement and Concrete Research*, **29**, 455–458.
- Bui N.K., Satomi T., Takahashi H., (2018) Mechanical properties of concrete containing 100% treated coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, **163**, 496–507.
- Corinaldesi V., Moriconi G., (2009) Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, **23**, 2869–2876

- Davidovits, J.,(1994) “Properties of geopolymer cements”, 1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes (edited by Krivenko), Kiev, Ukraine, **1**, 131-149,
- Davidovits J., (2008), Geopolymer Chemistry and applications, Saint Quantin, France.
- Dorum A., Koçak Y., Yılmaz B., Uçar A. (2009) Yüksek fırın cürufunun çimento yüzeyine ve hidratasyona etkileri, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
- Duan P., Yan C., Zhou W.,(2017) A novel water permeable geopolymer with high strength and high permeability coefficient derived from fly ash, slag and metakaolin. *Advanced Powder Technology*, **28**, 1430–1434
- Emiroğlu M., Koçak Y., Subaşı S.,(2011) YFC nin betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi, International Advanced Technologies Symposium Elazığ, Türkiye
- Erdemir Ereğli Demir Çelik Fabrikası, (2008) Ar-Ge Müdürlüğü
- Erdoğan S.T.,(2014). Jeopolimerler Çevre Dostumudur? Çimento ve Beton Dünyası,**107**,50-55.
- Erdoğan, T.Y., (2003). Beton ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara
- Erdoğan, T.Y.,(1995) “Atık Malzemelerin İnşaat Sektöründe Kullanımı-Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cüruf ve Kullanımı”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Ankara,
- Francis N.O., Singh N.B. (2020) Durability properties of geopolymer concrete made from fly ash in presence of kaolin. *Materials Today: Proceedings*
- Glukhovskiy V.D., (1981), Slag-Alkali Concretes Produced From Fine-Grained Aggregate, Kiev: Vishcha Shkolay.
- Gopalakrishnan R., Chinnuraju K., (2019) Durability of ambient cured alumina silicate concrete based on slag/fly ash blends against sulfate environment. *Construction and Building Materials*, **204**, 70-83
- Güneyisi E., Gesoğlu M., Mermerdaş K.,(2007) Metakaolin katkılı betonun sülfat dayanıklılığının incelenmesi, Gaziantep Üniversitesi, Türkiye
- http://celik.org.tr/wp-content/uploads/2016/12/4-TCUD-Curuf_Rapor.
- <http://www.betonvecimento.com/surdurulebilirlik/curuf-el-kitabi>
- <http://www.betonvecimento.com/surdurulebilirlik/curuf-el-kitabi>
- <http://www.eea.europa.eu/soer/countries/tr/waste-stateand-impacts-turkey>
- <http://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/File:Waste>
- <https://mkutluhanergin.wordpress.com/2014/11/21/geopolimer-beton/>
- <http://www.thbb.org/media/2084/etkinlikler116.pdf>.
- <https://volkanatabey.com.tr/geopolimer-cimento>
- Hu, Y., Tang, Z., Li, W., Li, Y., Tamd V.W.Y.,(2019) Physical-mechanical properties of fly ash/GGBFS geopolymer composites with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, **226**, 139-151.
- Ilıca T., (2008) Farklı çimentolarla üretilen betonlarda sülfat etkisi ve klorür geçirimsizliği, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

- Júnior N.S.A, Silva G.A.O., Ribeiro D.V.,(2017) Effects of the incorporation of recycled aggregate in the durability of the concrete submitted to freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, **161**, 723–730.
- Kantarıcı F. (2013) Elazığ ferrokrom cürufundan alkali aktivasyon metoduyla üretilen geopolimer çimentolu betonların yangın dayanımının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. İnönü Üniversitesi.
- Karakoç, M.B., Türkmen, İ., Maraş, M.M., Kantarcı F., Demirboğa R. (2016) Sülfate resistance of ferrochrome slag based geopolymer concrete. *Ceramics International*, **42**, 1254-1260
- Kasemsiri P., Chindapasirt P.,(2016) Pressed lightweight fly ash-OPC geopolymer concrete containing recycled lightweight concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, **127**, 450–456.
- Koushkbaghi M., Alipour P., Tahmouresi B., Mohseni E., Saradar A., Malhotra V.M.,(2019) “Strength and Durability Characteristics of Concrete Incorporating a material. *Applied Geochemistry*, 17-8: 1143-48
- Lea, F.M., (1970) *The Cemistry of Cement and Concrete*, Edward Arnold Ltd
- Li Z., Ding Z., Zhang, Y. (2004). Development of sustainable cementitious materials (pp: 55-76). Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, May 20-21, Beijing, China.
- Lloyd, N.A., Rangan, B.V. (2010). Geopolymer concrete with fly ash. Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Università Politecnica delle Marche, June 28-30, Ancona, Italy.
- Mika, J. (2017). Meteorological and hydrological changes based on european environment agency. *Scholarly Journals*, 227-234.
- Nnaemeka,O.F., SinghN.B.,(2020) Durability properties of geopolymer concrete made from fly ash in presence of Kaolin. *Materials Today: Proceedings*.
- Nuaklong, P., Sata, V., Chindapasirt, P. (2016). Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production*, **112**, 2300-2307.
- Nuaklong P., Sata V., Chindapasirt P., (2017) 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.,(2005) “Recycled Concrete Aggregates”, *Cement & Concrete Composites*, **27**, 315–318.
- Öztütüncü G.H., (1992) Ortalama hafif agrega boyutunun yarı hafif betonların dona dayanıklılığı üzerindeki etkileri, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Pacheco T.F., Labrincha, J.A., Leonelli, C., Palomo, A., Chindapasirt P. (2015) *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, Woodhead Publishing, Cambridge.
- Parthiban K., Mohan K.S.R.,(2017) Influence of recycled concrete aggregates on the engineering and durability properties of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, **133**, 65–72.

- Penttala, V., (2006) Surface and internal deterioration of concrete due to saline and non-saline freeze–thaw loads. *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No.5, 921-928.
- Pigeon M., Pleau, R., (1995) "Durability of Concrete In Cold Climates", E&FN Spon, 244 pp, ISBN 0-419-19260-3.
- Posi P., Thongjapo P., Thamultree N., Boontee P., Nuaklong P., Sata V., Chindaprasirt P., (2016) Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production* **112**, 2300-2307.
- Ryu G.S., Lee Y.B., Koh K.T., Chung Y.S., (2013) The mechanical properties of fly based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials*, 409-418.
- Sata V., Wongs A., Chindaprasirt P., (2013) Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, **42**, 33–39
- Sarker P.K., (2019) Influence of different monomer ratios and recycled concrete aggregate on mechanical properties and durability of geopolymer concretes. *Construction and Building Materials*, **205**, 519–528.
- Shaikh F.U.A, (2016) Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment* **5**, 277-287.
- Shi X.S., Collins F.G., Zhao X.L., Wang Q.Y., (2012) Mechanical properties and microstructure analysis of fly ash geopolymeric recycled concrete. *Journal of Hazardous Materials* 20-29.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., Bhattacharyya, S.K., (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials*, **85**, 78-90.
- Smolczyk, H.G., (1986) "Slag Structure and identification of Slag", Principal Report, 7th Int. Swamy), s. 73-99, Surrey Univeristy Press.
- Sun, P.J., Wu, H.C., (2013) Chemical and freeze thaw resistance of fly ash-based inorganic mortars. *Fuel* **111**, 740-745.
- Swanepoel J.C., Strydom, C.A. (2002). Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. *Applied Geochemistry*
- Şimşek, O. (2010). *Beton Bileşenleri ve Beton Deneyleri*. Seçkin Yayıncılık A.Ş., Ankara, 384 s
- Tawatchai T., Sata V., Boonserm K., Chindaprasirt P., (2018) Compressive strength and microstructure analysis of geopolymer paste using waste glass powder and fly ash. *Journal of Cleaner Production*, **172**, 2892-2898.
- Thokchom, S., Ghosh, P., Ghosh, S. (2009). Effect of Na₂O content on durability of geopolymer mortars in sulphuric acid. *International Journal of Chemical and Biological Engineering*, 2:1, 20-25.
- Tokyay, M., Erdoğan, K., (2005) Cürüflar ve Cürüflü Çimentolar, TÇMB/AR-GE/Y97-2, 6. Baskı, Şubat
- Topçu İ.B., Toprak M.U., Uygunoğlu T., (2004) Durability and microstructure characteristic of alkali activated coal bottom ash geopolymer cement. *Journal of Cleaner Production*, 211-217.

- Torgal F. P., Gomes J. G., Jalali S., (2008), Alkali-Activated Binders: A Review Part 1. Historical Background, Terminology, Reaction Mechanisms and Hydration Products, *Construction and Building Materials*, **22**, 1305–1314.
- 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.
- Türkmen, İ. ve Gavgalı, M., (2003) Influence of different curing conditions on the physical and mechanical properties of concretes with admixtures of silica fume and blast furnace slag. *Materials Letters*, **57**, 4560-4569.
- Türkmen, İ., (2002) Korozif Etkiler Altında Yüksek Fırın Cürufu Ve Silis Dumanı Katkılı Yüksek Dayanımlı Betonların Mekanik Özellikleri Ve Dayanıklılığı, Atatürk üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum.
- Uyan, M., (1975) Beton ve harçlarda kılcallık olayı. İTÜ, İnşaat Fakültesi, Doktora Tezi, İstanbul.
- Uyan, M., Özcan M., Yıldırım H., (1998) Tunçbilek ve seyitömer uçucu küllerinin betonun kılcallık ve su emme özelliklerine etkisi. Beton Çimento ve Boya Semineri, DSİ-TAKK Dairesinin Kuruluşunun 40. Yılı Anısına 24-26 Haziran, Ankara.
- Voraa P.R., Dave U.V., (2013) Parametric Studies on Compressive Strength of Geopolymer Concrete. *Procedia Engineering*, **51**, 210 – 219
- Winter, N.,(2009) “Understanding Cement”, WHD Microanalysis Consultans, with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, **226**, 139–151.
- Xie J., Wangb J., Rao R., Wang C., Fang C., (2019) Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled. *Composites Part B*, **164**, 179–190.
- Xu H., Van Deventer J.S.J.,(1999) The geopolymerisation of alimino-silicate minerals. *Int.J.miner Process* **59**, 247-266.
- Xu, H., Van Deventer, J.S.J. (2002). Geopolymerisation of Multiple Minerals. *Minerals Engineering*, 15-12: 1131-39.
- Yaoa X., Zhang Z., Zhu H., Chen Y., (2009), Geopolymerization Process of Alkali–Metakaolinite Characterized By Isothermal Calorimetry, *Thermochimica Acta*, **493**, 49-54.
- Yazıcı, H.,(2004). Termik Santral AtığıYapay Alçı – Uçucu Kül – Taban Külü Esaslı Yapı Malzemesi Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Yu Z.X., Liong C., Sridhar K.,(2016) Fly ash based geopolymer: clean production, properties and applications. *Cleaner production*, **125**, 253-267
- Yürek,C.S,“Kentsel Dönüşüm Uygulamaları-Hukuki, İdari ve Teknik Altyapısı”-İnşaat Mühendisleri Odası -TMH - 478 -2013/4.
- Zhao R., Yuan Y., Cheng Z., Wena T., Li, J., Li F.,Shi, C., Jiménez, A.F., Palomo, A. (2019). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, **41**, 750-763

- Zeybek O., (2009), Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir..
- Zhang, L., Ahmari S., Zhang J.,(2019) Synthesis and Characterization of Fly Ash Modified Mine Tailings-Based Geopolymers, *Construction and Building Materials*, **25**, 3773-3781.
- Zhongguo J.M., (2019) Freeze-thaw resistance of Class F fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, **222**, 474–483.
- Zichao, W., Tarun, R.N.(2002) Properties of concrete produced from multicomponent blended cements, *Cement and Concrete Research* **32** pp. 1937 – 1942.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ayşe İlayda Uğurlu
Doğum Tarihi ve Yeri : 03.01.1994
E-posta : ilayda17@hotmail.com.tr

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.