

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FERROKROM CÜRUFU VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KULLANILARAK
ÜRETİLEN GEOPOLİMER BETONLARIN DONMA ÇÖZÜLME
DAYANIKLILIĞININ ARAŞTIRILMASI

MUSTAFA ÖZDAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2019

Tezin Başlığı: Ferrokrom cürufu ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Donma Çözülme Dayanıklılığının Araştırılması

Tezi Hazırlayan: Mustafa ÖZDAL

Sınav Tarihi: 17.06.2019

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı:	Doç. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ	
	İnönü Üniversitesi	
	Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN	
	İnönü Üniversitesi	
	Dr. Öğr. Üyesi Ahmet BENLİ	
	Bingöl Üniversitesi	

Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL
Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Ferrokrom Cürufu ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Donma Çözülme Etkilerine Karşı Dayanıklılığının Araştırılması” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Mustafa ÖZDAL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FERROKROM CÜRUFU VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KULLANILARAK ÜRETİLEN GEOPOLİMER BETONLARIN DONMA ÇÖZÜLME ETKİLERİNE KARŞI DAYANIKLILIĞININ ARAŞTIRILMASI

Mustafa ÖZDAL

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

68 + xi sayfa

2019

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

Bu çalışmada bağlayıcı olarak Elazığ ferrokrom cürufu (EFC) ve yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılarak üretilen geopolimer betonların donma çözülme etkilerine karşı dayanıklılığı incelenmiştir. Bu amaçla EFC yerine ağırlıkça %0, %25, %50, %75 ve %100 oranında YFC katılarak 5 grup geopolimer beton üretilmiştir. Üretilen geopolimer beton numuneler 28 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra ASTM C666 standardına uygun olarak 50 çevrimlik periyotlarda 300 çevrime kadar suda donma-çözülme etkisine maruz bırakılmıştır. Bu süreçte numunelerin basınç dayanım değerleri, ultrasonik ses hızları (UPV), ağırlık değişimleri belirlenmiş ve görsel değişimleri ile içyapıları incelenmiştir. Deney sonuçları, kontrol numunelerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, en yüksek basınç dayanımı değeri E0 grubundaki numunelerde elde edilirken, EFC oranı arttıkça basınç dayanımı değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Numuneler görsel olarak incelendiğinde donma çözülme etkileri numunelerin köşelerinde ve daha sonra yüzeylerinde dağılma etkisiyle gözlemlenmiştir. Numunelerdeki bozulmalar en az E0 grubunda, en çok E100 grubunda oluşmuştur. E75 grubundaki numuneler 200, E100 grubundaki numuneler ise 150 çevrim sonunda dağılmışlardır.

ANAHTAR KELİMELEER: Geopolimer beton, Elazığ ferrokrom cürufu, yüksek fırın cürufu, donma çözülme etkisi

ABSTRACT

Master of Science Thesis

INVESTIGATION OF THE DURABILITY OF GEOPOLYMER CONCRETES PRODUCED BY USING FERROCHROME SLAG AND BLAST FURNACE SLAG AGAINST TO FREEZE AND THAW EFFECTS

Mustafa ÖZDAL

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

68 + xi pages

2019

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

In this study, the durability of geopolymer concretes produced by using Elazığ ferrochrome slag (EFC) and blast furnace slag (YFC) as binder against to freeze and thaw effects was investigated. For this purpose, five groups of geopolymer concrete were produced by adding 0%, 25%, 50%, 75% and 100% YFC by weight of instead of EFC. The produced geopolymer concrete samples were exposed to freeze-thaw effect up to 300 cycles in 50 cycle periods according to ASTM C666 standard after completing the curing period of 28 days. In this process, compressive strength values, ultrasonic pulse velocities (UPV) and weight changes of geopolymer concretes were determined and, their visual changes and microstructure analysis were examined. The test results were compared with the results of the control samples. According to the results of the experiment, the highest compressive strength value was obtained in the E0 group, and it was observed that the compressive strength values decreased with increasing EFC ratio. When the samples were examined visually, the freezing and thawing effects were observed with the effect of dispersing first on the corners and then on the surfaces of the samples. The deterioration of the samples was the least in group E0 and the most in group E100. The samples in the E75 and E100 group failed after 200 and 150 cycles, respectively.

KEYWORDS: Geopolymer concrete, Elazığ ferrochrome slag, blast furnace slag,
freeze and thaw effect

TEŞEKKÜR

Tez konumun belirlenmesinde ve çalışmanın her aşamasında yardım, öneri ve desteğini esirgemeyerek beni yönlendiren ve akademik hayatta benim için daima örnek alınacak bir akademisyen olan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ’a;

Çalışmamın her aşamasında bana çok destek ve yardımcı olan Sayın Arş. Gör. Ahmet ÖZCAN’a

Çalışmama FYL-2018-1131 numaralı proje ile maddi destek sağlayan İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi’ne;

Bu çalışmada kullanılmak üzere öğütülmüş yüksek fırın cürufu temin etmemizi sağlayan Karçimsa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. yetkililerine;

Çalışmama yardımcı olan İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü araştırma görevlileri Sayın Fatih KANTARCI ve Sayın Enes EKİNCİ’ye laboratuvar sorumlusu Sayın İlhami BAYSAL’a,

teşekkür ederim.

Ayrıca yüksek lisans eğitimine başlamamı sağlayan ve eğitim süresince maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili eşim ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1. Geopolimer.....	3
2.1.1. Geopolimer kimyası	5
2.2. Yüksek Fırın Cürufu (YFC)	7
2.2.1. YFC üretimi	8
2.2.3. YFC'nin kimyasal özellikleri.....	11
2.3. Elazığ Ferrokrom Cürufu (EFC)	12
2.3.1. Ferrokrom cürufunun elde edilmesi	12
2.3.2. Ferrokrom cürufunun fiziksel ve kimyasal yapısı.....	14
2.4. Betonda Donma-Çözülme Etkisi	15
2.4.4. Donma-çözülme mekanizmaları	18
2.4.4.1. Hidrolik basınç teorisi	18
2.4.4.2. Osmotik basınç teorisi.....	19
2.5. Literatür Özeti	20
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	27
3.1. Materyal	27
3.1.1. Elazığ ferrokrom cürufu ve özellikleri.....	27
3.1.2. Yüksek fırın cürufu ve özellikleri	28
3.1.3. Aktivatörler	28
3.1.4. Agregalar	29
3.1.5. Aletler.....	30
3.1.5.1. Elekler	30

3.1.5.2.	Beton karışım mikseri	30
3.1.5.3.	Çelik kalıplar	31
3.1.5.4.	Etüv	31
3.1.5.5.	Basınç dayanım cihazı.....	32
3.1.5.6.	Ultrasonik ses hızı ölçüm cihazı	33
3.1.5.8.	Donma çözülme cihazı	33
3.1.5.9.	SEM cihazı	34
3.1.5.10.	Diğer malzemeler	34
3.2.	Yöntem.....	35
3.2.1.	Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler	35
3.2.2.	Geopolimer beton karışım seçeneklerinin belirlenmesi.....	35
3.2.3.	Geopolimer beton üretimi, numunelerin yerine konması ve bakımı	36
3.2.4.	Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler.....	37
3.2.4.1.	Basınç dayanımı	38
3.2.4.2.	Ultrasonik ses hızı ölçümü	38
3.2.4.3.	Dinamik elastisite modülü	39
3.2.4.4.	Ağırlık değişimi	40
3.2.4.5.	SEM analizi.....	40
3.2.4.6.	Donma-çözülme etkisi	40
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	41
4.1.	Agrega Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma	41
4.2.	Sertleşmiş Beton Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma	41
4.2.1	Kontrol numunelerin basınç dayanımları.....	41
4.3.2.	Kontrol numunelerin UPV ölçümleri.....	44
4.3.4.	Kontrol numunelerin görsel incelemeleri.....	45
4.4.	Donma-Çözülme Etkisine Maruz Kalan Geopolimer Beton Numuneleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma.....	46
4.4.1.	Donma-çözülme etkisindeki numunelerin basınç dayanımları	46
4.4.2.	Donma-çözülme etkisindeki numunelerin UPV ölçümleri	49
4.4.3.	Donma-çözülme etkisindeki numunelerin bağıl dinamik elastisite modülü (BDEM) değerleri.....	50
4.4.4.	Donma-çözülme etkisindeki numunelerin ağırlık değişimleri.....	52
4.4.5.	Donma-çözülme etkisindeki numunelerin görsel incelemeleri.....	53

4.4.6.	Donma-çözölme etkisindeki numunelerin içyapı analizleri.....	56
5.	SONUÇ ve ÖNERİLER.....	59
6.	KAYNAKLAR	61
	ÖZGEÇMİŞ	68

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

CaCO ₃	Kalsiyum karbonat
CaO	Kalsiyum oksit
Ca(OH) ₂	Kalsiyum Hidroksit
CO ₂	Karbondioksit
Fe ₂ O ₃	Demir oksit
KOH	Potasyum hidroksit
MgO	Magnezyum oksit
MnO	Mangan oksit
Ms	Silis modülü (SiO ₂ /Na ₂ O)
NaCl	Sodyum klorür
Na ₂ O	Sodyum oksit
NaOH	Sodyum hidroksit
Na ₂ SiO ₃	Sodyum metasilikat
SiO ₂	Silisyum dioksit
A/S	Aktivatör çözelti/cüruf
AAM	Alkali aktif harç
AAS	Alkali ile aktive olan cüruf
ACI	American Concrete Institute
ASC	Alkali ile aktive cüruf betonu
ASTM	American Society for Testing and Materials
BDEM	Bağıl dinamik elastisite modülü
CBA	Kömür taban külü
E0	%0 Elazığ ferrokrom cürufu + %100 yüksek fırın cürufu
E25	%25 Elazığ ferrokrom cürufu + %75 yüksek fırın cürufu
E50	%50 Elazığ ferrokrom cürufu + %50 yüksek fırın cürufu
E75	%75 Elazığ ferrokrom cürufu + %25 yüksek fırın cürufu
E100	%100 Elazığ ferrokrom cürufu + %0 yüksek fırın cürufu
EFC	Elazığ ferrokrom cürufu
FBC-BA	Taban külü
F-T	Donma-çözülme
FA	Uçucu kül

GBFS	Yüksek fırın cürufu
GPC	Geopolimer beton
MPCM	Mikrokapsüllenmiş faz değişim malzemesi
MS	Mikro-silika
NS	Nano-silika
OPC	Normal portland çimentosu
PCC	Portland çimentolu beton
PÇ	Portland çimentosu
RMSFFA	F sınıfı uçucu kül
s/b	Su/bağlayıcı
SBL	Stiren-Butadien Lateks
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TS	Türk Standartları
UK	Uçucu kül
UPV	Ultrasonik ses hızı
WCP	Atık seramik karo tozu
YFC	Yüksek fırın cürufu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Alümino silikat yapıları ile geopolimer türleri	6
Şekil 2.2.	Geopolimerizasyonun reaksiyon aşamaları	7
Şekil 2.3.	Yüksek fırın cürufu üretim şeması	9
Şekil 2.4.	Granülasyon yönteminin şematik gösterimi	10
Şekil 2.5.	Peletleme yönteminin şematik gösterimi	11
Şekil 2.6.	Fırında oluşan reaksiyonlar.....	11
Şekil 2.7.	Ferrokrom fırınındaki tipik indirgeme reaksiyonları	13
Şekil 2.8.	Ferrokrom cürufunun kimyasal kompozisyonu	15
Şekil 2.9.	Betonda hidrolik basınç mekanizması	19
Şekil 2.10.	Osmotik basınç teorisinin mekanizması	20
Şekil 3.1.	Değirmen.....	27
Şekil 3.2.	Doğal, öğütülmüş ve elenmiş EFC	27
Şekil 3.3.	Kullanılan agrega örnekleri.....	30
Şekil 3.4.	Elekler	30
Şekil 3.5.	Beton karışım mikseri	31
Şekil 3.6.	Çelik kalıplar.....	31
Şekil 3.7.	Etüv	32
Şekil 3.8.	Basınç dayanımı test cihazı.....	32
Şekil 3.9.	UPV ölçüm cihazı	33
Şekil 3.10.	Donma Çözülme Cihazı.....	34
Şekil 3.11.	SEM cihazı.....	34
Şekil 3.12.	Kalıpların etüve konması	37
Şekil 3.13.	Geopolimer beton numuneleri	37
Şekil 4.1.	Geopolimer beton numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri	42
Şekil 4.2.	Geopolimer beton numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük UPV değerleri.....	45
Şekil 4.3.	Kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonra görünümleri	46

Şekil 4.4.	300 donma-çözülme çevrimine kadar numunelerin basınç dayanımları	47
Şekil 4.5.	300 donma-çözülme çevrimine kadar numunelerin UPV ölçümleri.....	49
Şekil 4.6.	300 donma-çözülme çevrimine kadar numunelerin BDEM değerleri.....	51
Şekil 4.7.	300 donma-çözülme çevrimine kadar numunelerin ağırlık değişim değerleri	53
Şekil 4.8.	50 donma-çözülme çevrimi sonrası numunelerin görsel incelemesi	54
Şekil 4.9.	100 donma-çözülme çevrimi sonrası numunelerin görsel incelemesi	54
Şekil 4.10.	150 donma-çözülme çevrimi sonrası numunelerin görsel incelemesi	55
Şekil 4.11.	200 donma-çözülme çevrimi sonrası numunelerin görsel incelemesi	55
Şekil 4.12.	250 donma-çözülme çevrimi sonrası numunelerin görsel incelemesi	55
Şekil 4.13.	300 donma-çözülme çevrimi sonrası numunelerin görsel incelemesi	55
Şekil 4.14.	Üretilen geopolimer beton numunelerde görülen yoğun jel yapısı.....	57
Şekil 4.15.	Üretilen geopolimer beton numuneler agreg-a-jel ara yüzey görüntüleri	57
Şekil 4.16.	Donma-çözülme etkisindeki numunelerde görülen çatlak görüntüleri	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1.	EFC ve YFC'nin kimyasal bileşimleri.....	28
Çizelge 3. 2.	Sodyum hidroksit ve sodyum metasilikatın kimyasal özellikleri	29
Çizelge 3.3.	Geopolimer beton kodları	36
Çizelge 3.4.	Karışımında kullanılan malzeme miktarları (1 m ³ geopolimer beton için)	36
Çizelge 4.1.	Dere agregasının özgül ağırlık ve su emme oranı.....	41
Çizelge 4.2.	Geopolimer beton numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri	42
Çizelge 4.3.	Geopolimer beton numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük UPV değerleri	45
Çizelge 4.4.	300 donma-çözülme çevrimine kadar numunelerin basınç dayanımları	46
Çizelge 4.5.	300 donma-çözülme çevrimine kadar numunelerin UPV ölçümleri	49
Çizelge 4.6.	300 donma-çözülme çevrimine kadar numunelerin BDEM değerleri	51
Çizelge 4.7.	300 donma-çözülme çevrimine kadar numunelerin ağırlık değişim değerleri.....	52

1. GİRİŞ

Dünyada inşaat sektörü denildiğinde ilk akla gelen malzemelerden biri de betondur. Günümüzde betonu oluşturan en önemli bileşenlerden biri de bağlayıcı malzeme olan Portland çimentosudur (PÇ). PÇ'nin bu denli kullanımı ciddi oranda enerji, ekonomi ve çevre problemlerini de bir sorun olarak ortaya çıkarmaktadır. Çimento üretimi, yüksek sıcaklıklarda (1400- 1500 °C) gerçekleşebildiği için önemli ölçüde enerji tüketimi ve dolayısıyla yüksek maliyetlerle elde edilmektedir. Dünyada toplam CO₂ salınımının %7'sinin çimento üretimi süreçlerinden kaynaklandığı bilinmektedir. Bu yüzden PÇ'ye alternatif bağlayıcılar üretmek güncel araştırma konuları arasında çokça yer almaktadır (Kantarcı, 2013).

Çimento beton üretimi için kullanılan en maliyetli ve önemli bileşendir. Çimentoların teknik özellikleri ve miktarı, betonun performansını ve maliyetini doğrudan etkilemektedir. Bu sebeplerden puzolanik malzemeler, betonun maliyetini düşürmek ve bir takım olumsuz özelliklerini iyileştirmek için ya doğrudan katkı olarak ya da çimentonun bir kısmına ilave edilmek üzere betonda katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır (Aruntaş, 1996; Açıkgöz 2015).

PÇ'ye alternatif bağlayıcı konusunda yapılan çalışmalardan önde gelenleri YFC, uçucu kül ve benzeri endüstriyel atıkların alkalilerle aktivasyonudur. Alümina ve silika içeren her malzeme teorik olarak alkalilerle aktive edilebilmekte ve uçucu kül, YFC gibi amorf karakterli atık malzemeler bu sayede bağlayıcı özellik kazanabilmektedir (Aydın,2010; Açıkgöz 2015).

Yapılan çalışmalar göz önüne alındığında sıkça kullanılan alkaliler arasında sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum silikat ve sodyum sülfat bulunmaktadır. Sodyum sülfat ve sodyum karbonat doğal kaynaklardan elde edilirken Sodyum hidroksit ve sodyum silikat yalnızca üretimi yapılarak elde edilebilmektedir (Shi vd. 2006; Özodabaş, 2014; Açıkgöz 2015).

İnorganik moleküllerin oluşturduğu polimerik yapılara geopolimer adını 1978 yılında malzeme bilimci Davidovits vermiştir. Geopolimer bağlayıcı çoğunlukla uçucu kül, YFC gibi endüstriyel atık malzemelerden elde edilmektedir. Uçucu kül termik santrallerde, YFC ise demir çelik tesislerinde atık olarak ortaya çıkmaktadır (Ali, 2016).

Ferrokrom, paslanmaz ve ısıya dirençli çelik üretiminde kullanılan bir metal bileşimidir. Ferrokrom ve silikoferrokrom cürufu ise ferrokrom üretimi yapan tesislerin elektrik-ark fırınlarından işlem sonucu açığa çıkan atık malzemelerdir. Ferrokrom ve silikoferrokrom üretimi esnasında indirgenmeyen oksitler ile bir miktar SiO_2 metal yüzeyinde sıvı bir cüruf tabakası oluşturur (Yılmaz ve Sütas, 2008). Çalışmaya konu olan Elazığ ferrokrom cürufunun(EFC) Elazığ ferrokrom fabrikasında üretimi 150.000 ton/yıl ve üretilen her 3 kg ferrokrom başına 1 kg cüruf atığı çıktığından, 1 yılda atılan cüruf miktarı 50.000 ton'dur. Bu cüruf %3-5 arasında Cr_2O_3 içermektedir (Yazıcı ve Kaya, 2003; Maraş 2013; Özcan 2018).

Bu çalışmanın amacı YFC ve EFC kullanarak geopolimer betonlar üretmek ve üretilen bu geopolimer betonların donma-çözülme etkilerine karşı dayanıklılığını belirlemektir. Bu çalışmada bağlayıcı olarak YFC ve EFC, alkali aktivatör olarak sodyum metasilikat ve sodyum hidroksit, agrega olarak da dere agregası kullanılmıştır. Geopolimer beton karışımlarında silis modülü 1.5, NaOH çözeltisinin molaritesi 10M, Na_2O içeriği %10 ve su/bağlayıcı (s/b) oranı 0.43 olarak belirlenmiştir. Geopolimer beton karışımları 50x50x50 mm boyutlarındaki çelik kalıplara dökülmüştür. Kalıplar etüvde 80 °C sıcaklıkta 24 saat bekletildikten sonra numuneler kalıplardan çıkarılıp 27 gün boyunca 23 ± 1 °C sıcaklıktaki kür havuzunda kür edilmiştir. Üretilen numuneler kür sürelerini tamamladıktan sonra donma-çözülme deneyi uygulanmıştır. Bu süreçte 50-100-150-200-250-300 çevrimlerde numunelerin ağırlık ve boy değişimleri belirlenmiş, görsel değişimleri incelenmiş ve ultrasonik ses hızları (UPV) ölçülmüştür. 100-200-300 çevrimlerde ise ayrıca numunelerin basınç dayanımları da ölçülmüştür. Bu sonuçlar aynı yaştaki suda bekletilen kontrol numunelerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Geopolimer

Geopolimer bağlayıcıların 1978 yılında Davidovits tarafından tanımlanmasından bu yana, kimya alanının yanı sıra mühendisliğin de ilgisini çekmiş ve çevre dostu olmalarının dışında yüksek erken dayanımları ve asit ve sülfat direncinden dolayı geopolimerler normal PÇ'lere muhtemel alternatif olarak ortaya çıkmışlardır (Thokchom vd. 2009).

Son yıllarda cüruf veya uçucu kül gibi atık maddelerin alkaliler ile aktive edilerek çevre dostu yeni bir bağlayıcı malzeme elde edilmesi üzerine çok sayıda çalışma mevcuttur. Dünya çapında düşük karbon salınımının öneminin artması ile hükümetler enerji tasarrufuna daha çok önem vermektedir. Bu alkali aktive edilmiş bağlayıcılar PÇ'lere kıyasla çok daha düşük kalsinasyon sıcaklığı (600-800°C) gerektirir; %70 daha az enerji tüketir ve %80-90 oranında daha az karbondioksit yayar dolayısıyla da düşük karbonlu çimento olarak adlandırılırlar (Fu vd. 2011).

Geopolimer terimi yerine benzer tip malzemeler için farklı adlandırmalar kullanılmıştır. Düşük sıcaklıklı alkali bağlı seramikler (Mallicoat et al., 2005), alkali aktive edilmiş çimentolar (Palomo and Fuente, 2003), inorganik polimer betonlar (Sofi et al., 2007), hidroseramikler (Bao et al., 2005) ve alüminosilikatlar (Rahier et al., 1996) gibi adlandırmalar sıkça kullanılanlardır (Nugteren et al., 2009). Geopolimer olarak bilinen inorganik polimerlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin büyük kısmı alümino silikatların alkali aktivasyonu ile oluşur ve bu özellikleri ile malzemeleri birçok uygulama için faydalı hale getirir (Komnitsas et al., 2009). Geopolimerlerin kullanımı ve özellikleri, organik kimya, fizikokimya, mineroloji, jeoloji ve mühendislik teknolojisi gibi, birçok bilimsel ve endüstriyel alanlarda araştırılmaktadır. Geopolimerlerin uygulama alanları oldukça fazladır. Bunlar özellikle, yangına dayanıklı malzemelerde, dekoratif taşlı eserlerde, düşük enerjili seramiklerde, çimento ve beton üretimlerinde, altyapı ve onarım için kompozit karışımlarda, radyoaktif ve zehirli atık maddelerin değerlendirilmesi gibi birçok alanda kullanılmıştır (Davidovits, 2015; Kantarcı 2013).

Geopolimer malzemelerin mikroyapısı ve kimyasal bileşimi Mısır Piramitleri, Roma Anfi Tiyatrosu gibi yapılarda kullanılan malzemelere benzerlik göstermektedir

(Davidovits, 1989). Geopolimerler insan yapımı kayalar olarak da düşünülebilir. Geopolimerler, yüksek konsantrasyonlu sulu alkali hidroksitler veya silikat solüsyonları ile katı alüminosilikatların reaksiyona girmeleriyle üretilebilmektedirler (Davidovits, 1999; Maraş 2013).

Geopolimerler; doğal zeolitlerin yapay benzeridirler. Geopolimerler, UK ve YFC gibi silis ve alüminli malzemelerin Na_2SiO_3 , NaOH ve KOH gibi alkalilerle aktivasyonu ile üretilmektedirler. Öğütme, kür sıcaklığı ve süresi, alkali tip ve miktarı geopolimerlerin özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerdir (Barbosa vd. 2000; Davidovits, 1994; Palomo vd. 1992; Toprak 2011).

Geopolimer çimentolar, standart çimentolara alternatif olarak ve atık maddeleri değerlendirmek için üretilen malzemelerdir. Ayrıca geopolimer, beton üretim tesislerinde çevreye verilen zararlı gazları azaltmak için geliştirilmiş bir teknolojidir (McLellan vd. 2011). Geopolimerizasyon, geopolimerlerin oluştuğu karmaşık bir süreçtir. Bazı test metotları geopolimerizasyon sürecini tanımlamak için kullanılmıştır. XRD çok az veri ile geopolimer ürünlerin kristalleşme davranışlarını test etmek için oldukça sık kullanılmaktadır (Yao vd. 2009; Maraş 2013).

PÇ ile karşılaştırıldığında geopolimerlerin avantajları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır (Li vd. 2004).

1. Hammadde kaynaklarının bol olması: Alkali çözeltide çözünen silikat veya alüminli silikatlar doğada bol miktarda bulunur.

2. Enerji tasarrufu ve çevre korunumu: Geopolimerler, yüksek enerji tüketimi gerektirmezler.

3. Basit hazırlama yöntemi: Geopolimerler, alüminosilikat reaktif malzemelerin, kuvvetli alkali çözeltilerle karıştırılmasıyla kolaylıkla sentezlenebilir; ardından oda sıcaklığında kür edilir. Kısa bir zaman içinde makul miktarda dayanım elde edilir. Bu işlem PÇ'li betonların hazırlanmasına benzemektedir.

4. İyi hacim kararlılığı: Geopolimerler PÇ'lerden %80 daha az rötreyle sebep olurlar.

5. Kısa sürede dayanım kazanımı: Geopolimerler, prizin ilk 4 saatinde nihai basınç dayanımının %70'ini kazanabilirler.

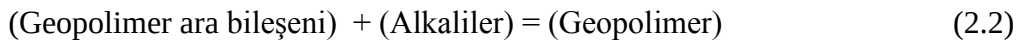
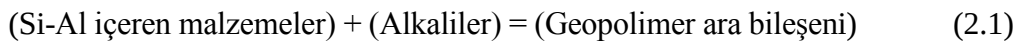
6. Mükemmel dayanıklılık: Geopolimer beton veya harçlar dayanımlarında çok fazla kayıp olmaksızın dış etkilere çok daha uzun süre dayanabilirler.

7. Yüksek yangın dayanımı ve düşük termal iletkenliği: Geopolimerler dayanımlarını kaybetmeden 1000-1200 °C'lere kadar dayanabilmektedirler. Isıl iletkenlikleri de 0.24 W/m·K - 0.3 W/m·K civarındadır.

2.1.1. Geopolimer kimyası

Geopolimerlerin oluşum mekanizması üzerinde de pek çok araştırma yapılmıştır. Davidovits (2008), geopolimer sentezinin üç adımda oluştuğunu belirtmiştir; bunlar alüminosilikatların kuvvetli alkali çözeltilerde çözülmesi, serbest iyon gruplarının dağılımı ve polikondenzasyondur. Ancak her aşama birçok adımdan oluşmaktadır. Örneğin; çözünme aşaması termodinamiğe göre 8 adımdan oluşur ve her farklı yol, geopolimerlerin son özelliklerini belirleyecek farklı iyon gruplarını oluşturabilir. Böylece, geopolimer üretiminde geopolimerizasyon mekanizmasını açıkça anlamak için kesin ve doğru yolu belirlemek önem taşımaktadır. Geopolimerin oluşması çok hızlıdır. Sonuç olarak, bu üç adım neredeyse aynı anda meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, araştırmalarda bu üç aşamayı ayırmak mümkün olamamaktadır (Li vd. 2004; Maraş 2013).

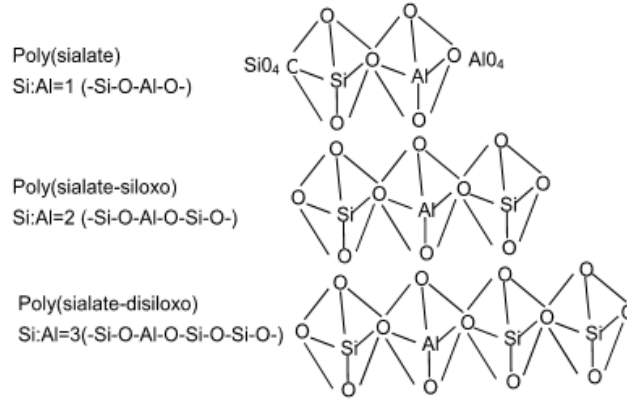
Geopolimerlerin oluşumunda görülen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir (Davidovits, 2002).



Görüldüğü üzere geopolimerlerin yapısında su yoktur. Geopolimerlerde karışım aşamasında kullanılan su işlenebilirlik amacıyla kullanılmakta, geopolimerin kür ve kuruması sırasında geopolimer içerisinde süresiz nano boşluklar bırakarak geopolimeri terk etmektedir. Bu durum geopolimere hafiflik, ısı yalıtımı ve yangın dayanımı gibi özellikler kazandırmaktadır (Rangan, 2008; Topçu ve Toprak 2009).

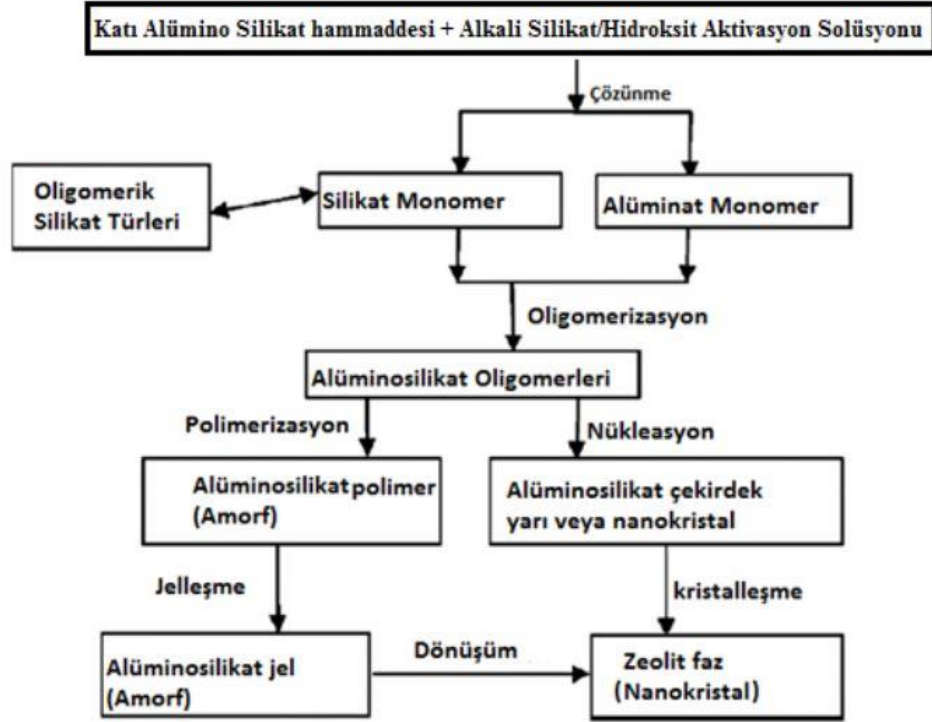
Geopolimerler alüminosilikat minerallerinin alkali aktivasyonundan amorf moleküllerin sentezlenmesiyle oluşurlar. Pozitif iyon olarak alkali metalin varlığı geopolimer yapısı için gereklidir. Çünkü alkali metal IV katlı koordinasyonda negatif yüklü alüminatı dengeler. Bu geopolimerlerin moleküler yapısı genellikle yüzük

veya zincir şekli alır ve amorf ile yarı kristal aralığında değişir. Büyük ölçüde kristal polimerlerde monomer zincirler, düzensiz sıra bırakmayacak şekilde sıralı satırlar boyunca uzarlar. Amorf polimerler, sıralanmayan düzensiz polimer zincirlerdir (Şekil 2.1). Geopolimerler düzenli, düzensiz polimer yapılara sahiptirler ve bu yüzden yarı kristaller olarak adlandırılırlar (McNulty, 2009; Maraş, 2013).



Şekil 2.1. Alümino silikat yapıları ile geopolimer türleri

Alkali aktive edilmiş bağlayıcıların oluşumu ve sertleşme reaksiyon mekanizması tam olarak anlaşılamamıştır, hammaddenin yanı sıra alkali aktivatör türüne bağlı olduğu düşünülmektedir. Glukhovsky vd. (1980)'e göre alkali aktivasyon mekanizması hammaddenin düşük kararlı yapısal bileşiklere ayrılmasını ve pıhtılaşma yapıları ile yoğunlaşmış yapıların oluşması arasındaki etkileşimi kapsayan art arda oluşan reaksiyonlardan meydana gelmektedir. İlk adım Si-O-Si ve Al-O-Si kovalent bağlarının kopmasından oluşur. Bu olay alkali solüsyonunun pH'ı yükseldiği zaman meydana gelir. Böylece bu gruplar kolloid fazına dönüşür. Sonrasında pıhtılaşmış yapının oluşumunu sağlayan etkileşimler yıkılmış ürünlerin tahribatıyla oluşur ve yoğunlaşmış üçüncü faz oluşur (Şekil 2.2) (Torgal vd. 2008; Kantarcı, 2013).



Şekil 2.2. Geopolimerizasyonun reaksiyon aşamaları (Provis J.L. vd. 2005)

2.2. Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

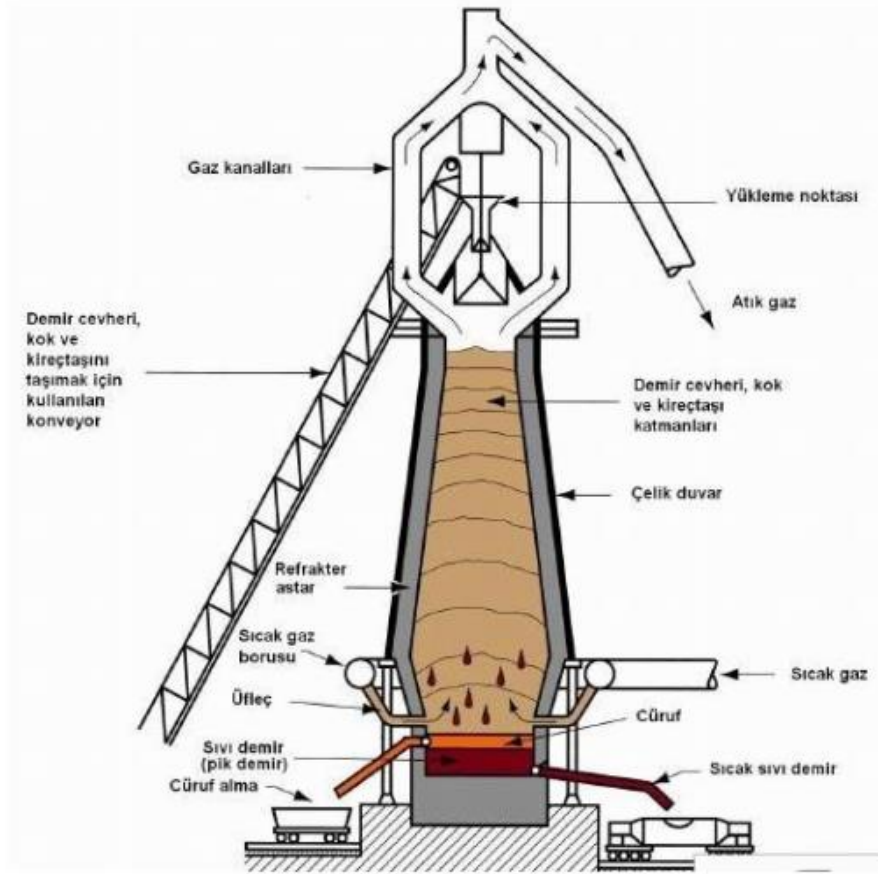
YFC'ler, yüksek fırınlarda demir çelik üretimi sırasında endüstriyel bir atık ürün olarak önemli miktarlarda açığa çıkmaktadır. Amorf bir yapıya sahip YFC'ler büyük miktarda SiO_2 ve Al_2O_3 içermesi sebebi ile puzolanik özellik göstermektedir (Erdoğan, 2003; Yakupoğlu 2010).

YFC demir üretimi esnasında ortaya çıkan bir artık üründür. Demir filizi gangi, kok ve kireçtaşının yanması neticesiyle oluşan atıklar YFC'yi meydana getirir. YFC yavaş soğutulduğunda kristal bir yapı kazanır. Bu haliyle bazalta benzer mekanik özelliklere sahiptir ve beton agregası olarak kullanılabilir. Hızlı soğutma uygulaması sonucunda camı yapıda cüruf elde edilir. Bu tür cüruflar granüle YFC olarak adlandırılırlar. YFC'nin hidrolik bağlayıcı özelliğini kazanabilmesi; cürufun inceliği, kimyasal kompozisyonu ve içerisindeki camı yapıların miktarlarına bağlıdır (Tokyay ve Erdoğan, 2002). YFC ince öğütülmüş olarak beton üretiminde kullanıldığında, betonun işlenebilirliğini artırmakta, su ihtiyacını ve terlemeyi azaltmaktadır (Neville, 2000). YFC'nin kimyasal bileşimi esas olarak kalsiyum oksit (CaO), silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşmaktadır. Ancak YFC'nin kimyasal bileşimi kadar kristal yapısı da önemlidir (Yalçın ve Gürü, 2006).

YFC'nin aktivasyonunda etkin olan temel faktörler kalsiyum içeriği, tane boyutu ve karakteristikleri ile camsı madde bileşimi ve oranıdır (Zivica, 2006). YFC'nin fırın çıkışında hızla soğutulması ve en az 2/3 oranında camsı faz içermesi gerekir. Ayrıca içindeki CaO, MgO ve SiO₂ miktarları toplamının en az 2/3 oranında ve (CaO + MgO)/SiO₂ oranının ise 1'den fazla olması istenmektedir (Collins ve Sanjayan, 1999a). YFC'nin çimento ve beton sektöründe çok çeşitli kullanım olanakları bulunmaktadır. YFC inşaat sektöründe beton üretimi esnasında çimento ile belirli oranlarda yer değiştirilerek kullanılmaktadır (Ulu, 2016).

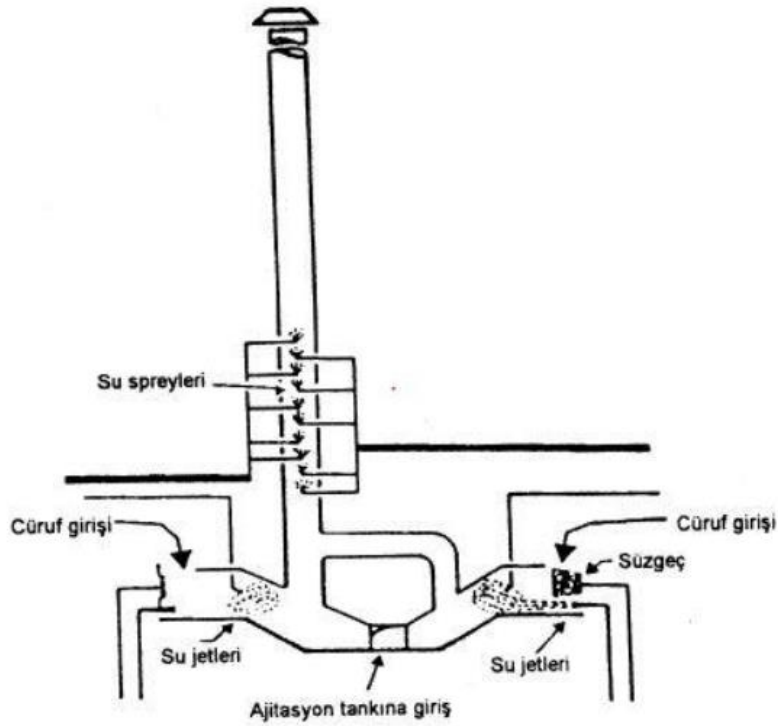
2.2.1. YFC üretimi

Demir elde edebilmek için demir cevherlerinin, yüksek fırın olarak adlandırılan fırınlarda çok yüksek sıcaklıklara kadar (yaklaşık 1600°C) ısıtılmaları, böylelikle oksijen ve yabancı maddelerden arındırılmaları gerekmektedir. Ayrıca kok kömürünün (karbonun) yakıt olarak kullanıldığı bu fırınlarda arıtma işlemine yardımcı olabilmesi için kalkertaşı da cevherle birlikte ısıtılmaktadır. Yüksek sıcaklığın etkisiyle, kok kömürünün karbonu demir oksitteki oksijen ile birleşerek karbonmonoksit ve karbondioksit gazlarını oluşturarak fırını terketmektedir. Geride eriyik durumda bulunan demir ve CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, MnO, S gibi yabancı maddeler topluluğu kalmaktadır. Demirin yoğunluğu, yabancı maddeler topluluğunun yoğunluğundan daha yüksek olduğundan, eriyik durumundaki demir, fırının en alt bölümünde, eriyik durumdaki diğer maddeler ise, demirin hemen üzerinde bulunmaktadır. Demir ve diğer malzeme topluluğu ayrı ayrı çıkışlardan dışarı çıkartılmakta, elde olunan yabancı maddeler topluluğuna YFC adı verilmektedir Şekil.2.3'te gösterilmiştir (Erdoğan, 2016).



Şekil 2.3.Yüksek fırın cürufu üretim şeması (Tokyay ve Erdoğan, 2002)

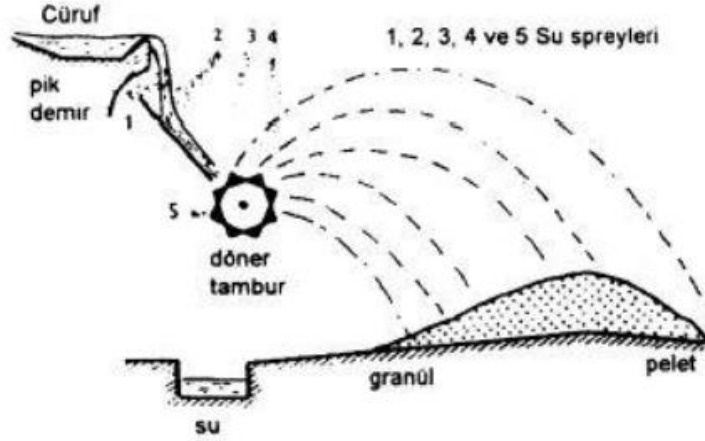
YFC'nin ani soğutulması için uygulanan iki metot vardır. Bunlar Granülasyon ve Peletleme metotlarıdır. Granülasyon metodunda YFC'nin soğutulması için çok miktarda su kullanımı gerekmektedir. Bu yöntem sonucunda elde edilen YFC amorf (camsı) yapıda, hidrolik özelliğe sahip granüle bir malzeme oluşur. Bu malzeme değirmenlerde öğütülerek “öğütülmüş yüksek fırın cürufu” elde edilir. 1 ton granüle YFC elde edebilmek için 10 ton suyun harcandığı bu yöntem verimli olsa da ekonomik olduğu söylenemez. Bunun yerine peletleme metodu tercih edilmektedir. Granülasyon yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.4'te gösterilmiştir (Tokyay ve Erdoğan, 2009; Özcan 2018).



Şekil 2.4. Granülasyon yönteminin şematik gösterimi (Tokyay ve Erdoğan, 2009)

Peletleme metodunda ise eriyik haldeki çürüf akış yolu üzerinde su spreyleri ile soğutulmakta ve bir tambur vasıtasıyla havaya fırlatılarak çabuk soğuması sağlanarak granülasyon sağlanmaktadır. Bu metotta 1 ton çürüf için harcanan su miktarı yaklaşık 1 m³ olmaktadır. Maliyetinin granülasyon metodundan 6 kat daha düşük olması bu yöntemin tercih edilmesini cazip kılmaktadır. Peletleme yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.5'te gösterilmiştir (Tokyay ve Erdoğan, 2009; Newman ve Choo,2003; Açıkgöz 2015; Özcan 2018).

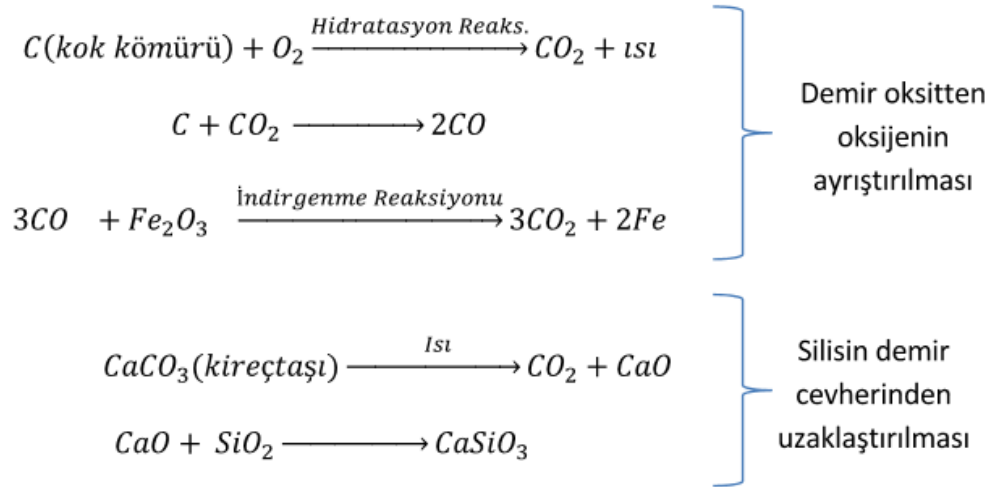
Peletleme metoduyla granüle hale gelen çürüflerin içinde bulunan sudan arındırılmakta ve bağlayıcı özellik gösterebilmesi için değirmenlerde çimento inceliğine gelinceye kadar öğütülmektedir. Bu öğütülmüş granüle YFC'ler alkali aktivatörlerle aktive edildiğinde hidrolik özelliğe sahip olmakta, bu da onların çürüflü çimento üretiminde ya da beton katkı maddesi olarak kullanılmalarını sağlamaktadır (İmbabi vd. 2012; Açıkgöz, 2015; Özcan 2018).



Şekil 2.5. Peletleme yönteminin şematik gösterimi (Tokyay ve Erdoğan, 2009).

2.2.3. YFC'nin kimyasal özellikleri

Yüksek fırınlarda pik demir elde etmek için aslanan demir cevherinden atık ve yabancı maddeler ile oksijeni ayırmaktır. Fırınlarda aşağıdaki reaksiyonlar oluşmaktadır (Engin, 2019).



Şekil 2.6. Fırında oluşan reaksiyonlar (Engin, 2019).

YFC, çimentoya kıyasla daha az CaO ve daha fazla SiO₂ içermektedir. Ayrıca Al₂O₃ ve SO₃ miktarları YFC'de daha yüksektir. YFC'nin yoğunluğunun çimentoya oranla daha düşük olduğu bilinmektedir. İncelik ve bileşenlerin oranı bağlayıcı malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkilediği gibi YFC de bulunan yüksek miktarlardaki SiO₂ içeriği çimentoya nazaran daha zor öğütülmesine sebep olmaktadır (Engin, 2019).

2.3. Elazığ Ferrookrom Cürufu (EFC)

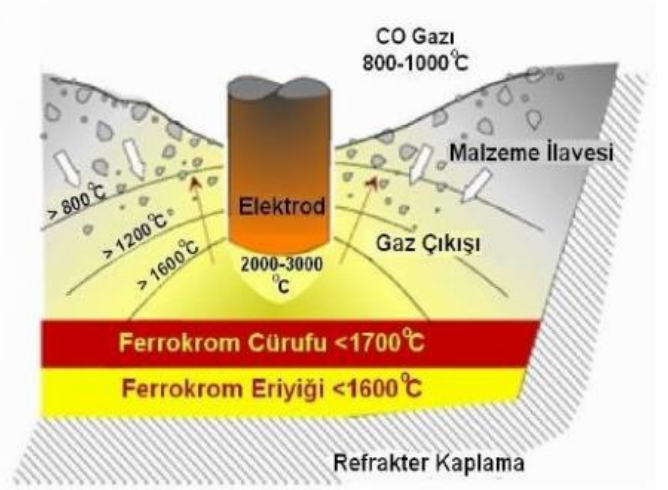
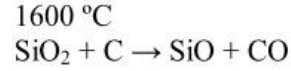
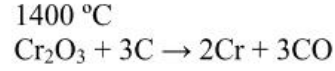
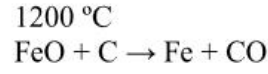
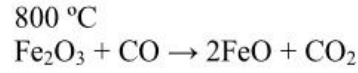
Dünyada ve ülkemizde, sürekli olarak endüstriyel kaynaklardan yüksek miktarda metal cürufu ve buna bağlı atıklar ortaya çıkmaktadır. Bu cürufların bir kısmı çeşitli şekillerde değerlendirilebilirken, bir kısmı depolama alanlarına gitmektedir. Bu depolanan atıkların içindeki ağır metaller ve diğer zararlı maddeler, önlem alınmasına rağmen zamanla yeraltı sularına sızabilmekte çevreye ve o çevrede yaşayan insanların sağlığına zarar verme riski taşımaktadır. Bu endüstriyel atıklardan biri de ferrookrom tesislerinin atık ürünü olan ferrookrom cüruftur (Erdoğan, 2019).

Ferrookrom, demir ve krom içeren kromit mineralinden elde edilen ve büyük çoğunluğu paslanmaz çelik imalatında kullanılan bir alaşımdır. 1 ton ferrookrom üretiminde ise yaklaşık olarak 1,5 ton cüruf ortaya çıktığı belirtilmektedir (Taşdemir, 2006). Ülkemizin değişik bölgelerinde krom yatakları olmakla birlikte, Antalya ve Elazığ illerinde iki büyük ferrookrom tesisi mevcuttur (Erdoğan, 2019).

2.3.1. Ferrookrom cürufunun elde edilmesi

Ferrookrom sıklıkla ısıya dirençli ve paslanmaz çelik üretiminde bir metal bileşiği olarak kullanılmaktadır. Silikoferrookrom ve ferrookrom cürufları, ferrookrom üretiminin yapıldığı tesislerde elektrik-ark fırınlarındaki üretim işlemi sonucu ortaya çıkan atık malzemelerdir. Bu iki atık malzemenin üretimi sırasında indirgenmeyen oksitler ile bir miktar silisyum oksit, metal yüzeyinde sıvı bir cüruf tabakası meydana getirir ve bu sıvı haldeki cüruf kalıplara dökülerek alınır (Yılmaz ve Süttaş, 2008).

Metalin bünyesindeki demir ve krom oksitleri metalürjik kok kömürü kullanılan elektrik ark fırınlarının içerisinde indirgenirken eş zamanlı olarak silikanın bir kısmı da indirgenmektedir. Bu şekilde üretilen metal “şarj kromu” olarak sınıflandırılmaktadır. Şarj kromu %53 Cr, %7 C ve %4-5 Si içermektedir (Niemelä ve Kauppi, 2007). Ferrookrom fırınlarındaki tipik indirgeme reaksiyonları Şekil 2.7.’de gösterilmiştir (Niemela ve Kauppi, 2007; Vapur vd. 2013; Özcan 2018).



Şekil 2.7. Ferrokrom fırınındaki tipik indirgeme reaksiyonları (Niemela ve Kauppi, 2007; Vapur vd. 2013).

Hurda metal ve kireçle doldurulan fırın içine fırın kapağında yer alan elektrotlar indirilir. Elektrotlardan geçen elektrik akımı sayesinde hurda metal ve elektrotlar arasında ark oluşarak hurda metalin ergimesi için gerekli yüksek ısı ortaya çıkar. Hurda metaldeki silisyum, karbon, manganez gibi elementleri oksitlemek için sisteme oksijen verilir. Oksit formundaki bu safsızlıklar kireçle birleşerek cürufu meydana getirir (Kaya, 2014).

Hurdanın eritilmesi ve çelik üretimi esnasında iki önemli atık oluşmaktadır. Bunlardan biri elektrik ark fırını tozları diğeri de cüruftur. Yaklaşık olarak, bir ton çelik üretiminde 14 kg elektrik ark fırını tozu ve 100 kg cüruf açığa çıkmaktadır (Barka, 2008).

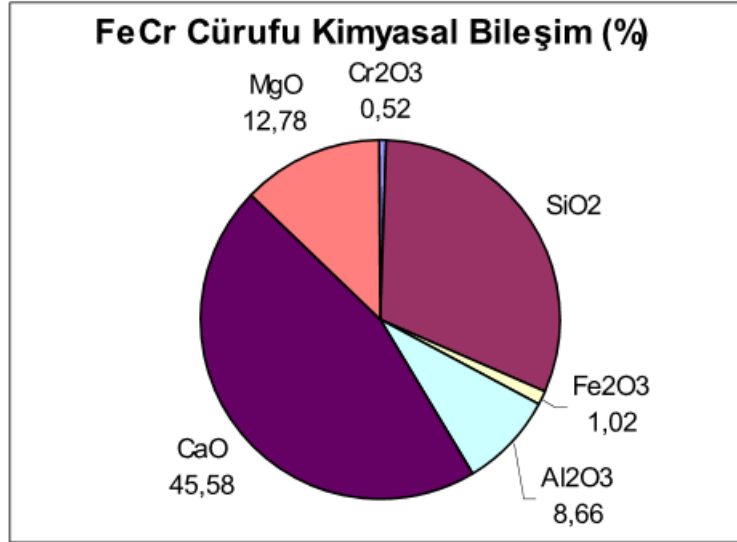
Elektrik ark fırın cürufu, çelik üretiminde yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Hurda ve cüruf yapıcılar (kireç, dolomitik kireç) şarj edilmekte ve ergitme işlemi gerçekleştirilmektedir. Elde edilen sıvı çelik doğrudan kullanım için yeterli kalitede olmadığından sıvı çelik potaya alınarak ilave işlemlere tabi tutulur. Oksidasyon işlemi ile istenmeyen elementler sıvı çelikten oksit formunda uzaklaştırılır. Bu elementler, karbon (CO gazı olarak), manganez, silisyum ve fosfordur. Bu elementlerle birlikte bir miktar da demir oksitlenir. Kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan bu oksitlerden sıvı halde olanlar, kireç ve dolomitik kirecin kalsinasyonu ile birleşerek ergimiş cürufu meydana getirir. Bu işlemlerin sonunda sıvı çelik bir potaya dökülürken, oluşan cüruf ise sıvı halde, yaklaşık olarak

1100–1500°C'de özel cüruf potalarına aktararak stok sahalarına taşınır ve soğumaya bırakılır. 1000 kg çelik üretiminden yaklaşık olarak 100-150 kg (%10-15) cüruf açığa çıkmaktadır (Kaya, 2014).

2.3.2. Ferrokrom cürufunun fiziksel ve kimyasal yapısı

Ferrokrom cürufu, krom ve demir oksit içeren kromitten elde edilmektedir. Kromit, genellikle fırınlarda toplanılabilen yığınlar halindeki ince yığıntı ya da topak topak cevherlerdir. Döküm fırınlarındaki ince malzemeler üretimi olumsuz etkiler ve üretim azalır. Fırınlardaki metal oksitlerin azaltılmasında farklı türdeki karbonlar kullanılır. Yüksek fırın koku bunlardan en önemlisidir. Hammaddelerin titiz kalite kontrolüyle döküm işleminde maksimum randıman ve düzenli kalite elde edilir. Cürufun doğru kompozisyonunu sağlamak için eritken malzeme olarak kuvarsit, boksit, dolomit, korundum, kireç ve olivin kullanılmaktadır. Döküm fırınlarından elde edilen döküm malzemeleri, ferrokrom alaşımı ve cürufudur. Modern işlem kontrolü ve iyi kalite ile en iyi cüruf kompozisyonu elde edilebilmektedir. En önemli faktörler sıcaklık ve cürufun kompozisyonu, viskozite ve elektrik iletkenliğidir. Cürufun ana bileşenleri SiO_2 , MgO ve Al_2O_3 'tir. Aynı zamanda krom- ve demir-oksit ve kalsiyum oksit içermektedir. Cürufun genel fazları cam, spinel ve fosferittir (Niemela ve Kauppi, 2007).

Ferrokrom cüruflarının kimyasal yapısı incelendiğinde dört ana elementin hakim olarak bulunduğu görülmektedir. Oksitler halinde bulunan bu magnezyum, silisyum, kalsiyum ve alüminyum elementlerinin cürufun yaklaşık olarak %95'ini oluşturduğu Şekil 2.8'de görülmektedir. Cüruf içerisinde organik madde bulunmazken bu elementlere ilaveten çok az miktarda demir ve krom da bulunmaktadır (Yılmaz ve Süttaş, 2008; Özcan 2018).



Şekil 2.8. Ferrokróm cürufunun kimyasal kompozisyonu (Yılmaz ve Sütüş, 2008).

Cürufların soğutulma biçimleri farklı olduğundan sahip oldukları özellikler de farklılık gösterir. Havada yavaş soğutulan cüruflar kristal bir yapıya sahip olurken bu halleriyle yüksek mekanik özellik göstererek çoğunlukla agrega olarak kullanılırlar. Hızlı olarak soğutulan cürufun ise akışkanlığındaki ani azalma kristal yapı oluşmasını engeller ve camsı yapıda katı bir madde elde edilir. Bu camsı madde kısmen hidrolik özelliğe sahiptir ve daha çok çimento ve beton üretiminde kullanılmaktadır (Stevenson, 1997; Proctor, 2000).

2.4. Betonda Donma-Çözülme Etkisi

Betonun kalıcılığını tehdit eden en önemli etkenlerden biri soğuk iklim koşullarında meydana gelen donma-çözülme olayıdır. Suya doygun haldeki sertleşmiş beton don etkisinde kalınca, beton içindeki kapiler boşluklardaki su donar ve genişir. Çözülme takip eden yeniden donma olayı sonunda bu genişleme miktarı ilerleyerek artış gösterir. Bu nedenle art arda meydana gelen donma-çözülme olaylarının etkisi, çözülme meydana gelmeden uzun süreli don etkisine nazaran çok daha kuvvetli olur. Bu durum bir önceki donma-çözülme periyodunda meydana gelmiş ince bir çatlağın, yeniden donma sırasında oluşan buzun basıncıyla genişleyip büyümesi ile açıklanabilir. Genişleme sonucu oluşan gerilmelerin mertebesinin betonun çekme dayanımını aşması halinde betonda kabuk atma, çatlama, ufalanma şeklinde bozulmalar görülür. Yollarda kullanılan buz çözücü tuzlar ise donatıyı paslandırmasının yanı sıra, oluşan hidrolik basınç nedeniyle özellikle sanat

yapılarındaki betonarme elemanlarında hasarın şiddetini arttıırırlar (Baradan vd. 2015).

Servis ömrü süresince yapılar çeşitli çevresel etkiler altında kalmaktadır. Yapının maruz kalacağı çevresel etki iyi belirlenmeli ve tasarımda dikkate alınmalıdır. Belirlenen çevresel etki altında yapı işlevini yerine getirmeye devam edebilmeli, yapıda kullanılan malzemelerin durabilitesi yeterli olmalı ve böylece yapının performansı belirli bir düzeyin altına düşmemelidir. Günümüzde, yapısal tasarımın malzeme dayanımlarına göre değil, durabilite kriterlerine göre yapılması giderek daha fazla kabul görmektedir (Sommerville, 2000). Beton servis ömrü boyunca çeşitli çevresel etkilerle hasara uğrayabilir, bu etkiler fiziksel, kimyasal, fiziko-kimyasal veya mekanik olabilir (ACI Commitee, 1992; Şengül vd. 2003). Şengül vd. (2003) tarafından bildirildiğine göre bu çevresel etkiler betonun performansının zamanla azalmasına, proje ömründen önce işlevini ve dayanımını tamamen yitirmesine yol açabilmektedir. Betonun tekrarlı donma-çözülme etkisinde kalması fiziksel etkilerden bir tanesidir. Donma-çözülme etkisinde bulunan bölgelerde yol ve köprü gibi yapılar için buz çözücü tuzların kullanılmasıyla birlikte klor etkisi de söz konusu olmaktadır. Kullanılan malzemeler, ortam koşulları, rutubet gibi etkenler donma-çözülme sonucu oluşan hasarı arttırabileceği Vanderhost ve Jansen (1990) tarafından tespit edilmiştir. Boşluklu ve heterojen bir iç yapıya sahip olan beton, çimento hamuru, agrega ve agrega-çimento hamuru temas yüzeyinden oluşan üç fazlı bir kompozit kabul edilebilir. Bu üç fazın her biri boşluk içermektedir. Betondaki boşluklar boyutlarına göre sınıflandırılır. Birbirlerine bağlı kılcal boşluklar çimento hamurunun geçirimsizlik özelliklerine ve donma-çözülme dayanımına etki eden temel etkenlerdir (Kroop ve Hilsdorf, 1995). Çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan ürünlerinin birim hacmin tamamını dolduramaması sonucu meydana gelen kılcal boşlukların boyutları 10 µm ile birkaç mikron arasında değişir. Bu boşlukların miktarı ve boyutları betonun su/bağlayıcı oranına ve çimentonun hidratasyon derecesine bağlıdır (Neville, 1997). Betonun boşluklarındaki buz oluşumu ile ilgili çeşitli teoriler ileri sürülmektedir (Pigeon ve Pleau, 1995). Donan suyun hacmi yaklaşık %9 artar. Kılcal boşluklarda bulunan suyun boşluk hacminin sadece bir bölümünü doldurması durumunda, donan suyun genişleyebileceği boş bir hacim olur. Betonun suya doygun halde olması durumunda ise tüm boşluk suyla dolu olduğu için, oluşan hacim artışı sonucu buz boşluk

çeperlerine basınç uygular. Sıcaklığın artıp buzun çözülmesiyle de çeperlere etkiyen bu basınç ortadan kalkar. Donma-çözülme çevrimlerinin şiddeti betonun bulunduğu ortama, oluşan sıcaklık farklarına, betonun nem durumuna, suyun donma hızı gibi etkenlere bağlı olarak değişir (Pigeon ve Pleau, 1995). Sürekli tekrarlanan donma-çözülme ile birlikte betonda hasar oluşmaya başlar. Betondaki hasar oluşumu betonun çatlaması veya yüzeyde oluşan soyulma ve dökülmeler olarak kendini gösterir. Betonun kesiti boyunca çatlaması durumu çok şiddetli ve uzun süreli donma-çözülme etkisinde olurken, yüzey hasarları çevremizde en çok karşılaşılan durumdur. Beton yollar, kaplamalar veya beton duvarlar büyük miktarlarda yüzey hasarına uğrayabilirler. Betonun donma-çözülme dayanımını ve yüzeylerde oluşabilecek soyulma, dökülme miktarlarını belirleyebilmek için değişik deney yöntemleri ve değerlendirme teknikleri vardır (Pigeon ve Pleau, 1995; Setzer, 1997). Beton taze halde iken don olayının gerçekleşmesi durumunda dayanım kayıpları olabilir. Gerçekte tam priz başlangıcında don olayı tehlikelidir, bu nedenle soğuk havalarda beton dökülürken gerekli önlemler alınmalıdır (ACI Commitee, 1997). Hava sürükleyici katkı kullanılarak betonun dona dayanıklılığı artırılabilir. Bu katkı maddeleriyle beton içinde homojen dağılmış, boyutları 10 mikrondan birkaç milimetreye ulaşabilen, birbirlerinden bağımsız küresel hava boşlukları oluşturulur (Pigeon ve Pleau, 1995). Bu boşluklar hem betonun kılcallık yoluyla su emmesini engeller, hem de kılcal boşluklarda su donduğu zaman buzun boşluk içine doğru oluşmasını sağlayarak donma etkisiyle kılcal boşluk çeperlerine basınç uygulanmasını önler (Neville, 1997; Pigeon ve Pleau, 1995; Şengül vd. 2003).

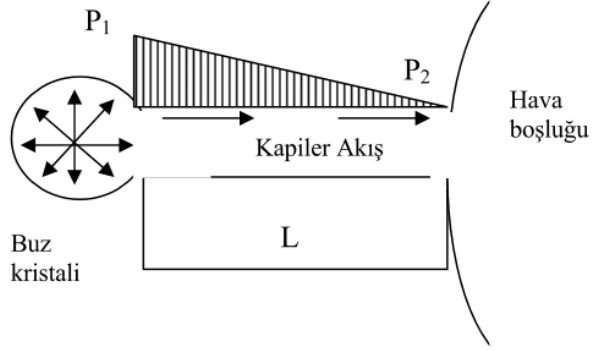
Beton yeterince soğuğa maruz kaldığında, kapiler boşluklarda bulunan su donmaktadır. Betonun içerisindeki suların tamamı, açıkta bulunan su gibi 0°C’de değil, daha düşük sıcaklıklarda donmaktadır, bunun sebebi de betonun içerisindeki sularda eriyik olarak yer alabilen çeşitli tuzların etkisidir. Ayrıca içinde suların bulunduğu boşluk çapı da donma sıcaklığına etki eden önemli bir faktör olmaktadır. Büyük kapiler boşluklarda bulunan su, 0°C veya yakın sıcaklıklarda donarken çok küçük kapiler boşluklarda -15°C ile -20°C sıcaklıklarında, jel boşluklarındaki sular ise bu boşlukların çok daha küçük olmasından dolayı -78°C mertebelerinde donmaktadır. Netice itibariyle betonun içerisindeki sular için belirlenebilecek tek bir donma noktası yoktur (Erdoğan, 2016).

2.4.4. Donma-çözölme mekanizmaları

Betonda meydana gelen donma-çözölme olayı çeşitli mekanizmalarla ve teorilerle açıklanmıştır. Bunların başlıcaları, kapiler boşluklarda donma sebebiyle hidrolik basıncın oluşması, donma olayı başladıktan sonra jel suyunun kapiler boşluklara yönelerek ilerlemesi, ısı etki gibi bölgesel genleşmelerin sebep olduğu farklı şekil değiştirmeler ve çözeltilerin kapiler boşluklardaki kısmen donmasından kaynaklanan osmotik basınçtır (Basheer vd. 2001; Şahin vd. 2003; Basheer and Cleland, 2006). Betonun doygunluk derecesi, porozitesi, permeabilitesi, maksimum agrega tane çapı, hamurun hava içeriği, ısı özellikler ve diğer çevresel etkiler bunları etkilemektedir (Boateng, 1992). Donma-çözölme mekanizmaları aşağıda açıklanmıştır (Karakoç, 2010).

2.4.4.1. Hidrolik basınç teorisi

Powers'ın (1953) çalışmalarında, çimento hamurundaki kapiler boşlukların içerisindeki su, soğuk hava şartlarında, buza dönüşebilmektedir. Su buz haline dönüştüğünde yaklaşık %9 mertebelerinde hacim genleşmesi meydana gelmektedir. Kapiler boşluklardaki su bir anda buz haline dönüşmemekte, boşluk içerisindeki suyun bir kısmının donması ve hacim genleşmesi meydana gelmesi nedeniyle boşluk içerisinde henüz donmamış olan su kapiler boşluk dışına çıkmaya zorlanmaktadır. Bu zorlanmanın yarattığı gerilmeler genellikle hidrolik basınç olarak tanımlanmaktadır (Fagerlund, 1997). Kapiler boşlukların dışına çıkmaya zorlanan henüz donmamış su, gidecek uygun bir yer bulamadığından, beton içerisinde çok büyük gerilmelere ve dolayısıyla da çatlamalara neden olabilmektedir. Donma neticesiyle meydana gelen hidrolik basınç etkisinin azaltılması, beton içerisindeki boşlukların miktarından ziyade, boşluklar arasındaki mesafenin yakınlığına bağlı olmaktadır (Erdoğan, 2003). Betonda hidrolik basınç mekanizması Şekil 2.9'da gösterilmiştir (Katsura ve Kamada, 1997).



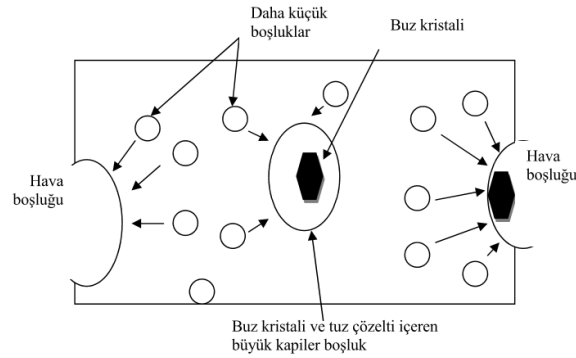
Şekil 2.9. Betonda hidrolik basınç mekanizması

Beton içindeki kapiler boşluklardaki su donma esnasında genişir. Eğer oluşan buz için gerekli olan hacim, betondaki mevcut boşluk hacminden büyük ise genişleme basıncından dolayı fazla su dışarıya çıkmak zorunda kalır. Hidrolik basıncın büyüklüğü birçok faktör (çimento hamurunun geçirgenliği, dolgunluk derecesine en yakın dolu olmayan boşluğun uzaklığı ve donma derecesi) tarafından etkilenir. Oluşan hidrolik basınç herhangi bir noktadaki betonun çekme dayanımından büyük olursa, lokal çatlakları oluşturacaktır. Islak bir ortamda donma-çözülme çevriminin tekrarlanmasında çatlaklara çözülme esnasında su girerek tekrar donduğunda ve bu donma-çözülme çevrimleri devam ettiğinde her çevrimde bozulma miktarı artacaktır (Detwiler vd. 1989).

2.4.4.2. Osmotik basınç teorisi

Osmotik basınç teorisi donma-çözülme ile ilgili en önemli teorilerden biridir. Osmotik basınç, donmuş saf suyun çözeltiden ayrılması sonucu oluşan çözünen madde konsantrasyonundaki artışlar nedeniyle meydana gelmektedir (Neville, 1995). Su donduğunda boşluğun konsantrasyonu artar ve diğer boşluklardan bu boşluklara su geçişi olur. Konsantrasyonu dengelemek için buzun olduğu büyük boşluklara doğru, küçük boşluklardan su geçişi olur. Bunun sonucunda büyük boşluklarda oluşan buzun kütlesi artar ve boşluk hacminin tamamını doldurduktan sonra betona basınç uygular ve neticede hamurda çatlaklar meydana gelir. Osmotik basınç teorisi mekanizması Şekil 2.10'da verilmiştir (Chan, 2006). Donma esnasında suyun çoğu donmanın gerçekleştiği bölgeye doğru yayılır ve genişlemeler soğuma hızının artması

ile azalır. Bu mekanizma hidrolik basınç teorisinin tersidir. Powers (1975) bu olguyu osmotik basınç teorisi olarak tanımlamıştır.



Şekil 2.10. Osmotik basınç teorisinin mekanizması

2.5. Literatür Özeti

Geopolimerlerin iki ana bileşeni vardır, bunlar kaynak malzemeler ve alkali sıvılardır. Alümino-silikat esaslı geopolimerler için kaynak malzemeleri alüminyum ve silikon yönünden zengin olmalıdır. Doğal mineraller (kaolin, kil vb.) veya yan ürün malzemeleri (uçucu kül, silis dumanı, cüruf vb.) geopolimerler için kaynak malzemeler olabilir. Geopolimerler için kaynak malzemenin seçilmesinde maliyet, uygunluk ve uygulama türleri gibi birçok parametre vardır. Alkali sıvılar genellikle potasyum veya sodyum bazlı çözünür sıvı metallere tercih edilir. Geopolimerizasyonda, sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit ve sodyum silikat veya potasyum silikat karışımları yaygın olarak sıvı alkali olarak kullanılır (Lloyd ve Rangan, 2010). Alkali aktif bağlayıcılar (yüksek fırın cürufu, uçucu kül vb.) kullanılarak hazırlanan geopolimer beton yeni bir malzemedir. Bu malzemelerin geopolimerlerde bağlayıcı madde olarak kullanılması, bu atıkların depolanması ve bertarafı ile ilişkili sorunları çözme potansiyeline sahiptir (Albitar vd. 2017). Alkali ile aktive olan bağlayıcılar %60 daha az enerji tüketir ve Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında 6 kat daha az CO₂ salınır (Sun ve Wu, 2013).

Ebrahimi vd. (2018) makro ve nano boyutlu katkı malzemelerinin betonun donma-çözülme performansı üzerine etkisi ile ilgili yapılan çalışmaları mekanizma açısından gözden geçirmişler ve donma-çözölmeye karşı katkı malzemeleri kullanılan betonların oluşturduğu mekanizmaları dörde ayırmışlardır.

(a) Hava kabarcıkları kullanarak betonda buz genişmesi için fazladan boşluk sağlamak: Ayrı bir mekanizma olarak hava boşluğu sistemi, buz büyümesi sırasında su basıncını düşürmek için su genişmesi veya hidrofobik tabakalar için ekstra hacim sağlar. Bununla birlikte, bu mekanizmanın ana problemi dayanımda azalmaya sebep olmasıdır.

(b) Pozolan ve dolgu malzemeleri kullanılarak beton gözenekliliğinin azaltılması: Bu mekanizma, kılcal gözeneklerin doldurulması yoluyla sıkıştırılmış ve su emmesi olmayan beton üretimini sağlar. Araştırmacılar, deneyleri bütünleştirmek ve tartışılan katkı maddeleri için optimum koşulları ve dozajları çıkarmak için daha fazla araştırma yapmalıdır. Ayrıca, don dayanıklılığı üzerindeki olumlu etkilerini belirlemek için nanopartiküller hakkında daha fazla araştırma yapılmalıdır.

(c) Mikrofiberler, nano tüpler vb. kullanılarak çatlak yayılımının önlenmesi: Bir ve iki boyutlu katkı maddeleri, donma-çözülme çatlaklarının köprülenerek yayılımını önler ve betonun dayanımını artırır. Bununla birlikte, çimento matrisinde homojen bir dağılım elde etmek asıl zorluktur. Uygun dağılımın nicelendirilmesi ve standardizasyonu araştırmacılar için bir sonraki konu olmalıdır.

(d) Hidrofobik maddeler kullanılarak su emiliminin azaltılması: Hidrofilik eğilimi hidrofobik eğilimle değiştirerek betonun geçirimsizliği ve su direncini artırarak, suyun daha az nüfuz etmesine ve dolayısıyla donma-çözülme döngüleri nedeniyle daha az hasara neden olmasına katkı sağlanır. Bununla birlikte, sert donma-çözülme koşulları altında hidrofobik beton üzerine sınırlı araştırma vardır ve bu mekanizmada daha fazla gelişmenin önünü açmak için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

Metakaolin betonun su emme karakteristikleri ile ilgili Jamal vd. (2003) tarafından yapılan çalışmada, yüksek pozolanik aktiviteye sahip olması sebebiyle çimento yerine kısmen metakaolin (MK) ikame etmenin betonun durabilite ve mekanik özelliklerini geliştirdiği gözlemlenmiştir. Çimento yerine MK eklenmesi betona kapiler yolla su girişini azaltarak negatif etkilerin oluşması ihtimalini en aza indirmektedir.

Soğuk iklimlerde, betonun fiziksel bozulma mekanizmasının iki temel unsuru vardır. Bunlar, nem varlığında donma-çözülme etkisine maruz kalan betonun bozulması ve beton yüzeyinde buz çözücü tuzların birikmesidir. Donma-çözülme hasarı, çimento hamurunun tekrarlanan donma-çözülme döngüleri altında genişlemesi nedeniyle betonun çatlaması ve parçalanması olarak tanımlanmaktadır.

Alkalinele aktifleşen alüminosilikat bağlayıcılarda donma-çözülme etkisinde küçük degradasyon meydana gelir (Mataalkah ve Soroushian, 2018).

Shahrajabian ve Behfarnia (2018) tarafından yapılan çalışmada, alkali ile aktive olan cüruf (AAS) betonunun çevre dostu ve ekonomik bir beton olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmanın amacı, nano-silika, nano-alümina ve nano-kil içeren nano-partiküllerin AAS betonunun donma ve çözülme döngülerine karşı direnci üzerindeki etkisini araştırmaktır. AAS betonunda cürufun aktivasyonu için sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Bu araştırmada, nano malzeme içermeyen bir kontrol karışımı ve ağırlıkça %1, %2 ve %3 nano-partikül içeren 3 karışım hazırlanmıştır. ASTM C666-B standardına göre örnekler donma çözme testi ile test edilmiştir. AAS beton örneklerinin basınç dayanımı ve kütle kaybı ölçülmüştür. Sonuç olarak, sırasıyla nano-silika ve nano-kil, donma ve çözülme döngülerine maruz kalan alkali-aktif cüruf betonunun mukavemetini ve dayanıklılığını arttırmada nano-alüminadan daha iyi performans gösterdiği ifade edilmiştir. %2 ve %3 nano-silika ilavesinin, %1 nano-silikaya göre, AAS betonunun özellikleri üzerinde daha küçük bir etkiye sahip oldukları görülmüştür.

Cai vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada, alkali-cüruf betonu (ASC), cüruf ve Na_2SiO_3 , NaOH aktivatörleri kullanılarak hazırlanmıştır. Aktivatör çözelti-cüruf oranı (A/S), cüruf içeriği ve kum oranının donma-çözülme direnci üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Donma-çözülme dayanımına en çok katkıyı sırasıyla A/S, cüruf içeriği ve kum oranının sağladığı görülmüştür. A/S ve cüruf içeriğinin etkileşimi ve hava boşluklu yapının en önemli faktörler olduğu tespit edilmiş, daha küçük hava kabarcığı boşluk katsayısının ve daha büyük spesifik yüzey alanının donma-çözülme direncine daha iyi katkı gösterme eğiliminde olduğunu belirtmişlerdir.

Topçu vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada ağırlıkça belirli oranlarda kullanılan alkali oksitlerin taban külleri (CBA) ile üretilmiş geopolimer çimentoların basınç dayanımı, mikroyapısı ve durabilitesi üzerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla numuneler yüksek sıcaklık ve donma-çözülme etkilerine maruz bırakılmıştır. Elde edilen numunelerden en yüksek basınç dayanımı 25.83 MPa ile ağırlıkça %12 Na_2O ve %8 SiO_2 kullanılan numunelerde gözlenmiştir. Kompakt bir mikro yapı için optimum oranların 3.5 ile 4 arasında Si/Al ve 0.5'e yakın Si/Na değerleri olduğu tespit edilmiştir. Geopolimer numunelerde 30 donma-çözülme çevrimi sonrası

dayanım kaybı yalnızca %6.77 civarında kalmış ve SiO_2/CBA oranı arttıkça daha yüksek donma-çözülme dayanımı elde edildiği gözlemlenmiştir.

Luukkonen vd. (2018) yaptıkları çalışmada hızlı çözünen katı sentetik sodyum metasilikatın, bir kısım alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harcının hazırlanmasında pirinç kabuğu külünden veya mikrosilisten türetilmiş yavaş çözünen silika kombinasyonu ile değiştirilip değiştirilemeyeceğini incelemişlerdir. Bu değişim karbon ayak izine ve bağlayıcı maliyetlerine olumlu yönde katkı sunduğu görülmüştür. Sonuçlar silika mevcudiyetinin zaman veya karışım kompozisyonunun bir fonksiyonu olarak basınç dayanımı gelişimini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Hızlı çözünen silika ile en yüksek 28 gün basınç dayanımı 107MPa olarak elde edilmiştir. Ayrıca donma-çözülme etkisine maruz harçların 120 çevrim sonunda da iyi durabilite özellikleri gösterdiği görülmüştür.

Sun ve Wu (2013) yaptıkları çalışmada uçucu kül bazlı inorganik harçların donma-çözülme dayanımlarını incelemişlerdir. Uçucu kül (FA), silis dumanı, metakaolin ve sodyum hidroksit kullanılarak çeşitli kompozisyonlarda elde edilen numuneler donma-çözülme dirençlerini belirlemek için testlere tabi tutulmuştur. Numunelerin 90, 210 ve 300 çevrim suda donma-çözülme etkisine maruz bırakılarak donma-çözölmeye karşı dayanıklılıkları normal Portland çimentosu (OPC) harçlarının sonuçlarıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Kütle, dinamik modül, dayanım ve çözeltilerin pH değerleri arasındaki değişiklikler düzenli zaman aralıklarında izlenmiştir. Tüm FA numuneleri kütle, dinamik modül ve zamanla basınç dayanımında sürekli artışlar göstermiştir. Suda donma-çözülme etkisine maruz bırakılmış, uçucu kül harçlarının portland çimentolara oranla donma çözülmeye çok daha dayanıklı olduğu sonucuna varılmıştır.

Fu vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada alkali ile aktive olan cüruf betonu (ASC), cüruf ve Na_2SiO_3 , NaOH aktivatörleri kullanılarak hazırlanmıştır. Donma-çözülme dayanımı, mikroyapı, performans mekanizması, iç donma-çözülme hasarı dağılımı ve ASC mekanik modelleri donma-çözülme döngüsü, SEM ve EDS testleri ile incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, ASC'nin 300 çevrime kadar mükemmel donma-çözülme direncine sahip olduğunu göstermiştir. ASC'nin hidrasyon ürünleri çoğunlukla düşük Ca/Si oranlı, alkalın alüminosilikatlı ve zeolit mineralli C-S-H(I) olup, Ca(OH)_2 içermemektedir, bu yüzden yapı bütünlüğü daha iyi olduğundan, yüksek basınç dayanımı (90 MPa) ve yüksek donma-çözülme dayanıklılığına sahip

olduğu görülmüştür. ASC donma-çözülme hasarı, bağıl dinamik elastisite modülü kullanılarak tespit edilmiştir.

Slavik vd. (2008) yaptıkları çalışmada, taban külünün (FBC-BA) geopolimerizasyonda kaolinitik hammadde yerine kısmi veya tam bir ikame olarak termal aktivasyon olmadan kullanılmasının mümkün olduğunu göstermiştir. FBC-BA'dan hazırlanan test numunelerinin, 90 günlük basınç dayanımları yaklaşık 50MPa olduğu görülmüştür. 50 donma-çözülme döngüsünden sonra, test numunelerinin basınç dayanımı, referans numunelerin basınç dayanımının %80'inin altına düşmemiştir.

Ekinci vd, (2019) tarafından yapılan çalışmada, %1, 2, 3 nano-silika (NS), %1, 3, 5 mikro-silika (MS) ve %5, 10, 15 Stiren-Butadien Lateks (SBL) ilavesi ile volkanik tüf esaslı geopolimer betonun (GPC) geliştirilmesi amaçlanmıştır. GPC örnekleri iki farklı aktivasyon metodu ($\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{NaOH}$ ve sadece NaOH) ile üretilmiştir. Volkanik tüf bazlı GPC numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı, donma-çözülme (FT) direnci, mikroyapı, su emme, yoğunluk, kütle yoğunluğu ve görünür porozite değerleri incelenmiştir. Sonuçlar, NaOH ile aktive edilmiş numunelerin basınç dayanımının, $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{NaOH}$ ile aktive edilenlere nazaran çok daha yüksek olduğunu göstermiştir. Her iki aktivasyon yönteminde de optimum NS ve SBL oranları sırasıyla %2 ve %5 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, optimum MS oranı, $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{NaOH}$ ve sadece NaOH için sırasıyla %5 ve %3 olarak belirlenmiştir. Numuneler 300 donma-çözülme çevrimine maruz bırakılmıştır. $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{NaOH}$ ile aktive edilmiş numunelerin donma-çözülme etkilerine yalnızca NaOH kullanılan numunelere oranla daha iyi dayanım gösterdiği tespit edilmiştir.

Temuujin vd. (2014) yaptıkları çalışmada Ulan Batur'daki termal güç istasyonunda iki ayrı kazanda birbirinden ayrı kullanılan ve radyoaktif minerallere yakınlığıyla bilinen Baganuur ve Shivee Ovoo kömür yataklarından elde edilen kömürlerden meydana gelen bu iki uçucu külün geopolimer beton yapımında kullanılabilirliğini ve durabilitesini araştırmışlardır. Geopolimer numuneleri sodyum hidroksit çözeltisi veya sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri karışımları ile aktive etmiş ve 70°C'de 22 saat kür uygulamışlardır. Aktivatör olarak yalnızca 8M NaOH çözeltisi kullanımının priz süresini 10 saate kadar uzatarak daha kullanışlı hale getirdiği tespit edilmiş ve bu karışım ile 7 günlük basınç dayanımlarının da Baganuur külünde 32 MPa ve Shivee Ovoo külünde 23 MPa değerleri ile iyi sonuç

verdiği görülmüştür. Bu geopolimer hamurlarına belirli oranlarda dere agregası (1-5mm) eklenerek üretilen numunelerde 26MPa'ya kadar basınç dayanımları elde edilmiştir. Donma-çözülme deneyine (Mongolian Standard MNS 1918, standardına göre) tabi olacak numuneler 70 mm küp kalıplar halinde üretilmiş, kür işleminden sonra 28 günü ortam sıcaklığında tamamladıktan sonra 6 saat ortam sıcaklığındaki suya bırakılmış ardından statik soğutma odasında çözülmeden önce en az 6 saat -20 ila -22°C'lerde donma etkisine ve yine donma işleminden önce en az 6 saat suda çözülme etkilerine tekrarlı olarak 150 çevrimi bulana dek maruz bırakılmıştır. Shivee Ovoo külündeki kireç, anhidrit ve amorf kalsiyum gibi kristal kalsiyum bileşenlerinin donma-çözülme direncini olumsuz yönde etkilediği, buna karşılık, kristalin bileşenler formunda daha az kalsiyum içeren Baganuur külü ile üretilen geopolimer betonların daha yüksek dayanıklılığa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Üretilen geopolimer betonlarda agrega olarak dere agregası kullanımının betonların radyoaktivite oranlarını yapılarda kullanım açısından uygun seviyelere düşürdüğü tespit edilmiştir.

Pilehvar vd. (2019) yaptıkları çalışmada don koşullarının, iki farklı mikro-kapsüllenmiş faz değişim malzemesi (MPCM) içeren geopolimer betonun (GPC) ve Portland çimentolu betonun (PCC) fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Mikroyapısal çalışmaların donma-çözülme kaynaklı beton bozulmalarının hamur/agrega ve hamur/MPCM arasındaki zayıf ara yüzey geçiş bölgelerinde görünen mikro çatlaklara katkıda bulunabileceğini ortaya koymuştur. MPCM ilavesi, daha güçlü bir düşüşün gözlemlendiği MPCM içermeyen numunelerin aksine, basınç dayanımında küçük azalmayla donma-çözülme döngülerine karşı mükemmel bir direnç sağlamıştır.

Zu vd. (2019) yaptıkları çalışmada Grade III uçucu kül partiküllerinin yüzeyi, 960 °C'de 2 saat boyunca alçı ve mineralleştirici madde (susuz kalsiyum klorür) ilave edilerek modifiye edilmiş, bu uçucu külün mineral faz oluşumu; yapısı ve kimyasal bileşimleri XRD, FESEM ve EDS ile analiz edilmiş; yüzey modifiyeli uçucu külün cüruf esaslı geopolimerin basınç dayanımı ve donma dayanımı üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Sonuçlar, β -2CaO.SiO₂ (β -C₂S) ve 3CaO.SiO₂ (C₃S) fazlarının, yüzey modifikasyonundan sonra uçucu kül parçacıklarının yüzeyinde oluştuğunu göstermiştir. Cüruf bazlı geopolimer içine modifiye edilmiş uçucu kül eklenirken, aktif maddelerin (β -C₂S ve C₃S) doldurma etkisi ve işlevleri nedeniyle, dayanım ve

donmaya karşı direncin, orijinal uçucu kül eklenen geopolimerinkine kıyasla belirgin şekilde iyileştiği gözlemlenmiştir.

Zhao vd. (2019) yaptıkları çalışmada kırmızı çamur bulamacının F sınıfı uçucu kül (RMSFFA) ile karışımından sentezlenen geopolimerlerin donma-çözülme (F-T) dayanıklılığı, kür koşullarının (yani kür süresi ve sıcaklığının) etkisine önem verilerek incelenmiştir. F-T dayanıklılığı, 50F-T döngüsüne tabi tutulduktan sonra RMSFFA geopolimer numunelerinin dayanıklılığı sürdürülebilir mekanik dayanımlar temelinde değerlendirilmiştir. Hem mekanik mukavemet hem de mikroyapısal karakterizasyonun sonuçları, kür koşullarının, RMSFFA geopolimer numunelerinin F-T direncini, dayanım kazanımına katkısı nedeniyle etkilediğini göstermiştir. 50 °C'de 14 gün kür uygulanmış RMSFFA numuneleri F-T işleminin erken safhasında daha fazla geopolimerizasyon gerçekleştirirken F-T döngülerinin ilerleyen safhalarında geopolimer jelin kısmi çözünmesiyle karşılaşmışlardır. 50 °C'de 28 günlük kürlenmiş numuneler için ise F-T sırasında geopolimer jelin yalnızca kısmi çözünmesinin gerçekleşmesi söz konusudur, çünkü dayanım kazanımının bu koşullardan önce tamamlanması beklenmektedir.

Huseien vd. (2019) yaptıkları çalışmada, beton için çeşitli zararlı ortamlara maruz kalan, yüksek fırın cürufu (GBFS) yerine uçucu kül (FA) katılması ile elde edilen atık seramik karo tozu (WCP) esaslı alkali aktif harçların (AAM'ler) sürdürülebilirliği üzerine araştırma yapmışlardır. Bağlayıcılar, WCP içeriğinin tüm alkali ile aktive edilmiş harçlarda % 50'de tutulması ve GBFS'nin yerine %10, % 20, % 30 ve %40 oranlarında FA ile yer değiştirilmesiyle hazırlanmıştır. Numunelerin yüksek sıcaklık etkisi, sülfat ve asit saldırısı, rötre büzülmesi, donma-çözülme ve ıslak-kuru çevrimleri ve ayrıca su geçirgenliği gibi dayanıklılık özellikleri değerlendirilmiştir. Bulgular, AAM'lerin FA içeriğinin arttırılmasının donma-çözölmeye karşı direncinin arttırdığını ve daha iyi dayanıklılık gösterdiğini ortaya koymuştur.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Elazığ ferrokrom cürufu ve özellikleri

Elazığ ferrokom tesislerinden temin edilen EFC'lerin aktivasyon işleminin gerçekleştirilmesi ve bağlayıcılık özelliği için öğütülmesi gerekmektedir. EFC'ler Şekil 3.1'deki değirmen kullanılarak öğütülmüştür. 12 saat süresince öğütülen EFC 45 μm 'lik elek ile elenmiş ve geopolimer beton karışımında elekten geçen bu ince malzeme kullanılmıştır. EFC'nin özgül ağırlığı 2.86 g/cm^3 'tür. EFC'nin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1'de verilmiştir. EFC'nin doğal, öğütülmüş ve elenmiş hali Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Değirmen



Şekil 3.2. Doğal, öğütülmüş ve elenmiş EFC

3.1.2. 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. Malzemenin inceliği mevcut haliyle betonda kullanılmaya uygun olduğundan temin edildiği haliyle kullanılmıştır. YFC'lerin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. EFC ve YFC'nin kimyasal bileşimleri

Bileşim (%)	EFC	YFC
SiO ₂	33.80	32.47
Al ₂ O ₃	25.48	9.94
Fe ₂ O ₃	0.61	1.25
CaO	1.10	32.45
MgO	35.88	9.31
Cr ₂ O ₃	2.12	-
SO ₃	-	0.82
S ⁻²	-	0.33
Na ₂ O	-	0.31
K ₂ O	-	0.85
TiO ₂	-	1.16
Mn ₂ O ₃	-	3.51
Cl ⁻	-	0.015

3.1.3. Aktivatörler

Bu çalışmada üretilen geopolimer beton numunelerinde sodyum hidroksit ve sodyum metasilikat alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Geopolimer beton karışımında kullanılan sodyum hidroksit çözeltisi musluk suyu kullanılarak 10M olarak hazırlanmıştır. Kullanılan aktivatörlerin kimyasal özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3. 1. Sodyum hidroksit ve sodyum metasilikatın kimyasal özellikleri

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

3.1.4. Agrega

Üretilen geopolimer beton numuneleri için ince agrega olarak dere kumu, iri agrega olarak dere agregası kullanılmıştır (Şekil 3.3). 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. 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 3.3. Kullanılan agrega örnekleri

3.1.5. Aletler

3.1.5.1. Elekler

Geopolimer beton karışımında kullanılacak agregayı gerekli tane boyutlarına ayırtırmak için TS ISO 3310-2 (2015)'ye uygun olan Şekil 3.4'deki toplama kabı, 4 mm ve 8 mm göz açıklıklı kare delikli tel elekler kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Elekler

3.1.5.2. Beton karışım mikseri

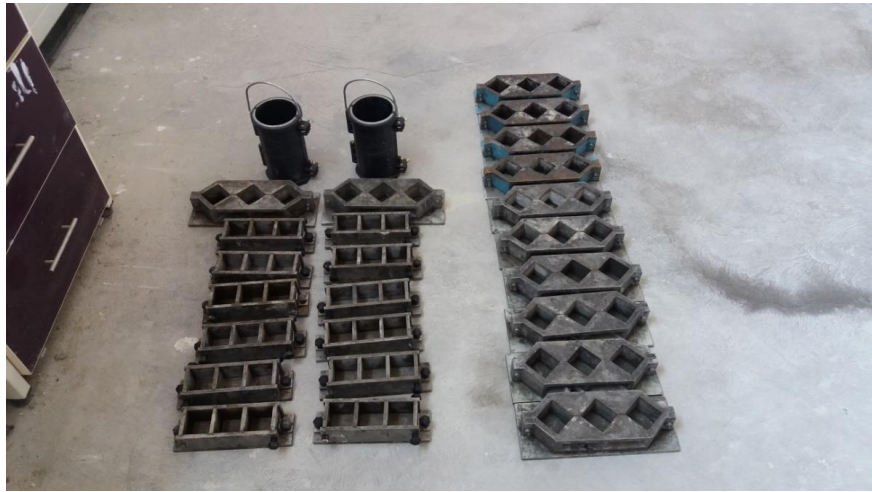
Geopolimer beton üretimi için 5 litre kapasiteli düşük ve yüksek hızda karışım özelliğine sahip Şekil 3.5'deki Arma Test markalı laboratuvar tipi beton karışım mikseri kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Beton karışım mikseri

3.1.5.3. Çelik kalıplar

Hazırlanan geopolimer beton karışımları, Şekil 3.6’da görülen küp (50x50x50 mm) boyutlara sahip çelik kalıplara yerleştirilmiştir.



Şekil 3.6. Çelik kalıplar

3.1.5.4. Etüv

Agreganın özgül ağırlık ve su emme oranı tayini deneylerinde ve geopolimer beton numunelerin kür aşamasında Şekil 3.7’deki Mikrotest marka dijital termostatlı etüv kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Etüv

3.1.5.5. Basınç dayanım cihazı

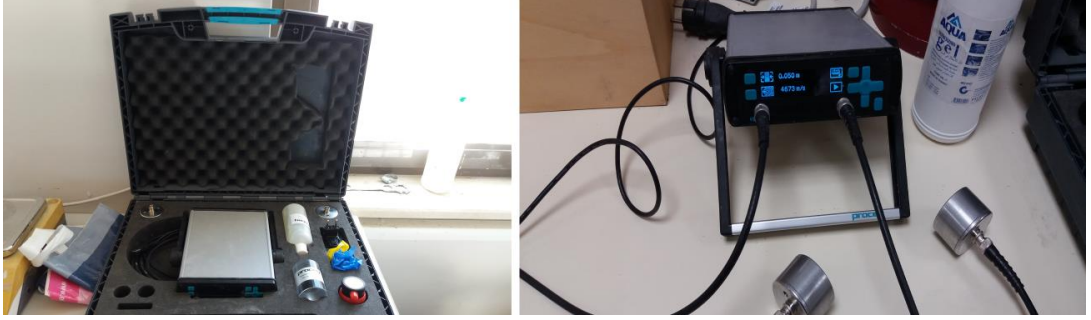
Numunelerin basınç dayanımlarının tespitinde Şekil 3.8'deki ELE marka 3000 kN yükleme kapasitesine sahip otomatik tek eksenli basınç dayanım test cihazı kullanılmıştır. Numune boyutları 50x50x50 mm olduğundan yükleme başlıkları arasına 50x50 mm yükleme başlığına sahip aparat yerleştirilmiştir.



Şekil 3.8. Basınç dayanımı test cihazı

3.1.5.6. Ultrasonik ses hızı ölçüm cihazı

Numunelerin UPV ölçümleri için Şekil 3.9'daki Proceq marka UPV cihazı kullanılmıştır. Numunelerin ölçüm yapılacak yüzeylerine ultrason jeli sürülmüştür.



Şekil 3.9. UPV ölçüm cihazı

3.1.5.8. Donma çözülme cihazı

ASTM C666 standardına uygun olarak otomatik donma-çözülme çevrimi yapabilen bir cihaz kullanılmıştır. Numuneler donma-çözülme cihazına yerleştirildikten sonra istenen sıcaklık değeri, bu sıcaklıkta kalma süresi ve çevrim sayısı ayarlanabilmektedir.

Şekil 3.11'de görülen cihaz temel olarak numune haznesi, su tankı, elektronik devre bölümü ve sıcaklık ayarlayıcı motor bölümü olmak üzere dört ana kısımdan oluşmaktadır. Ayrıca numunelerin sıcaklığı bilgisayar ortamında kontrol edilebilmektedir.



Şekil 3.10. Donma Çözülme Cihazı

3.1.5.9. SEM cihazı

Geopolimer beton numunelerin içyapı analizleri için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Analiz için Şekil 3.13'deki LEO EVO 40 isimli SEM cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.11. SEM cihazı

3.1.5.10. Diğer malzemeler

Geopolimer beton numunelerin kalıptan çıkarken hasar almaması ve daha kolay çıkarılabilmesi için kalıpların döküm yapılan yüzeyleri döküm yapılmadan

önce ince motor yağı ile yağlanmıştır. UPV ölçümü için numunelerin ölçüm yapılan yüzeylerine ölçüm esnasında ultrason jeli sürülmüştür. Donma çözülme makinasında suyun içinden çıkarılan numunelerin durulanması için kağıt havlu kullanılmıştır.

3.2. Yöntem

Bu bölümde geopolimer beton karışım oranlarının belirlenmesi, karışımların bu oranlara göre hazırlanması, kalıplara yerleştirilmesi ve kür edilmesi belirtilmiştir. Donma çözülmenin geopolimer beton numunelerine etkisini incelemek için yapılan ölçümler verilmiştir.

3.2.1. Agregada deneylerinde uygulanan yöntemler

Temin edilen dere agregaları musluk suyu ile yıkanıp laboratuvar ortamında bir gün bekletildikten sonra kullanılacağı güne kadar saklanmıştır. Geopolimer beton üretiminde kullanılmak üzere temin edilen dere agregasının özelliklerini belirleyebilmek amacıyla numune alımında TS EN 932-2 (1999)'de belirtilen çeyrekleme metodu kullanılmıştır. Dere agregasının tane büyüklüğü dağılımı TS EN 933-1 (2015)'e göre belirlenmiştir. Geopolimer beton karışımlarında en büyük agrega tane boyutu 8 mm olarak seçilmiştir. Agregaların tane dağılımının belirlenmesinde en büyük tane çapına göre TS 706 EN 12620+A1 (2009)'de belirtilen sınır değerler dikkate alınmıştır. Bu bağlamda tane sınıflarının oranları hacimce, 0-4 mm için %70, 4-8 mm için ise %30 olarak belirlenmiştir. Agreganın özgül ağırlık ve su emme oranı tayini TS 3526 (1980)'ya göre yapılmıştır. Agregalara uygulanacak deneyler üçer defa yapıp, bu sonuçların aritmetik ortalaması alınarak deney sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

3.2.2. Geopolimer beton karışım seçeneklerinin belirlenmesi

Geopolimer beton karışımları için bağlayıcı dozajı 400 kg/m³ olarak seçilmiştir. Geopolimer beton üretiminde bağlayıcı malzeme olarak EFC ve YFC kullanılmıştır. EFC yerine ağırlıkça %0, %25, %50, %75 ve %100 oranında YFC kullanılarak 5 grup geopolimer beton karışımı üretilmiş ve Çizelge 3.3'te geopolimer beton karışımı kodları verilmiştir. Yapılan denemeler sonucu optimum silis modülü 1.5, s/b oranı 0.43, NaOH çözeltisinin molaritesi 10M ve ağırlıkça sodyum oksit

içeriği %10 olarak belirlenmiştir. Bu değerlere göre aktivatör miktarı ve hacmi hesaplanmıştır. Bağlayıcı malzemelerin ve aktivatörlerin hacimlerinin 1 m³'ten çıkarılması ile toplam agrega hacmi elde edilmiştir. Belirlenen geopolimer beton karışım miktarları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Geopolimer beton kodları

Geopolimer beton kodu	Ağırlıkça bağlayıcı oranı (%)	
	EFC	YFC
E0	0	100
E25	25	75
E50	50	50
E75	75	25
E100	100	0

Çizelge 3.4. Karışımında kullanılan malzeme miktarları (1 m³ geopolimer beton için)

Karışımlar		E0	E25	E50	E75	E100
EFC (kg)		-	100	200	300	400
YFC (kg)		400	300	200	100	-
Na ₂ SiO ₃ (kg)		218.18	218.18	218.18	218.18	218.18
NaOH çözeltisi (kg)		46.48	46.48	46.48	46.48	46.48
Agrega (kg)	0-4 mm	1111.07	1111.07	1111.07	1111.07	1111.07
	4-8 mm	507.02	507.02	507.02	507.02	507.02

3.2.3. Geopolimer beton üretimi, numunelerin yerine konması ve bakımı

Geopolimer beton üretiminde kullanılacak 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 şekilde 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 3.12). Etüvde 24 saat bekleyen ve ardından kalıplardan çıkartılan numuneler kür havuzunda 27 gün boyunca 23±1°C sıcaklıkta kür edilmiştir. Üretilen geopolimer beton numunelerinden bir kısmı Şekil 3.13'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Kalıpların etüve konması



Şekil 3.13. Geopolimer beton numuneleri

3.2.4. Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler

Bu çalışma kapsamında üretilen geopolimer beton numuneleri 28 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra ve donma çözülme deneyi süresince belirli

periyotlarda numunelerin basınç dayanımları, UPV'leri, ağırlık değişimleri belirlenmiş ve görsel değişimleri ve içyapıları incelenmiştir. Bu ölçüm değerleri, aynı yaştaki suda bekletilen kontrol numunelerinin ölçüm değerleriyle karşılaştırılmıştır.

3.2.4.1. Basınç dayanımı

Geopolimer beton numunelerin basınç dayanımının belirlenmesi için ASTM C39/C39M test metodu kullanılmıştır. Geopolimer beton numuneleri 5 grup olarak üretilip, hazırlanan karışımlar kalıplara yerleştirilip bir gün etüvde bekletildikten sonra kalıptan çıkartılıp deney gününe kadar 23 ± 1 °C suda kür edilmiştir. Donma çözölmeye maruz bırakılan numunelerin 50, 100, 150, 200, 250 ve 300 çevrim sonundaki basınç dayanımları belirlenmiş ve aynı sürede suda bekletilen kontrol numunelerin basınç dayanımlarıyla karşılaştırılmıştır. Geopolimer beton numuneleri basınç dayanım test cihazına, numunelere uygulanacak yükleme yönü numunelerin kalıp içinde kalan yüzeylerine 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 3.1'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.

$$F_c = P/A_c \quad (3.1)$$

F_c : Basınç dayanımı, MPa

P: Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N.

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

3.2.4.2. 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 kalitesinin düşük olduğu kabul edilmektedir (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 aparatı ile cihaz kalibre edilmektedir. Ölçüm için numuneler cihazdaki su dolu kaplardan çıkarıldıktan sonra kağıt havlu ile yüzeyleri kurulanmış, kurulan numunelerin ölçüm yapılacak yüzeylerine bir miktar ultrason jeli sürüldükten sonra alıcı ve gönderici uçlar ölçüm yüzeylerine tutularak ölçüm yapılmaktadır. Her bir numune için 3 kez UPV ölçümü yapıp bu sonuçların ortalaması alınmıştır. Numunelerin UPV ölçüm değerleri Denklem 3.2 yardımıyla belirlenmiştir.

$$V = L/T \quad (3.2.)$$

V: Dalga hızı, (m/s).

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

T: Geçiş süresi, (s).

3.2.4.3. Dinamik elastisite modülü

Betonda donma-çözülme etkisinden kaynaklanan hasar bağıl dinamik elastisite modülü (BDEM)'ndeki azalma ile tespit edilebilir (Jacobsen et al. 1995; Sabir 1997; Salem and Burdette 1998; Salem et al. 2003; Soroushian and Elzafraney 2004).

Numunelerin dinamik elastisite modülleri her numune üzerinde ölçülen UPV değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. ASTM C666 standardında, betonun donma-çözülme dayanıklılığının BDEM'ne dayalı bir formül kullanarak ölçülebileceği belirtilmiştir. Bu formül aşağıda verilmiştir.

$$P_c = (n_1^2/n^2) \times 100 \quad (3.3)$$

Burada;

P_c = c çevrim sonra BDEM'nün yüzde değeri

n = 0 çevrimdeki ultrasonik hız değeri

n_1 = c çevrim sonunda ultrasonik hız değeri

Yukarıdaki formül kullanılarak elde edilen BDEM değerleri Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

3.2.4.4. Ağırlık değişimi

ASTM C267’de belirtilen şekilde numunelerin ağırlık değişimleri hesaplanmıştır. Numuneler cihazdan çıkarıldıktan sonra kağıt havlu ile yüzeyleri durulandıktan sonra 0.01 g hassasiyetli terazide tartılmıştır. Numunelerin ağırlık değişimleri Denklem 3.4’deki formül ile hesaplanmıştır.

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

W₀: Numunenin başlangıçtaki ağırlığı, g.

W: Deney sonrası numunenin ağırlığı, g.

3.2.4.5. SEM analizi

SEM analizlerine başlamadan önce, numunelerde iyi bir sinyal oluşumu sağlamak amacıyla numune üzerine düşen elektronların akarak toplanması yani bir noktada birikmemesi için numune yüzeyi altın paladyum tozları kullanılarak iletken bir kaplama ile kaplanmıştır. SEM analizleri İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi’nde yapılmıştır.

3.2.4.6. Donma-çözülme etkisi

ASTM C666 “Hızlı Donma Çözölmeye Maruz Betonun Direncini Tespit Etmek İçin Standart Test Metodu”na uygun olarak betonun dona dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla iki prosedür verilmiştir. Bu yöntemlerin ikisinde de hızlı donma-çözölme çevrimleri uygulanır. A prosedüründe donma ve çözölme su içinde, B prosedüründe ise donma havada, çözölme ise su içinde gerçekleştirilir. Bu çalışmada A prosedürüne uyulmuştur ve donma-çözölme çevrimlerinde sıcaklık 4°C’den -18°C’ye düşürülecek, -18°C’den 4°C’ye çıkarılacak ve çevrimler 2 saatten az, 5 saatten fazla olmayacak şekilde çevrimler tamamlanmıştır. Donma süresi toplam çevrim süresinin %20’sinden az olmamalıdır. Numunelerin sıcaklığı, donma esnasında -19°C’den az ve çözölme esnasında 6°C’den yüksek olmamalıdır. Otomatik donma-çözölme çevrimi yapabilen cihazda donma-çözölme etkilerine maruz kalan numunelerin 50, 100, 150, 200, 250, 300 çevrimlerde basınç dayanımı, ağırlık değişimi ve UPV ölçümleri yapılmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Agregada Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma

Kullanılan dere agregasının özgül ağırlık deneyleri yapılmış, bu deneylerde görünen özgül ağırlık, doymuş kuru yüzey özgül ağırlık, kuru özgül ağırlık ve su emme oranı değerleri iri ve ince agregalar için ayrı ayrı tespit edilmiştir. Deneylerde elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Dere agregasının özgül ağırlık ve su emme oranı

Özellik	Agrega (mm)	
	0-4	4-8
Kuru Özgül Ağırlık, (g/cm ³)	2.39	2.60
Doymuş Kuru Yüzey Özgül Ağırlık, (g/cm ³)	2.47	2.63
Görünen Özgül Ağırlık, (g/cm ³)	2.55	2.65
Su Emme Oranı (%)	2.40	1.30

4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma

Materyal ve Yöntem bölümünde anlatıldığı şekliyle ve deney programında tasarlandığı gibi numunelerin donma-çözülme öncesi ve sonrası, basınç dayanımları, UPV değerleri, ağırlık değişimleri gibi bazı sertleşmiş beton deneyleri ve görsel incelemeleri yapılmış ve bulunan sonuçlar aşağıda başlıklar altında ayrı ayrı incelenmiştir.

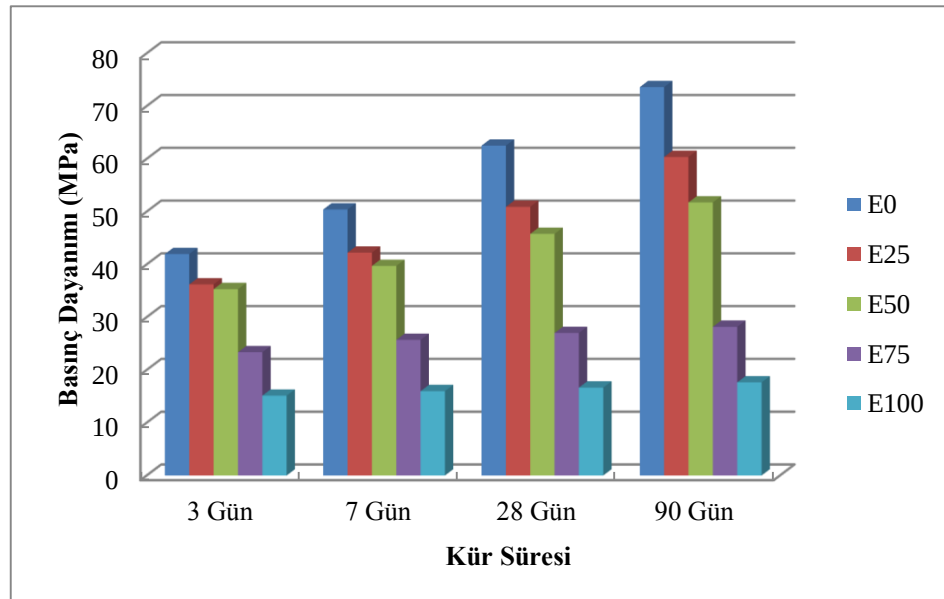
4.2.1 Kontrol numunelerin basınç dayanımları

Üretilen 5 tip geopolimer beton grubun 3, 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerini tamamlamalarının ardından basınç dayanımları belirlenmiştir. Numunelerin basınç dayanımları Çizelge 4.2’de verilmiş ve Şekil 4.1’de grafik halinde gösterilmiştir. Geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde, 3 günlük basınç dayanımları referans kabul edilirse, 7 günlük E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları sırasıyla %20, %17, %12, %10 ve %6 oranında artmıştır, 28 günlük E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları sırasıyla %49, %41, %30, %16 ve %10

oranında artmıştır. Kontrol numunelerin 28 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra 90 gün sonunda basınç dayanımları incelendiğinde artış olduğu gözlenmektedir. Bu artış %6 ile %18 arasında gerçekleşmiştir. Şekil 4.2’den de görüldüğü gibi geopolimer betonlar nihai basınç dayanımlarının büyük bir kısmını ilk günlerde elde etmektedir. Numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde, geopolimer beton karışımlarındaki artan YFC oranının numunelerin basınç dayanımlarında artışa sebep olduğu gözlenmektedir. Bu artışın; YFC’deki SiO_2 , Al_2O_3 ve CaO bileşikleri toplamının EFC’ye nazaran daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.2. Geopolimer beton numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri

Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)			
	Kür Süresi			
	3 Gün	7 gün	28 gün	90 gün
E0	41.96	50.40	62.50	73.59
E25	36.21	42.22	50.90	60.36
E50	35.31	39.71	45.78	51.75
E75	23.35	25.69	27.00	28.17
E100	15.12	15.98	16.65	17.64



Şekil 4.1. Geopolimer beton numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri

Fu vd. (2011), alkali ile aktive olan cüruf betonu (ASC), cüruf ve Na_2SiO_3 , NaOH kompleks aktivatörü kullanılarak silis modülü 3.34, kütlece aktivatör/cüruf miktarı 0.54~0.56, cüruf ağırlığı m^3 'te 400~440 olan numuneler hazırlamışlar, 28 gün sonunda numunelerin basınç dayanımlarını yaklaşık 90 MPa olarak ölçmüşlerdir. Shahrajabian ve Behfarnia (2018) laboratuvar ortamında kür ettikleri numunelerde en yüksek basınç dayanımını %3 nano-silica kullandıkları numunelerde 7. ve 28. günlerde sırasıyla yaklaşık 46 ve 58 MPa olarak bulmuşlardır. Topçu vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada numuneler kalıplara döküldükten sonra 80°C ve %40 bağıl nem ile etüvde 20 saat bekletildikten sonra kırılacağı güne kadar laboratuvar koşullarında (20°C ve %40 bağıl nem) tutulmuştur. En yüksek basınç dayanımı 25.83 MPa ile ağırlıkça %12 Na_2O ve %8 SiO_2 kullanılan numunelerde olduğu görülmüştür. Luukkonen vd. (2018) yaptıkları çalışmada ürettikleri numunelerde hızlı çözülen silika kullanmış, 23°C ve %60 bağıl nem ile test gününe kadar kür etmiş, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ oranı 0.09 üzerindeyken basınç dayanımında lineer bir artış olduğunu görmüş ve en yüksek basınç dayanımı olarak 107 MPa (28 gün) değerini elde etmişlerdir. Slavik vd. (2008) yaptıkları çalışmada laboratuvar koşullarında döküp kür ettikleri numunelerden 7. günde yaklaşık 41 MPa, 28. günde yaklaşık 53 MPa basınç dayanım değerlerini elde etmişlerdir. Ekinci vd, (2019) tarafından yapılan çalışmada yalnızca NaOH ile aktive edilmiş %3 mikro-silika içeren numunelerin 28 günlük basınç dayanımını yaklaşık 30MPa olarak bulunmuştur. Temuujin vd. (2014) Baganuur ve Shivee Ovoo uçucu külleri kullanılarak üretilen geopolimer beton numunelerde 7 günlük basınç dayanımlarında 23 MPa değerine ulaşmışlardır. Pilehvar vd. (2019) yaptıkları çalışmada ürettikleri geopolimer numuneleri ilk 24 saat bağıl nemi %90 olan ortam koşullarında, ardından 28 gün 20°C sıcaklıktaki suda kür etmiş ve basınç dayanımını yaklaşık 77MPa olarak bulmuşlardır. Huseien vd. (2019) yaptıkları çalışmada ürettikleri numuneleri 27°C ve %75 bağıl nem ortamında test gününe kadar kür etmişler ve en yüksek basınç dayanımları 7. günde yaklaşık 60MPa ve 28. günde yaklaşık 76 MPa değerlerine ulaşmışlardır. Thokchom vd. (2009) yaptıkları çalışmada düşük kalsiyumlu F sınıfı uçucu kül, silis modülü yaklaşık 3.3 olan sodum hidroksit ve sodyum silikat çözeltisi, su/uçucu kül oranı 0.33, Na_2O içeriği %5.0, %6.5, %8.0 olan numuneler 85°C'de 48 saat kür edildikten sonra 28 güne kadar fırının içerisinde soğumaya bırakılmış ve basınç dayanımları Na_2O içeriğinin artışına göre sırayla 22 MPa, 37 MPa ve 40MPa

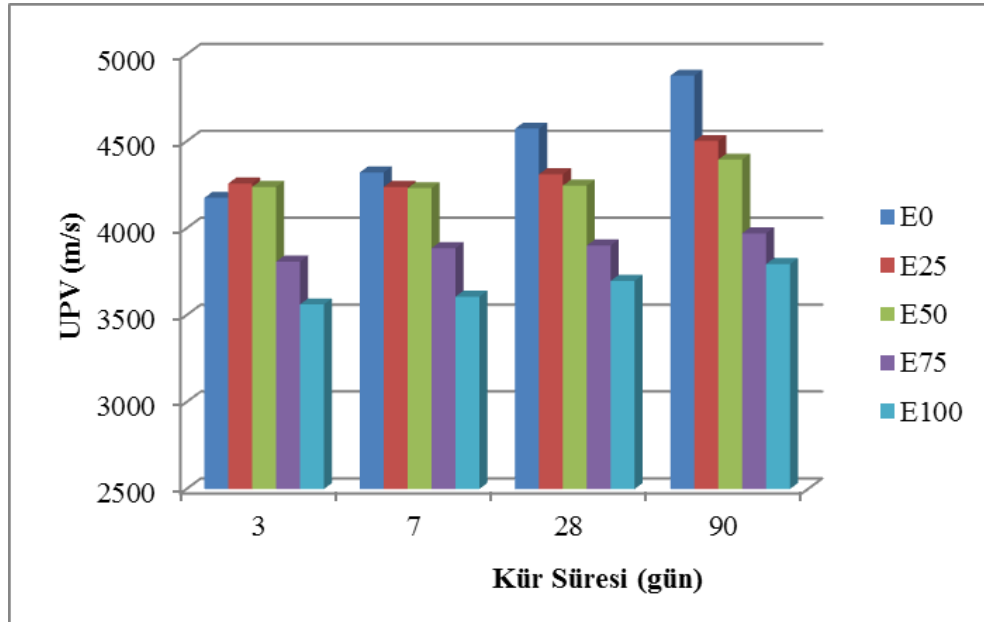
olarak ölçülmüştür. Kantarcı (2017), yaptığı çalışmada bütün karışımlarda EFC dozajı 400 kg/m³, silis modülü 1.35 ve ağırlıkça sodyum oksit miktarı 9.13 olarak belirlenmiştir. %60 nem ve 75°C sıcaklık değerlerinde kür edilmiş dere agregalı ve kırma kum agregalı geopolimer beton numunelerin 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 35.10 MPa ve 25.18 MPa olarak bulunmuştur. Canbaz (2007) yaptığı çalışmada çimento yerine belirli oranlarda (%0, %25, %50, %75, %85, %90, %95, %100) yüksek fırın cürufu, alkali olarak NaOH, Na₂O ve Na₂SiO₃ ile oluşturulan üç çeşit aktivatör kullanılmış, üretilen numuneler standart kür koşullarında tutulmuştur. %100 YFC içeren numunelerin 28 gün sonraki basınç dayanımı yaklaşık 12 MPa olarak bulunmuştur. Açıkgöz (2015), yaptığı çalışmada üç farklı dozajda (300 kg/m³, 350 kg/m³, 400 kg/m³) ve farklı oranlarda NaOH ve NaOH+Na₂SiO₃ aktivatörleri kullanılmış ve 28 gün sonundaki basınç dayanım değerleri 300 kg/m³ dozajda 54 MPa, 400 kg/m³ dozajda ise 72 MPa mertebelerinde ölçülmüştür. Ulu (2016), yaptığı çalışmada alkalilerle aktive edimiş YFC'li ve metakaolinli harçlarda atık pet agrega kullanımını araştırmıştır. Pet içermeyen ve %100 YFC ile NaOH ve Na₂SiO₃ aktivatörleri kullanılarak silis modülü 1, Na içeriği %4 olan karışım, 24 saat boyunca laboratuvar koşullarında (22±2°C) bırakıldıktan sonra, kalıplardan çıkarılarak %98 bağıl nemli ve 60±0.5°C sıcaklığa sahip nem kabini içine yerleştirilmiş ve 28 gün sonra basınç dayanımı ölçülerek 70 MPa bulunmuştur. Yadollahi vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada, Hasankale bazlı pomza geopolimeri için silis modülü 0.68, Na₂O içeriği %0.10, su/bağlayıcı oranı 0.36 seçilmiştir. Elde edilen karışım 48 saat 65°C kür odasında kür edildikten sonra kırım gününe kadar 25°C'lik laboratuvar ortamında bekletildiğinde, bu karışımdan 40 MPa basınç dayanımı değeri elde edilmiştir.

4.3.2. Kontrol numunelerin UPV ölçümleri

Suda bekletilen kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonra 50, 100, 150, 200, 250 ve 300 donma-çözülme çevrim süreleri sonundaki UPV ölçümleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.3'te de görüldüğü üzere karışımdaki YFC oranı arttıkça kontrol numunelerin UPV değerlerinde de artış gözlenmektedir.

Çizelge 4.3. Geopolimer beton numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük UPV değerleri

Karışım	UPV Değeri (m/s)			
	Kür Süresi (gün)			
	3	7	28	90
E0	4175	4321	4573	4878
E25	4258	4238	4311	4502
E50	4238	4231	4245	4395
E75	3808	3885	3901	3971
E100	3562	3606	3697	3794



Şekil 4.2. Geopolimer beton numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük UPV değerleri

4.3.4. Kontrol numunelerin görsel incelemeleri

Kür sürelerini tamamlayan kontrol numunelerin görünüşleri Şekil 4.6'da verilmiştir. Karışımdaki EFC oranının artmasının numunelerin renginde koyulaşmaya neden olduğu görülmüştür.



Şekil 4.3. Kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonra görünüşleri

4.4. Donma-Çözülme Etkisine Maruz Kalan Geopolimer Beton Numuneleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma

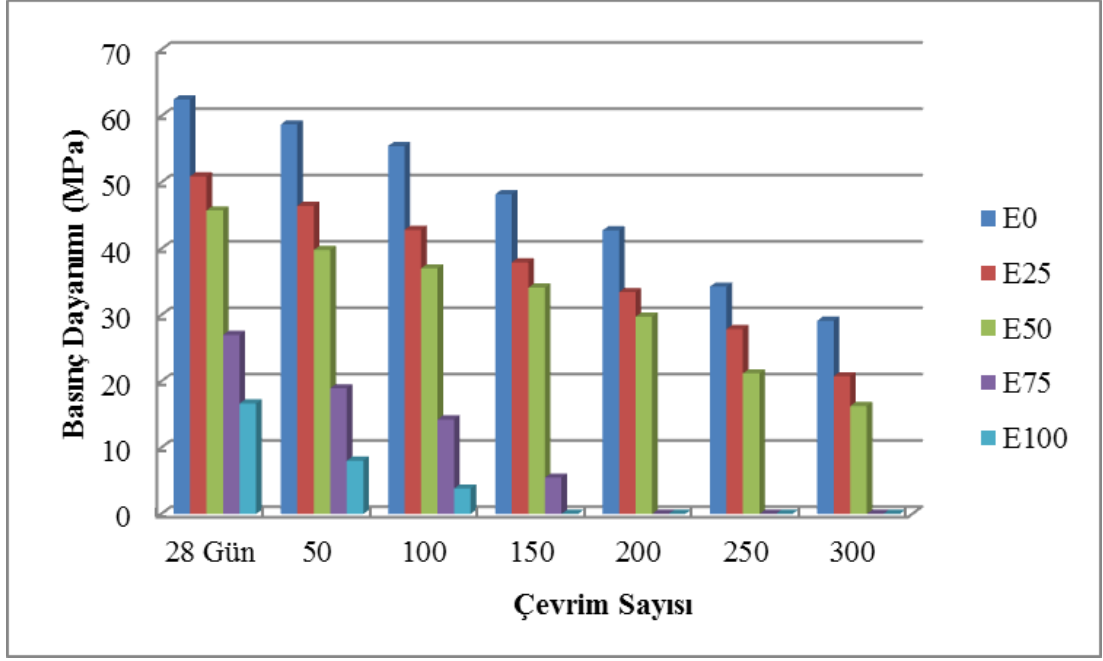
Üretilen geopolimer beton numuneleri kür sürelerini tamamladıktan sonra donma-çözülme etkisine karşı dirençlerinin belirlenmesi için 50 çevrimlik periyotlarda toplamda 300 çevrim olmak üzere suda donma-çözülme etkisine maruz bırakılmıştır. Bu süreçte numunelerin basınç dayanımları, UPV'leri, ağırlık değişimleri tespit edilirken numunelerin görsel değişimleri de incelenmiştir. Numunelerin basınç dayanım ve UPV değerleri, kontrol numunelerin basınç dayanım ve UPV değerleriyle karşılaştırılmıştır.

4.4.1. Donma-çözülme etkisindeki numunelerin basınç dayanımları

Suda donma-çözülme etkilerine bırakılan numunelerin 50, 100, 150, 200, 250 ve 300 çevrimlerde basınç dayanımları ölçülmüş bu değerler Çizelge 4.4.'da verilmiş ve Şekil 4.4.'de grafik halinde gösterilmiştir. Donma-çözülme etkisine maruz kalan numunelerin basınç dayanımında azalma görülürken bir kısmının 300 çevrime ulaşmadan dağıldığı görülmüştür.

Çizelge 4.4. 300 donma-çözülme çevrimine kadar numunelerin basınç dayanımları

Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)					
	Çevrim Sayısı					
	50	100	150	200	250	300
E0	58.74	55.49	48.23	42.77	34.28	29.14
E25	46.48	42.85	37.95	33.46	27.88	20.77
E50	39.82	37.03	34.13	29.75	21.20	16.27
E75	18.95	14.26	5.48	0.00	0.00	0.00
E100	8.04	3.83	0.00	0.00	0.00	0.00



Şekil 4.4. 300 donma-çözülme çevrimine kadar numunelerin basınç dayanımları

Sonuçlar incelendiğinde 100 çevrim sonunda E0, E25, E50, E75 ve E100 grubu numunelerin basınç kayıpları sırasıyla %11.2, %15.8, %19.1, %47.2, %77.0'dır. 150 çevrim sonunda E100 grubundaki numuneler çok hasar gördüklerinden basınç dayanımlarının ölçülebilmesi mümkün olmamıştır. E0, E25, E50 ve E75 numunelerindeki basınç kayıpları sırasıyla %22.8, %25.4, %25.5, %79.7 olmuştur. 300 çevrime ulaşan numuneler E0, E25, E50 grubundaki numunelerdir ve dayanım kayıpları sırası ile %53.4, %59.2, %64.5 mertebelerinde olmuştur. Sonuçlardan görüldüğü üzere EFC oranı arttıkça basınç dayanım kayıpları da artmakta en az dayanım kaybı E0 numunelerinde görülmektedir.

Topçu vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada geopolimer numunelerde 30 donma-çözülme çevrimi sonrası dayanım kaybı yalnızca %6.77 iken, SiO_2/CBA oranı yükseldikçe daha yüksek donma-çözülme dayanımı elde edildiği gözlemlenmiştir. Slavik vd. (2008) yaptıkları çalışmada 50 donma-çözülme çevrimi sonunda numunelerdeki basınç kaybının %20'den fazla olmadığı tespitinde bulunmuşlardır. Ekinci vd, (2019) yaptıkları çalışmada üretilen geopolimer beton numunelerinde 300 donma-çözülme çevrimi sonunda basınç dayanımlarındaki azalmaları $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{NaOH}$ kullanılanlarda %13-20 arasında, yalnızca NaOH kullanılanlarda ise %20-27 mertebelerinde bulmuştur. Temuujin vd. (2014) tarafından üretilen numuneler 40 çevrime kadar donma-çözülme etkilerine maruz

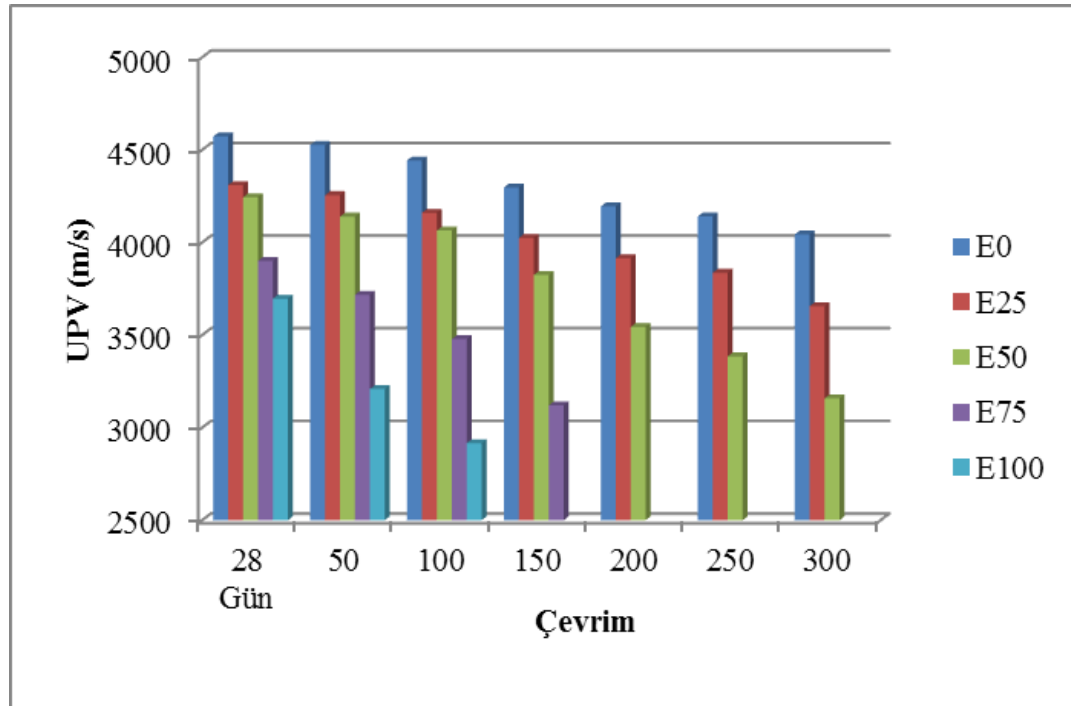
bırakılmış olup, Baganuur külleri kullanılarak elde edilen numunelerde yaklaşık %11 dayanım kaybı olurken Shivee-Ovoo külleri ile elde edilen numunelerde bu değer %36 olmuş ve %75 dere agregası içeren Shivee-Ovoo küllü numuneler 40 çevrime ulaşmadan dağılmışlardır. Pilehvar vd. (2019) yaptıkları çalışmada 28 donma-çözülme döngüsüne maruz kalan geopolimer numunelerden hem geopolimer beton (GPC) hem de portland çimentolu betonun (PCC) basınç dayanımlarının azaldığını tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, GPC donma-çözünme döngülerine karşı PCC'den daha iyi bir direnç sergilemiştir. Mikro kapsüllenmiş faz değişim malzemeleri (MPCM) eklenen numunelerde 28 donma-çözülme döngülerinden sonra basınç mukavemetindeki azalma, tüm numuneler için %2.5'in altına düşürülmüştür. Bu, MPCM'nin donma-çözünme döngülerine karşı mükemmel bir direnç sağladığını göstermektedir. Canbaz (2007) yaptığı çalışmada %100 YFC içeren numuneler 50 çevrimde dağılmıştır. Shahrajabian ve Behfarnia (2018) tarafından yapılan çalışmada 90 gün suda kür edilen numuneler donma-çözülme etkisine maruz bırakılmıştır. Numunelerin 100, 200, 300 çevrim sonundaki basınç dayanım değerleri tespit edilmiştir. 300 çevrim sonrası, kontrol numunesinde basınç dayanımı azalması %6.14 iken, % 1, % 2 ve % 3 nano-silika içeren numunelerde bu azalma %5.56, %4.89 ve %4.1 olarak bulunmuştur. Nano-alüminin kullanımının ise %2'ye kadar artması, donma-çözülme etkileri altında, kontrol numuneleriyle karşılaştırıldığında basınç dayanımının arttığı; bununla birlikte, %3 nano-alümina ilavesi, %2 nano-alümina içeren numuneyle karşılaştırıldığında basınç dayanımının düşmesine neden olduğu görülmüştür. Ayrıca, numunelerde %2'ye kadar nano-alümina ilavesi donma-çözülme çevrimlerinden önceki değerine kıyasla basınç dayanımı azalma oranını düşürmektedir. Son olarak nano-kil kullanımının donma-çözülme koşulları altında numunelerde basınç dayanımı üzerinde olumlu bir etkisi olduğu görülmektedir. Sun ve Wu'nun (2013) yaptıkları çalışmada en olumsuz etkilenen numuneler CN grubundakiler olmuş ve 300 çevrimden sonra yaklaşık %20 dayanım kaybetmiştir. CA örnekleri 300 döngüden sonra %5 dayanım kaybetmiştir. FN örnekleri 90 donma-çözülme döngüsünden sonra %8 dayanım kaybetmiş ilerleyen çevrimlerde kademeli olarak geri dayanım kazanmış ve 300 çevrim sonunda %5'lik bir nihai dayanım düşüşü bulunmuştur ancak 300 çevrimden sonra dayanımların daha da artmaya devam edip etmeyeceği bilinmemektedir. Diğer numunelerin aksine, FAA numunelerin tamamında basınç dayanımında bir değişiklik gözlenmemiştir.

4.4.2. Donma-çözülme etkisindeki numunelerin UPV ölçümleri

Suda donma-çözülme etkisine maruz bırakılan numunelerin 50, 100, 150, 200, 250 ve 300 periyotlarda UPV ölçümleri yapılmıştır. Numunelerin UPV ölçümleri Çizelge 4.5’de verilmiş ve Şekil 4.5’de grafik halinde gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. 300 donma-çözülme çevrimine kadar numunelerin UPV ölçümleri

Karışım	UPV (m/s)					
	Çevrim Sayısı					
	50	100	150	200	250	300
E0	4526	4443	4298	4195	4141	4044
E25	4256	4160	4026	3915	3837	3656
E50	4140	4065	3825	3545	3385	3158
E75	3717	3478	3120	-	-	-
E100	3208	2916	-	-	-	-



Şekil 4.5. 300 donma-çözülme çevrimine kadar numunelerin UPV ölçümleri

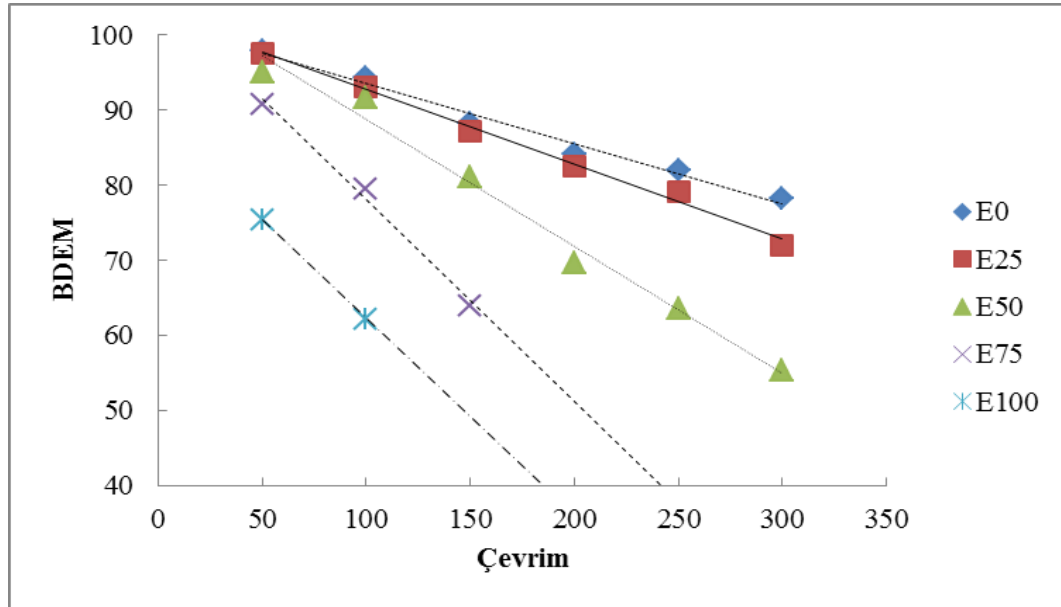
Sonuçlar incelendiğinde 100 çevrim sonunda E0, E25, E50, E75 ve E100 grubu numunelerin UPV değişimleri oranları sırasıyla %2.8, %3.5, %4.2, %10.8, %21.1'dir. 150 çevrim sonunda E100 grubundaki numuneler çok hasar gördüklerinden UPV ölçümünün yapılabilmesi mümkün olmamış E0, E25, E50 ve E75 numunelerindeki UPV değişimleri sırasıyla %6.0, %6.6, %9.9, %20.0 olmuştur. 300 çevrime ulaşan numuneler E0, E25, E50 grubundaki numunelerdir ve UPV değişimleri sırası ile %11.6, %15.2, %25.6 mertebelerinde olmuştur. Sonuçlardan görüldüğü üzere EFC oranı arttıkça UPV değişimleri de artmakta en az değişim EFC içermeyen E0 grubu numunelerde görülmektedir. Ekinci vd, (2019) tarafından yapılan çalışmada nano-silika, mikro silika ve Stiren-Butadien Lateks ile volkanik tüfün bağlayıcı olarak kullanıldığı geopolimer beton örneklerini ASTM C666'ya göre donma-çözülme etkilerine maruz bırakmış ve 300 çevrim sonunda Na_2SiO_3 + NaOH ile aktive edilen numunelerin UPV değerlerinde yaklaşık %8 ila 22 arasında, sadece NaOH ile aktive edilen numunelerde ise yaklaşık %7 ila %25 arasında azalma gözlenmiştir. Luukkonen vd. (2018) yaptıkları çalışmada 120 donma-çözülme çevrimi sonunda UPV değerlerinde önemli bir değişim izlenmezken, bu değerlerin 4100 m/s mertebelerinde olduğu görülmüştür.

4.4.3. Donma-çözülme etkisindeki numunelerin bağıl dinamik elastisite modülü (BDEM) değerleri

BDEM değerlerindeki azalma en az E0 grubu numunelerde görülmektedir. EFC oranı arttıkça BDEM değerlerinde de düşüş olduğu görülmektedir. E0 numunelerinin 300 çevrim sonundaki BDEM değeri 78.18 iken E25 ve E50 grubundaki numunelerde sırasıyla 71.93 ve 55.35 olarak bulunmuştur. Numunelerin BDEM değerleri Çizelge 4.6. da verimiş ve Şekil 4.6.'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. 300 donma-çözülme çevrimine kadar numunelerin BDEM değerleri

Karışım	Bağıl dinamik Elastisite Modülü-BDEM-					
	Çevrim Sayısı					
	50	100	150	200	250	300
E0	97.96	94.41	88.33	84.15	82.00	78.18
E25	97.48	93.15	87.22	82.48	79.21	71.93
E50	95.12	91.70	81.18	69.72	63.59	55.35
E75	90.80	79.50	63.96	-	-	-
E100	75.31	62.23	-	-	-	-



Şekil 4.6. 300 donma-çözülme çevrimine kadar numunelerin BDEM değerleri

Fu vd. (2011) alkali ile aktive olan cüruf betonu (ASC), cüruf ve Na_2SiO_3 , NaOH aktivatörleri kullanılarak silis modülü 3.34, kütlece aktivatör/cüruf miktarı 0.54~0.56, dozajı 400 ve 440 olan numuneler hazırlamışlar, her 25 çevrimde BDEM değerleri bulunmuş ve bu değerlerin donma-çözülme çevrimleri sonucunda azaldığı gözlenmiştir. 300 çevrim sonunda numunelerdeki BDEM değerlerinin %10 azaldığını tespit etmişlerdir. Ekinci vd, (2019) ürettikleri geopolimer beton örneklerini donma-çözülme etkilerine maruz bırakmış ve 300 çevrim sonunda $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ ile aktive edilen numunelerin BDEM değerlerinde yaklaşık %15

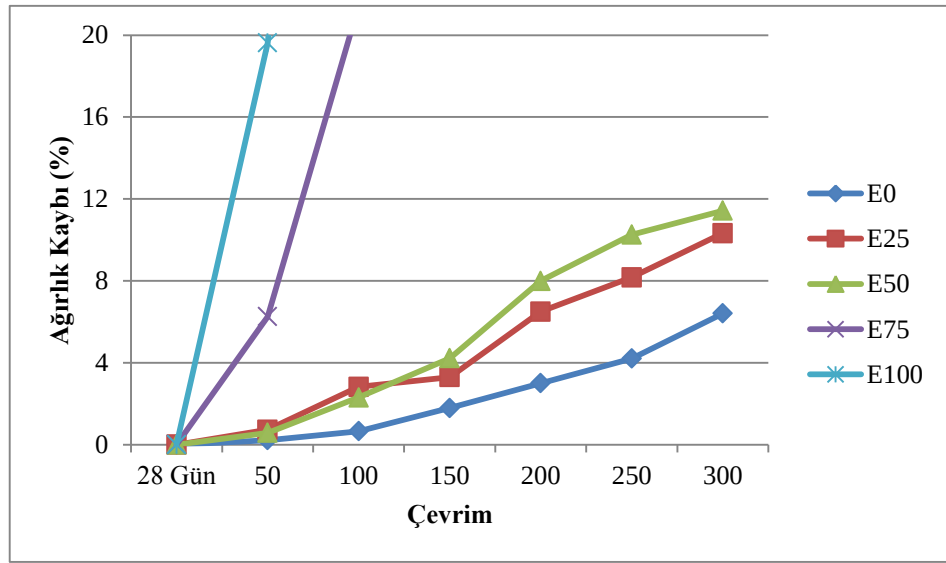
ila %38 arasında, sadece NaOH ile aktive edilen numunelerde ise yaklaşık %15 ila %44 arasında azalma olduğunu gözlemlemişlerdir.

4.4.4. Donma-çözülme etkisindeki numunelerin ağırlık değişimleri

Kür sürelerini tamamlayan numuneler donma-çözülme etkilerine maruz kalırken bu süreçte numunelerin ağırlık değişimleri incelenmiştir. Donma-çözülme etkilerine maruz bırakılan numunelerin ağırlık değişimleri Çizelge 4.7’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde ağırlık değişiminin en çok E100 grubu numunelerde, en az değişimin E0 grubu numunelerde olduğu görülmekte, diğer gruplardaki numunelerdeki ağırlık değişimlerinin EFC oranı arttıkça bu orana bağlı olarak arttığı görülmektedir.

Çizelge 4.7. 300 donma-çözülme çevrimine kadar numunelerin ağırlık değişim değerleri

Karışım	Ağırlık Değişimi (%)					
	Çevrim Sayısı					
	50	100	150	200	250	300
E0	0.22	0.66	1.79	3.00	4.20	6.41
E25	0.73	2.82	3.30	6.50	8.17	10.33
E50	0.58	2.30	4.22	8.00	10.25	11.43
E75	6.26	21.43	44.02	-	-	-
E100	19.63	61.68	-	-	-	-



Şekil 4.7. 300 donma-çözülme çevrimine kadar numunelerin ağırlık değişim değerleri

Fu vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada 300 çevrim sonunda numunelerdeki ağırlık kaybının çok az (%0.7) olduğu tespit edilmiştir. Pilehvar vd. (2019) yaptıkları çalışmada ürettikleri geopolimer numuneleri donma-çözülme etkilerine maruz bırakmış 28 donma-çözülme çevriminden sonra meydana gelen kütle kaybının %1'den az olduğu görülmüştür. Zu vd. (2019) yaptıkları çalışmada uçucu kül kullanılan numunelerde 25 donma-çözülme çevriminden sonra %0.69'dan %1.42 seviyelerine kadar kütle kaybı görülürken, bu kaybın 50 donma-çözülme çevriminden sonra %2.17'den %24.60 seviyelerine kadar arttığı görülmüştür. Modifiye edilmiş uçucu küllerle üretilen numunelerde ise kütle kaybının özellikle 50 donma-çözülme çevrimi sonunda oldukça düşük mertebelerde kaldığı görülmüştür. Luukkonen vd. (2018) yaptıkları çalışmada 120 çevrim donma-çözülme etkilerine maruz kalmış numunelerde kütle kaybını en fazla %2 olarak bulmuşlardır. Huseien vd. (2019) yaptıkları çalışmada numuneleri 300 donma-çözülme çevrimine maruz bırakmışlar ve bu numunelerdeki uçucu kül oranındaki artışın kütle kayıplarını da artırdığını tespit etmişlerdir.

4.4.5. Donma-çözülme etkisindeki numunelerin görsel incelemeleri

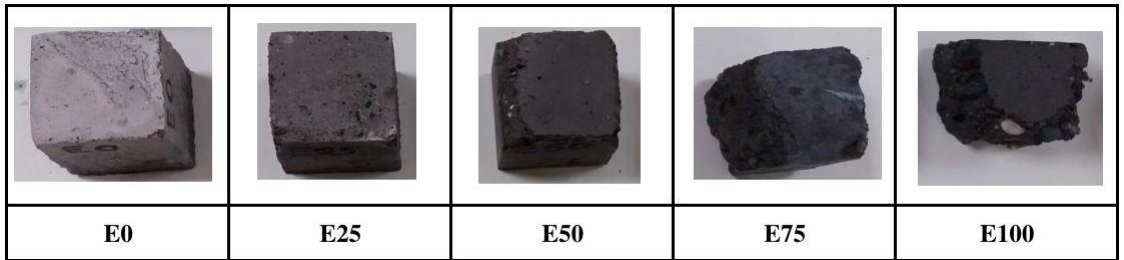
Donma-çözülme etkisindeki numuneler görsel olarak incelendiğinde çevrim sayısı arttıkça numunelerdeki kabuk atma, çatlama ve ufalanma hasarlarının arttığı

görülmüştür. Bu çevrimlerden en az E0 grubu numuneler etkilenirken en çok da E100 grubu numunelerin etkilendiği görülmüştür. E50 grubu numuneler 150 çevrim sonunda, E75 grubu numuneler ise 200 çevrim sonunda tamamen parçalanmıştır. 300 çevrime kadar her 50 donma-çözülme çevrimi için bütün gruptaki numunelerin görselleri Şekil 4.8-13'de gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde numunelerdeki bozulmaların EFC oranı arttıkça arttığı ve daha çok parçalanma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu da yapılan diğer basınç dayanımı ve ağırlık kaybı deney sonuçlarıyla örtüşmektedir.

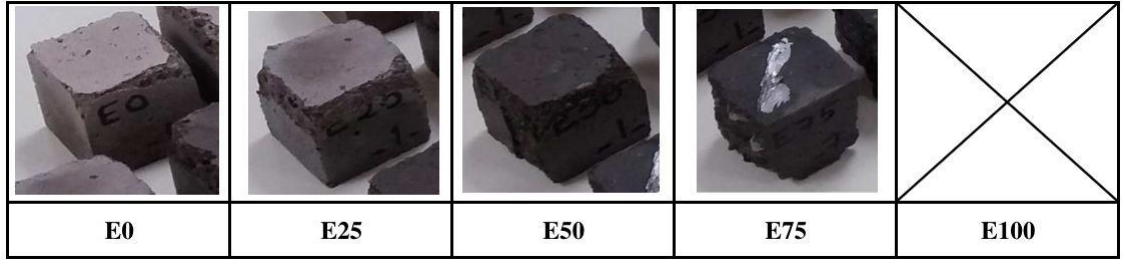
Numuneler görsel olarak incelendiğinde donma-çözülme etkileri küp numunelerin önce köşe noktalarından kopmalar şeklinde gözlenirken ilerleyen çevrimlerde yüzeylerden kabuk atma ve parçalanma şeklinde olduğu görülmektedir.



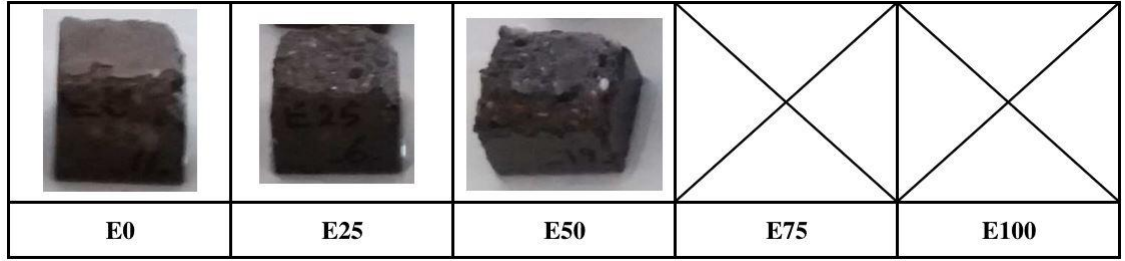
Şekil 4.8. 50 donma-çözülme çevrimi sonrası numunelerin görsel incelemesi



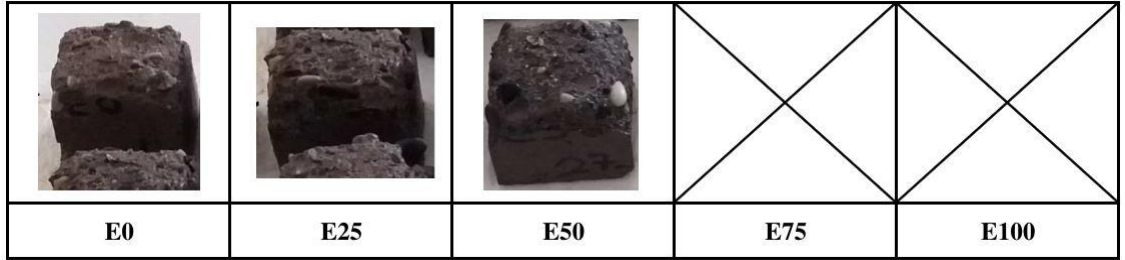
Şekil 4.9. 100 donma-çözülme çevrimi sonrası numunelerin görsel incelemesi



Şekil 4.10. 150 donma-çözülme çevrimi sonrası numunelerin görsel incelemesi



Şekil 4.11. 200 donma-çözülme çevrimi sonrası numunelerin görsel incelemesi



Şekil 4.12. 250 donma-çözülme çevrimi sonrası numunelerin görsel incelemesi



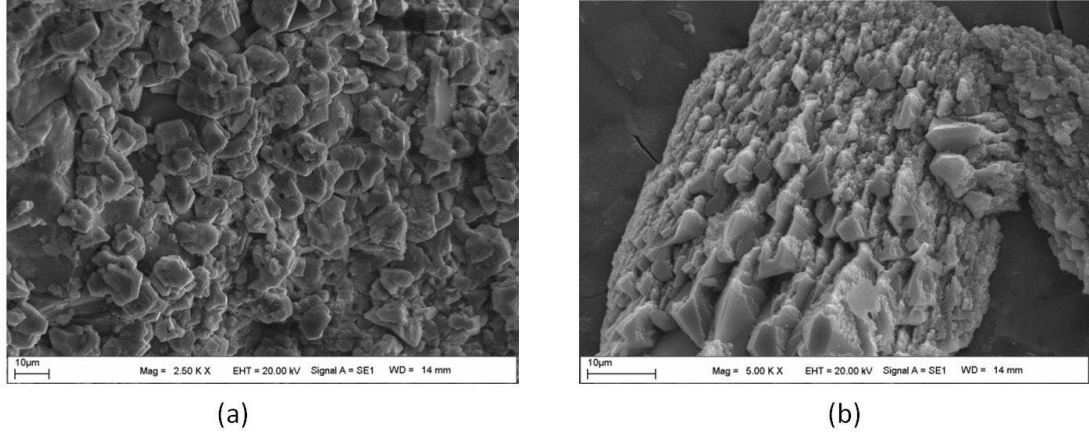
Şekil 4.13. 300 donma-çözülme çevrimi sonrası numunelerin görsel incelemesi

Temuujin vd. (2014) yaptıkları çalışmada 40 donma-çözülme çevrimi sonunda numuneleri görsel olarak inceleyerek numunelerin bazılarının yüzeylerinde bozulmalar olduğunu tespit etmişlerdir. Ekinci vd, (2019) yaptıkları çalışmada 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan numunelerin görsel değişimlerini incelemiş ve nano-silikanın geopolimer beton numunelerin donma-çözülme performansına büyük katkısı olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca mikro-silika kullanılan ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ ile aktive edilen numunelerin donma-çözülme etkilerine karşı oldukça iyi performans gösterdiğini ortaya koymuşlardır. İlave silika kullanılmayan numuneler ile yalnızca NaOH ile aktive edilen numunelerde 300 donma-çözülme çevrimi sonunda parçalanmaların çok ciddi oranlarda olduğu görülmüştür. Huseien vd. (2019) yaptıkları çalışmada 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan yüksek fırın cürufu numunelerin görsel incelemelerinde %40 uçucu kül içeren numunelerin hiç uçucu kül içermeyen numunelerle karşılaştırmışlardır. %40 uçucu kül içeren numunelerin kenar, köşe ve yüzeylerinde parçalanmalar olduğu ve hasarın çok daha fazla olduğu görülmüştür. Yüksek fırın cürufu ile yapılan geopolimer betonların donma-çözülme etkilerine karşı daha dayanıklı olduğu belirtilmiştir. Literatüre benzer şekilde yaptığımız çalışmada tamamen yüksek fırın cürufu E0 grubu numunelerin donma-çözülme etkilerinden daha az etkilendiği ve daha az hasar meydana geldiği görülmüştür.

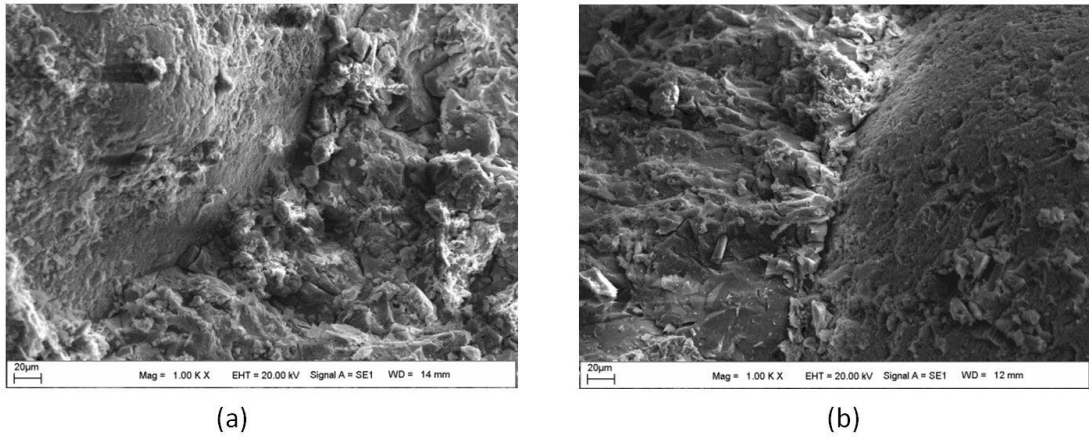
4.4.6. Donma-çözülme etkisindeki numunelerin içyapı analizleri

Bu bölümde numunelerin içyapı analizlerinin değerlendirilmesi için SEM görüntüleri incelenmiştir. Şekil 4.14'te numunelerin iç yapısının oldukça yoğun olduğu görülmektedir. Bu yoğunluk ile daha önce yapılan tahribatlı ve tahribatsız deney sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Şekil 4.15'te agrega-bağlayıcı hamur arayüzeyinin de oldukça yoğun olduğu görülmektedir. Betondaki donma-çözülme çevrim sayısının artması ile beraber malzemenin BDEM değerlerinin azalacağı donma ve buz hacminin genişmesi sonucu oluşan gerilmelerin betonun çekme gerilmelerini aşması ile betonda mikro çatlakların oluşacağı bilinmektedir. Literatürde geopolimer betonların donma-çözülme çevrimi etkisinde iç yapıdaki değişimlerini inceleyen çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalardaki iç yapı görüntüleri incelendiğinde numunelerin üzerinde donma-çözülme etkilerinden kaynaklanan çatlak oluşumlarının olduğu (Pilehvar vd. 2019),

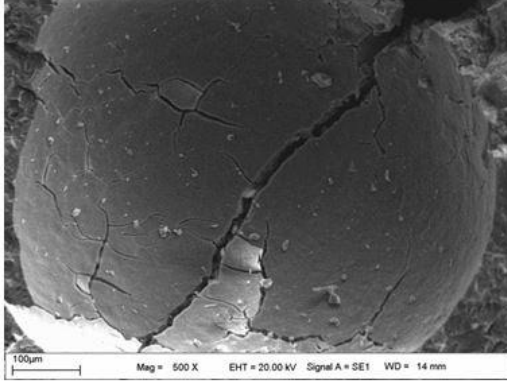
çatlakların ve parçalanmaların oluştuğu, (Topçu vd. 2014), iç yapı çatlaklarının ve gözeneklerinin olduğu (Fu vd. 2011) görülmüştür. Literatüre benzer şekilde bu çalışmada da donma-çözülme çevrimleri sonunda numunelerde meydana gelen çatlaklar Şekil 4.16’da gösterilmiştir.



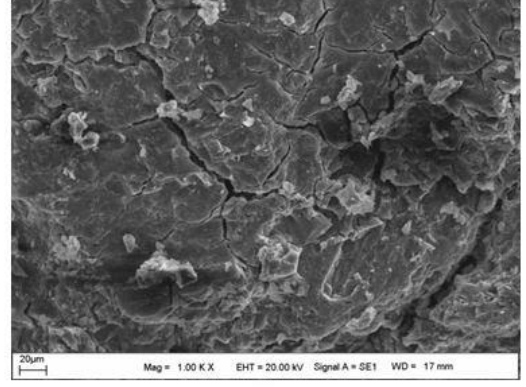
Şekil 4.14. Üretilen geopolimer beton numunelerde görülen yoğun jel yapısı



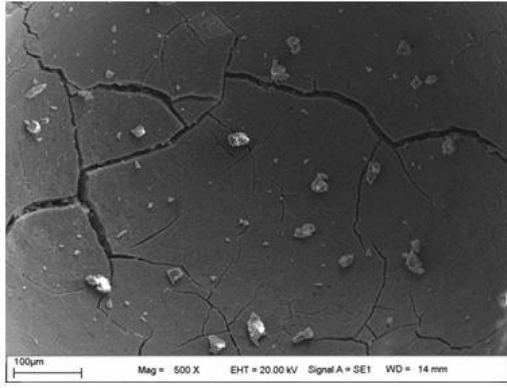
Şekil 4.15. Üretilen geopolimer beton numuneler agrega-jel ara yüzey görüntüleri



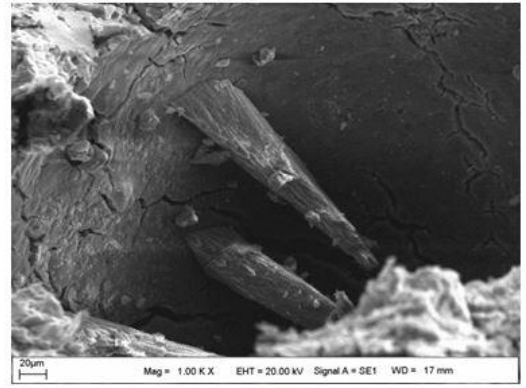
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.16. Donma-çözülme etkisindeki numunelerde görülen çatlak görüntüleri

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada donma-çözülme etkilerine maruz kalan EFC ve YFC kullanılarak üretilen geopolimer betonların basınç dayanımları, UPV değerleri, ağırlık değişimleri belirlenmiş, görsel değişimleri ve içyapıları incelenmiştir. Yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Üretilen geopolimer betonların 28 günlük kür süreleri sonunda en düşük basınç dayanımı 17.35 MPa ile E100 karışımında, en yüksek basınç dayanımı ise 61.53 MPa ile E0 karışımında elde edilmiştir. Diğer numune grupları da göz önüne alındığında karışımındaki YFC oranı arttıkça basınç dayanımının da arttığı görülmüştür.
2. Üretilen numunelerde donma-çözülme tekrarı arttıkça numunelerdeki basınç dayanımı değerlerinde azalma görülmüştür.
3. Donma-çözülme etkilerine maruz kalan geopolimer betonların en yüksek UPV değerlerinden en düşüğüne göre dizilimi sırasıyla E0, E25, E50, E75, E100 grupları şeklindedir. Numune gruplarındaki EFC oranı arttıkça ölçülen UPV değerlerinde de düşüş görülmektedir.
4. Donma-çözülme etkilerine maruz kalan numunelerde ağırlık kaybı gözlemlenmiştir. Bu kayıplar en az E0 grubu numunelerde meydana gelirken EFC oranı arttıkça ağırlık kaybı da artış göstermiştir. E75 ve E100 grubu numuneler 300 çevrim sonuna kadar bütünlüklerini koruyamamış ve E75 grubu numuneler 200 çevrim sonunda, E100 grubu numuneler ise 150 çevrim sonunda dağılarak parçalanmışlardır.
5. Numuneler görsel olarak incelendiğinde donma-çözülme etkileri küp numunelerin önce köşe noktalarından kopmalar şeklinde gözlenirken ilerleyen çevrimlerde yüzeylerden kabuk atma ve parçalanma şeklinde olduğu görülmektedir. Bu etkiler en çok E100 ve E75 numunelerde görülmüş ve bu numuneler 300 çevrime ulaşmadan parçalanarak dağılmışlardır.
6. Yapılan iç yapı analizinde kontrol numunelerinde iç yapının oldukça yoğun olduğu görülmektedir. Donma-çözülme çevrimine maruz kalan numunelerde yer yer çatlakların meydana geldiği tespit edilmiştir.

Bu çalışmada uygulanan yöntemler ve elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında, geopolimer betonların donma-çözülme gibi fiziksel etkilere karşı dayanıklılığını araştırmak ve durabilitesini arttırabilmek için farklı yöntemler denenebilir. Daha iyi dayanım ve dayanıklılık elde etmek amacıyla, geopolimer

beton üretilirken kullanılan bağlayıcı malzeme, bu malzemenin aktivasyonu için kullanılan kimyasalların türü, karışım oranları ve üretilen numunelerin kr koşullarında değişiklikler yapılarak, kimyasal ve fiziksel etkilere karşı dayanıklılıkları karşılaştırılabilir. Deney sonuçlarına hangi parametrelerin nasıl etki gösterdiği incelenebilir.

6. KAYNAKLAR

- ACI Commitee 201 (1992), *Guide to Durable Concrete*, ACI 201.2R-92, American Concrete Institute, 39 p.
- ACI Commitee 306 (1997). *Cold Weather Concreting*, ACI 306R-88, American Concrete Institute, 23 p.
- Açıkgöz A. (2015). *Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufllu Betonların Hidratasyon Sıcaklığının Araştırılması*. Yüksek lisans tezi, Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde.
- Ali, O. A. A. (2016). *Alkali ve çimento ile birlikte aktifleştirilmiş uçucu kül geopolimer harcının mekanik özellikleri*. Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- ASTM C666/C 666M (2008), *Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing*. American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C267 (2001). *Standard test methods for chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacings and polymer concretes*. American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C39/C39M (1999). *Standart test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C597 (2002). *Standart test method for pulse velocity through concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Aruntaş H. Y. (2006), Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyelleri, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, **21**, 193-203.
- Aydın, S. (2010), *Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın curufu bağlayıcılı lifli kompozit geliştirilmesi*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Azarsa, P., Gupta, R. (2019). Novel approach to microscopic characterization of cryo formation in air voids of concrete. *Micron*, **122**, 21-27.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın S. (2015) *Beton*, (2. Baskı), DEÜ Müh. Fak. Yayınları, İzmir.
- Barbosa, V.F.F., MacKenzie, K.J.D., Thaumaturgo, C. (2000). Synthesis and characterization of materials based on inorganic polymers of alümina and silica: sodium polysialate polymers. *International Journal of Inorganic Materials*, **2**, 309-317.
- Barka, E. (2008). Demir Çelik ve Gemi Söküm Tesislerinin Çevresel Etkileri (pp:245-257). *TMMOB İzmir Kent Sempozyumu*, Ocak 2009, İzmir.

- Basheer, L, Kropp, J and Cleland, DJ, (2001). Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. *Construction and Building Materials*, **15**, 93-103.,
- Basheer, L., Cleland, D.J. (2006). Freeze-thaw resistance of concretes treated with pore liners. *Construction and Building Materials*, **20**, 990-998.
- Boateng, S. (1992). *Petrographic analysis and durability of fine aggregates*. Master's Thesis, the University of Windsor, Windsor, Ontario, Canada.
- Boyd, A.J. (1995). *Salt scaling resistance of concrete containing slag and fly ash*. Master's Thesis, University of Toronto, Canada.
- Cai, L., Wang H., Fu Y. (2013). Freeze-thaw resistance of alkali-slag concrete based on response surface methodology. *Construction and Building Materials*, **49**, 70-76.
- Canbaz, M. (2007). *Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü harçların özellikleri*. Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Chan, C. (2006). *Effect of deicing chemicals on the strength and deterioration of concrete*. Master's Thesis, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada.
- Collins, F. and Sanjayan, J.G. (1999a) Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, **29**, 455-458.
- Çobanoğlu, Ö.C. (2004). *Elazığ Ferrookrom Cürüfunun Betonun Çarpma Dayanımı Üzerine Etkilerinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Davidovits, J. (1994), Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Materials Education*, **16**, 91-139.
- Davidovits J. (1999), Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology (pp:9-40). *Geopolymer '99 International Conference*, June, Saint-Quentin.
- Davidovits J. (2002), 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs (pp:28-29). *Geopolymer 2002 Conference*, October, Melbourne.
- Davidovits J. (2015), *Geopolymer Chemistry and applications*. Institut Geopolymere Saint Quantin, France.
- Detwiler, R.J., Dalgleish, B.J. and Williamson, R.B. (1989). Assessing the durability of concrete in freezing and thawing. *ACI Materials Journal*, **86**, 29-35.
- Ebrahimi, K., Daiezadeh, M.J., Zakertabrizi M., Zahmatkesh F., Korayem, A.H. (2018). A review of the impact of micro- and nanoparticles on freeze-thaw durability of hardened concrete: Mechanism perspective. *Construction and Building Materials*, **186**, 1105-1113.
- Ekinci, E., Türkmen, İ., Kantarcı F., Karakoç M.B. (2019). The improvement of mechanical, physical and durability characteristics of volcanic tuff based

geopolymer concrete by using nano silica, micro silica and Styrene-Butadiene Latex additives at different ratios. *Construction and Building Materials*, **201**, 257-267.

Engin Y. (2019). <http://www.betonvecimento.com/surdurulebilirlik/curuf-el-kitabi> (on-line access on 23 April, 2019).

Erdoğan S.T. (2019). <http://users.metu.edu.tr/sinante/8UBK.pdf> on-line access on 23 April, 2019).

Erdoğan, T.Y. (2003). *Beton*, METU Yayınları, Ankara.

Erdoğan, T.Y. (2016). *Beton*, (6. Baskı), ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara.

Fagerlund, G. (1997). *Freeze thaw Durability of Concrete* (pp:23-41). E&FN Spon, London, UK.

Fu, Y., Cai, L., Wu, Y. (2011), Freeze-thaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete, *Construction and Building Materials*, **25**, 3144-3148.

Glukhovskiy V.D., Rostovskaja G.S., Rumyna G.V. (1980). High strength slag alkaline cements (pp: 164-8). *Proceedings of the seventh international congress on the chemistry of cement*, Paris.

Imbabi, M.S., Carrigan, C., McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*, **1**, 194-216.

Jamal M. K., Roher M. C. (2004), Absorption characteristics of metakaolin concrete. *Cement and Concrete Research*, **34**, 19-29.

Kantarcı F. (2013). *Elazığ ferrokrom cürufundan alkali aktivasyon metoduyla üretilen geopolimer çimentolu betonların yangın dayanımının araştırılması*. Yüksek lisans tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.

Karakoç, M. (2010). *Hafif agreganın ve hava sürükleyici katkı maddesinin yüksek dayanımlı betonun donma çözülme dayanıklılığına etkisinin incelenmesi ve modellenmesi*. Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.

Katsura, O. and Kamada, E. (1997). *Frost Resistance of concrete* (pp:202-211). Taylor&Francis, Oxon, UK, 355p.

Kaya A. O. (2014). *Esnek Üstyapıların Aşınma Tabakasında Elektrik Ark Fırını Cürufunun Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Kroop J. and Hilsdorf H.K. (1995), *Performance Criteria for Concrete Durability*. E&FN Spon, London, UK, 327 p.

Li Z., Ding Z., Zhang Y. (2004). Development of sustainable cementitious materials (pp:55-76). *Proceedings of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Beijing, China.

- Litvan, G.G. (1976). Frost action in cement in the presence of de-icers. *Cement and Concrete Research*, **6**, 351-356.
- Luukkonen T., Abdollahnejad Z., Yliniemi J., Kinnunen P., Illikainen M. (2018). Comparison of alkali and silica sources in one-part alkali-activated blast furnace slag mortar. *Journal of Cleaner Production*, **187**, 171-179.
- Maraş M. (2013). *Elazığ ferrokrom cürufundan üretilen geopolimer çimentolu betonların sülfat direncinin araştırılması*. Yüksek lisans tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- McLellan B.C., Williams R.P., Lay J., Riessen A.V., Corder G.D. (2011). Costs and Carbon Emissions For Geopolymer Pastes in Comparison to Ordinary Portland Cement. *Journal of Cleaner Production*, **19**, 1080-1090.
- McNulty E. (2009). *Geopolymers: An Environmental Alternative to Carbon Dioxide Producing Ordinary Portland Cement*. Senior Comprehensive Paper, The Catholic University of America, Washington.
- Neville A.M. (1997). *Properties of Concrete*, John Wiley & Sons Inc., London, UK, 844 p.
- Neville, A.M. (2000). *Properties of Concrete Technical*, Fourth Edition, Longman Scientific(pp.: 581-585), New York, USA.
- Neville, A.M. (1995). *Properties of Concrete*. Prentice Hall, New Jersey, USA, 872 p.
- Newman, J. and Choo, B.S. (2003). *Advanced Concrete Technology Processes*. Butterworth- Heinemann, Oxford, UK, 704 p.
- Niemelä, P., Kauppi, M. (2007). Production, characteristics and use of ferrochromium slags (pp:171-179). *Infacon XI International Ferroalloys Congress*, February 18-21, Taj Place, New Delhi, India.
- Özcan A., (2018). *Ferrokrom cürufu ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların asit, tuz ve sülfat etkilerine karşı dayanıklılığının araştırılması*. Yüksek lisans tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya
- Özodabaş, A. (2014). *Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Harçlarının Performansının Geliştirilmesi*. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Palomo, A., Macias, A., Blanco, M.T., Puertas, F. (1992). Physical, chemical and mechanical characterization of geopolymers, *Proceedings of the 9th Int. Congress on the Chemistry of Cement*, New Delhi, India, 5, 505-511.
- Pigeon M. and Pleau, R. (1995). *Durability of Concrete In Cold Climates*, E&FN Spon, London; UK, 244 p.
- Pilehvar S., Szczotok A.M., Rodriguez J.F., Valentini L., Lanzon M., Pamies R., Kjonisken, L.A. (2019). Effect of freeze-thaw cycles on the mechanical behavior of geopolymer concrete and Portland cement concrete containing micro-encapsulated phase change materials. *Construction and Building Materials*, **200**, 94-103.

- Polat R. (2007). *Genleştirilmiş perlit ve pomza ile hava sürükleyici katkının betonda kılcal geçirimsizlik ve don hasarına etkisi*. Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Powers, T.C. and Helmut, R.A. (1953). Theory of volume changes in hardened cement paste during freezing. *Proc. Highway Res. Brd.*, **32**, 285-297.
- Proctor, D.M. et al. (2000), Physical and Chemical Characteristics of Blast Furnace Basic Oxygen Furnace and Electric Arc Furnace Steel Industry Slags. *Environment Science and Technology*, **34**, (8), 1576-1582.
- Provis J.L., Duxon P., Deventer V.J.S.J., Lukey G.C. (2005). The role of mathematical modelling and gel chemistry in advancing geopolymers technology. *Chemical Engineering Research and Design*, **83**, 853-860.
- Rangan, B.V. (2008). *Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. Research report, Curtin University of Technology, Perth.
- Salem, R.M. (1996). *Strength and durability characteristics of recycled aggregate concrete*. PhD Thesis, The University of Tennessee, Knoxville.
- Setzer M.J. (1997). *Action of Frost and Deicing Chemicals* (pp:1-22). E&FN Spon, London, UK
- Shahrajabian, F., Behfarnia, K. (2018). The effects of nano particles on freeze and thaw resistance of alkali-activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, **176**, 172-178.
- Shi, C., Krivenko, P. V., Roy, D. (2006), *Alkali-Activated Cements and Concretes*. CRC Press, London, UK, 392 p.
- Slavik, R., Bednarik V., Vondruska M., Nemec A. (2008). Preparation of geopolymer from fluidized bed combustion bottom ash. *Journal of materials processing technology*, **200**, 265-270
- Sommerville G. (2000). *A Holistic Approach To Structural Durability Design Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century* (p: 41- 56). E&FN Spon, Oxon, UK.
- Stevenson, J. (1997). *Slag Characterization and Utilization*. Research Experience, Langston University, Langston, OK.
- Sun, P., Wu, H. (2013). Chemical and freeze-thaw resistance of fly ash-based inorganic mortars. *Fuel*, **111**, 740-745.
- Şahin, R., Taşdemir, M.A., Gül, R., Çelik, C. (2003). Betonun don hasarının mekanik deneylerle analizi (s:333-343). 5. *Ulusal Beton Kongresi*, 01-03 Ekim, İstanbul.
- Şengül, Ö., Taşdemir, C., Kuruç, Ş., Sönmez, R. (2003). Agregat Türünün Betonun Donma-Çözülme Dayanıklılığına Etkisi. *III. Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, 03-04 Aralık, İstanbul.

- Şimşek, O. (2010). *Beton Bileşenleri ve Beton Deneyleri*. Seçkin Yayıncılık A.Ş., Ankara, 384 s.
- Taşdemir, A. (2006). *Enjeksiyon Yöntemiyle Üretilen Kristal Yapılı Ferrokrom Cürufu Katkılı Betonların Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Temuujin, J., Minjigmaa, A., Davaabal, B., Bayarzul, U., Ankhtuya, A., Jadambaa, Ts. (2014). Utilization of radioactive high-calcium Mongolian flyash for the preparation of alkali-activated geopolymers for safe use as construction materials. *Ceramics International*, **40**, 16475-16483.
- Thokchom, S., Ghosh, P., Ghosh, S. (2009), Effect of Na₂O Content on Durability of Geopolymer Mortars in Sulphuric Acid, *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, **3**,(3), 193-198.
- Tokay, M. ve Erdoğan, K. (2002). *Cüruflar ve Cürufu Çimentolar*. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- Tokay, M., Erdoğan, K. (2009). *Cüruflar ve cürufu çimentolar*. TÇMB / AR-GE Enstitüsü, Ankara, 48 s.
- Tokay, M., ve Erdoğan, K. (2011). *Cüruflar ve Cürufu Çimentolar*. TÇMB Yayınları, Fersa Matbaacılık, Ankara, 49 p..
- Topçu İ.B, Toprak M.U., (2009). Alkalilerle aktive edilen taban küllü hafif harç üretimi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt:XXII, Sayı:2.
- Topçu İ.B., Toprak, M.U., Uygunoğlu, T. (2014). Durability and microstructure characteristics of alkali activated coal bottom ash geopolymer cement. *Journal of Cleaner Production*, **81**, 211-217.
- Toprak M. (2011). *Termik Santral Taban Küllerinden Alkali Aktivasyon ile Geopolimer Üretilmesi*, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir
- 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 3526 (1980). *Beton agregalarında özgül ağırlık ve su emme oranı tayini*. TSE, Ankara.
- TS 706 EN 12620+A1 (2009). *Beton agregaları*. TSE, Ankara.
- TS 802 (2016). *Beton karışım tasarımı hesap esasları*. TSE, Ankara.
- TS EN 12390-3/AC (2012). *Beton – Sertleşmiş beton deneyleri – Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini*. TSE, Ankara.
- TS EN 932-2 (1999). *Agregaların genel özellikleri için deneyler bölüm 2: Laboratuvar numunelerin azaltılması metodu*. TSE, Ankara.

- TS EN 933-1 (2015). *Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini – Eleme yöntemi*. TSE, Ankara.
- TS ISO 3310-2 (2015). *Deney elekleri – Teknik özellikler ve deneyler – Bölüm 2: Delikli metal plakalı deney elekleri*. TSE, Ankara.
- Ulu C. (2016). *Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufllu ve Metakaolinli Harçlarda Atık Pet Agregası Kullanımının Araştırılması*. Yüksek lisans tezi, Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde.
- Vapur, H., Top, S., Teymen, A., Türkmenoğlu, M. (2013). Elazığ ferrokrom tesisi cürufllarının agrega özelliklerinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(1), 77-88.
- Yadollahi M.M., Benli A., Demirboğa R. (2015). The effects of silica modulus and aging on compressive strength of pumice-based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, **94**, 767-774.
- Yakupoğlu A. (2010). *Alkalilerle aktive edilmiş cürufllu harçların özellikleri*. Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Yalçın, H. ve Gürü, M. (2006). *Çimento ve Beton*, Palme Yayıncılık, Ankara.
- Yang, Z. (2004). *Assessing Cumulative Damage in Concrete And Quantifying Its Influence On Life Cycle Performance Modeling*. PhD Thesis, Purdue University, Indiana.
- Yao X., Zhang Z., Zhu H., Chen Y. (2009). Geopolymerization Process of Alkali–Metakaolinite Characterized by Isothermal Calorimetry. *Thermochimica Acta*, **493**, 49-54.
- Yazıcı A., Kaya M. (2003). Ferrokrom Cürufunun Karakterizasyonu, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **15**(4), 539-548.
- Yılmaz, A., Süttaş, İ. (2008). Ferrokrom cürufunun yol temel malzemesi olarak kullanımı. *İMO Teknik Dergi*, **294**, 4455-4470.
- Zhao M., Zhang G., Htet W.K., Kwon M., Liu C., Xu Y., Tao M. (2019). Freeze-thaw durability of red mud slurry-class F fly ash-based geopolymer: Effect of curing conditions. *Construction and Building Materials*, **215**, 381-390.
- Zhu, H., Liang, G., Xu, J., Wu, Q., Du, J. (2019). Surface-modification of fly ash and its effect on strength and freezing resistance of slag based geopolymer. *Construction and Building Materials*, **199**, 574-580.
- Zivica, V. (2006). Effectiveness of new silica fume alkali activator. *Cement and Concrete Composites*, **28** (1), 21-25.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Mustafa ÖZDAL

Doğum Yeri ve Tarihi: Ankara - 22.02.1984

Adres: İş Turkuaz Caddesi İş Turkuaz Sitesi A1 Blok No:2 Bağlıca
Etimesgut/ANKARA

E-Posta: ozdal.mustafa2014@yandex.com

Lisans: Dokuz Eylül Üniversitesi

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

İmar İnşaat Proje Müş. ve Madencilik Ltd. Şti. (2009-2010)

Sim Yapı Müh. İnş. San. Tic. Ltd. Şti. (2011-2016)

Kam Ankara Beton Sanayi A.Ş. (2017- devam ediyor)

B. Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (*Proceedings*) basılan bildiriler :

1. Özdal M., Özcan A., Karakoç M.B., "Investigation of the Freeze-Thaw Effect on Compressive Strengths of Elazığ Ferrochrome Slag Based Geopolymer Concretes", 2nd International Congress on Engineering and Architecture (ENAR-2019), MUĞLA, TÜRKİYE, 22-24 Nisan 2019, vol.2, pp.1434-1439.