

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FERROKROM CÜRUFU VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KULLANILARAK
ÜRETİLEN GEOPOLİMER BETONLARIN ASİT, TUZ VE SÜLFAT
ETKİLERİNE KARŞI DAYANIKLILIĞININ ARAŞTIRILMASI**



AHMET ÖZCAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEMMUZ 2018

Tezin Başlığı: Ferrokrom Cürufu ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Asit, Tuz ve Sülfat Etkilerine Karşı Dayanıklılığının Araştırılması

Tezi Hazırlayan: Ahmet ÖZCAN

Sınav Tarihi: 18.07.2018

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

Doç. Dr. Rıza POLAT
Atatürk 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 Asit, Tuz ve Sülfat 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.

Ahmet ÖZCAN



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FERROKROM CÜRUFU VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KULLANILARAK ÜRETİLEN GEOPOLİMER BETONLARIN ASİT, TUZ VE SÜLFAT ETKİLERİNE KARŞI DAYANIKLILIĞININ ARAŞTIRILMASI

Ahmet ÖZCAN

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

119 + xiii sayfa

2018

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

Bu çalışmada bağlayıcı olarak Elazığ ferrokrom cürufu (EFC) ve yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılarak üretilen geopolimer betonların asit, tuz ve sülfat 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 numuneleri 28 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra %5 konsantrasyonuna sahip fosforik asit, hidroklorik asit, hidroflorik asit, sülfürik asit, sodyum klorür, magnezyum klorür, magnezyum sülfat ve sodyum sülfat çözeltilerine 12 hafta boyunca maruz bırakılmıştır. Bu süreç de numunelerin basınç dayanımları, ultrasonik ses hızları (UPV), ağırlık ve boy değişimleri belirlenmiş ve görsel değişimleri ile içyapıları incelenmiştir. Deney sonuçları, aynı yaştaki kontrol numunelerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, geopolimer betonların basınç dayanımları açısından en fazla etkiyi sırasıyla; sülfürik asit, hidroflorik asit, hidroklorik asit, fosforik asit, sodyum sülfat, magnezyum sülfat, magnezyum klorür ve sodyum klorür çözeltileri meydana getirmiştir. Numuneler görsel olarak incelendiğinde tuz ve sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerde herhangi bir bozulma görülmezken, asit çözeltilerinde ise; sülfürik asit, hidroflorik asit ve fosforik asit çözeltilerine maruz kalan numunelerin yüzeylerinde çatlaklar oluşmuş ve numune yüzeyleri bozulmuştur. Hidroklorik asit çözeltisine maruz kalan numunelerin yüzeyinde çatlak oluşmamış ancak numunelerin renginde koyulaşma olduğu görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELE: Geopolimer beton, Elazığ ferrokrom cürufu, yüksek fırın cürufu, asit etkisi, tuz etkisi, sülfat etkisi

ABSTRACT

Master of Science Thesis

INVESTIGATION OF THE DURABILITY OF GEOPOLYMER CONCRETES PRODUCED BY USING FERROCHROME SLAG AND BLAST FURNACE SLAG AGAINST TO ACID, SALT AND SULFATE EFFECTS

Ahmet ÖZCAN

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

119 + xiii pages

2018

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

In this study, durability of geopolymer concretes produced by using Elazığ ferrochrome slag (EFC) and blast furnace slag (YFC) as binder against to acid, salt and sulfate effects was investigated. For this purpose, 5 groups of geopolymer concretes 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 phosphoric acid, hydrochloric acid, hydrofluoric acid, sulfuric acid, sodium chloride, magnesium chloride, magnesium sulfate and sodium sulfate solutions with a concentration of 5% for 12 weeks after completing curing periods of 28 days. In this process, compressive strengths, ultrasonic pulse velocities (UPV), weight and length 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 at the same age. Based on the results of experiment, the compressive strengths of geopolymer concretes were most affected by sulfuric acid followed by hydrofluoric acid, hydrochloric acid, phosphoric acid, sodium sulfate, magnesium sulfate, magnesium chloride and sodium chloride solutions. When the samples were examined visually, no deterioration is observed in the samples held in the salt and sulfate solutions, while in the acid solutions; the surface of the samples exposed to sulfuric acid, hydrofluoric acid and phosphoric acid solutions were formed the cracks and sample surfaces were deteriorated. The surface of samples exposed to the hydrochloric acid solution had no cracks but darkened in the color of the samples.

KEYWORDS: Geopolymer concrete, Elazığ ferrochrome slag, blast furnace slag, acid effect, salt effect, sulfate 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;

Çalışmama deney aşamasında yardımcı olan Sayın İnşaat Mühendisi Mustafa ÖZDAL'a;

Çalışmama 2016/115 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 bütün hayatım boyunca olduğu gibi, yüksek lisans eğitimim süresince de maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1. Geopolimer	3
2.1.1. Geopolimer kimyası	3
2.1.2. Geopolimer betonun avantajları	6
2.1.3. Geopolimerin önündeki engeller	7
2.2. Elazığ Ferrokrom Cürufu (EFC)	8
2.2.1. Ferrokrom cürufunun üretilmesi	8
2.2.2. Ferrokrom cürufunun fiziksel ve kimyasal yapısı	9
2.2.3. Ferrokrom cürufu kullanım alanları	10
2.2.4. Ferrokrom cürufu kullanılarak yapılan çalışmalar	10
2.3. Yüksek Fırın Cürufu (YFC)	12
2.3.1. Yüksek fırın cürufunun elde edilmesi	12
2.3.2. Yüksek fırın cürufu esaslı bağlayıcılar	14
2.4. Betonda Asit Etkisi	17
2.5. Betonda Tuz Etkisi	24
2.6. Betonda Sülfat Etkisi	25
2.6.1. Dış kaynaklı sülfat saldırısı	26
2.6.2. İç kaynaklı sülfat saldırısı	28
3. MATERYAL ve YÖNTEM	31
3.1. Materyal	31
3.1.1. Elazığ ferrokrom cürufu ve özellikleri	31
3.1.2. Yüksek fırın cürufu ve özellikleri	32
3.1.3. Aktivatörler	33

3.1.4.	Agrega.....	33
3.1.5.	Asitler	34
3.1.6.	Tuzlar	34
3.1.7.	Sülfatlar.....	35
3.1.8.	Aletler	36
3.1.8.1.	Elekler.....	36
3.1.8.2.	Beton karışım mikseri.....	37
3.1.8.3.	Çelik kalıplar	37
3.1.8.4.	Etüv.....	38
3.1.8.5.	Basınç dayanım cihazı	38
3.1.8.6.	Ultrasonik ses hızı ölçüm cihazı.....	39
3.1.8.7.	Terazi	39
3.1.8.8.	pH metre	40
3.1.8.9.	Boy değişimi ölçüm çerçevesi	40
3.1.8.10.	SEM cihazı.....	41
3.1.9.	Diğer malzemeler	41
3.2.	Yöntem	41
3.2.1.	Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler	42
3.2.2.	Geopolimer beton karışım seçeneklerinin belirlenmesi	42
3.2.3.	Geopolimer beton üretimi, numunelerin yerine konması ve bakımı.....	44
3.2.4.	Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler	45
3.2.4.1.	Basınç dayanımı	45
3.2.4.2.	Ultrasonik ses hızı ölçümü.....	46
3.2.4.3.	Ağırlık değişimi.....	47
3.2.4.4.	Boy değişimi	47
3.2.4.5.	SEM analizi.....	47
3.2.4.6.	Asit etkisi	48
3.2.4.7.	Tuz etkisi.....	48
3.2.4.8.	Sülfat etkisi	49
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	50
4.1.	Agrega Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma.....	50
4.2.	Sertleşmiş Beton Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma.....	50
4.3.	Kontrol Numuneleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma.....	52

4.3.1.	Kontrol numunelerin basınç dayanımları	52
4.3.2.	Kontrol numunelerin UPV ölçümleri	53
4.3.3.	Kontrol numunelerin ağırlık değişimleri	55
4.3.4.	Kontrol numunelerin boy değişimleri	56
4.3.5.	Kontrol numunelerin görsel incelemeleri	57
4.4.	Asit Etkisine Maruz Kalan Geopolimer Beton Numuneleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma	57
4.4.1.	Asit etkisindeki numunelerin basınç dayanımları	57
4.4.2.	Asit etkisindeki numunelerin UPV ölçümleri	63
4.4.3.	Asit etkisindeki numunelerin ağırlık değişimleri	66
4.4.4.	Asit etkisindeki numunelerin boy değişimleri	71
4.4.5.	Asit etkisindeki numunelerin görsel incelemeleri	74
4.5.	Tuz Etkisine Maruz Kalan Geopolimer Beton Numuneleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma	76
4.5.1.	Tuz etkisindeki numunelerin basınç dayanımları	77
4.5.2.	Tuz etkisindeki numunelerin UPV ölçümleri	80
4.5.3.	Tuz etkisindeki numunelerin ağırlık değişimleri	82
4.5.4.	Tuz etkisindeki numunelerin boy değişimleri	84
4.5.5.	Tuz etkisindeki numunelerin görsel incelemeleri	86
4.6.	Sülfat Etkisine Maruz Kalan Geopolimer Beton Numuneleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma	87
4.6.1.	Sülfat etkisindeki numunelerin basınç dayanımları	87
4.6.2.	Sülfat etkisindeki numunelerin UPV ölçümleri	91
4.6.3.	Sülfat etkisindeki numunelerin ağırlık değişimleri	94
4.6.4.	Sülfat etkisindeki numunelerin boy değişimleri	96
4.6.5.	Sülfat etkisindeki numunelerin görsel incelemeleri	98
4.7.	İçyapı Analizi	100
4.7.1.	Asit etkisindeki numunelerin içyapı analizleri	101
4.7.2.	Tuz etkisindeki numunelerin içyapı analizleri	104
4.7.3.	Sülfat etkisindeki numunelerin içyapı analizleri	105
5.	SONUÇ ve ÖNERİLER	108
6.	KAYNAKLAR	110
	ÖZGEÇMİŞ	119

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1.	Geopolimerlerin alkali aktivasyonu için tanımlayıcı model.....	5
Şekil 2. 2.	Geopolimerizasyon işlemi	6
Şekil 2. 3.	Ferrokrom fırınındaki tipik indirgeme reaksiyonları.....	8
Şekil 2. 4.	Ferrokrom cürufunun kimyasal kompozisyonu	10
Şekil 2. 5.	Granülasyon yönteminin şematik gösterimi	13
Şekil 2. 6.	Peletleme yönteminin şematik gösterimi.....	14
Şekil 2. 7.	Asit etkisiyle betonun bozulması	18
Şekil 2. 8.	Geopolimerlerin asit çözeltisi ile etkileşimi	20
Şekil 3. 1.	Değirmen	32
Şekil 3. 2.	Doğal, öğütülmüş ve elenmiş EFC.....	32
Şekil 3. 3.	Agrega.....	34
Şekil 3. 4.	Deneyde kullanılan asitler.....	34
Şekil 3. 5.	Deneyde kullanılan tuzlar	35
Şekil 3. 6.	Deneyde kullanılan sülfatlar	35
Şekil 3. 7.	Elekler.....	36
Şekil 3. 8.	Beton karışım mikseri.....	37
Şekil 3. 9.	Çelik kalıplar.....	37
Şekil 3. 10.	Etüv.....	38
Şekil 3. 11.	Basınç dayanımı test cihazı.....	38
Şekil 3. 12.	UPV ölçüm cihazı	39
Şekil 3. 13.	Terazi	39
Şekil 3. 14.	pH metre	40
Şekil 3. 15.	Boy değişimi ölçüm çerçevesi	40
Şekil 3. 16.	SEM cihazı.....	41
Şekil 3. 17.	Kalıpların etüve konması	44
Şekil 3. 18.	Geopolimer beton numuneleri.....	45
Şekil 3. 19.	Numunelerin yerleştirildiği asit çözeltileri	48
Şekil 3. 20.	Numunelerin yerleştirildiği tuz çözeltileri	49
Şekil 3. 21.	Numunelerin yerleştirildiği sülfat çözeltileri	49
Şekil 4. 1.	Geopolimer beton numunelerin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri	51
Şekil 4. 2.	Kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonraki basınç dayanım değerleri.....	53
Şekil 4. 3.	Kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonraki UPV değerleri	54

Şekil 4. 4.	Kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonraki ağırlık değişimleri.....	55
Şekil 4. 5.	Kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonraki boy değişimleri.....	56
Şekil 4. 6.	Kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonra 12 hafta sonundaki görünüşleri	57
Şekil 4. 7.	%5 H ₃ PO ₄ çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri	60
Şekil 4. 8.	%5 HCl çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri	60
Şekil 4. 9.	%5 HF çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri.....	61
Şekil 4. 10.	%5 H ₂ SO ₄ çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri	61
Şekil 4. 11.	%5 H ₃ PO ₄ çözeltisindeki numunelerin UPV değerleri	65
Şekil 4. 12.	%5 HCl çözeltisindeki numunelerin UPV değerleri	65
Şekil 4. 13.	%5 H ₂ SO ₄ çözeltisindeki numunelerin UPV değerleri	66
Şekil 4. 14.	%5 H ₃ PO ₄ çözeltisindeki numunelerin ağırlık değişimleri.....	68
Şekil 4. 15.	%5 HCl çözeltisindeki numunelerin ağırlık değişimleri	68
Şekil 4. 16.	%5 HF çözeltisindeki numunelerin ağırlık değişimleri.....	69
Şekil 4. 17.	%5 H ₂ SO ₄ çözeltisindeki numunelerin ağırlık değişimleri.....	69
Şekil 4. 18.	%5 H ₃ PO ₄ çözeltisindeki numunelerin boy değişimleri.....	73
Şekil 4. 19.	%5 HCl çözeltisindeki numunelerin boy değişimleri.....	73
Şekil 4. 20.	%5 HF çözeltisindeki numunelerin boy değişimleri	74
Şekil 4. 21.	%5 H ₂ SO ₄ çözeltisindeki numunelerin boy değişimleri.....	74
Şekil 4. 22.	%5 H ₃ PO ₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin görünüşleri.....	75
Şekil 4. 23.	%5 HCl çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin görünüşleri	75
Şekil 4. 24.	%5 HF çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin görünüşleri.....	75
Şekil 4. 25.	%5 H ₂ SO ₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin görünüşleri.....	76
Şekil 4. 26.	%5 NaCl çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri	78
Şekil 4. 27.	%5 MgCl ₂ çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri	79
Şekil 4. 28.	%5 NaCl çözeltisindeki numunelerin UPV değerleri.....	81
Şekil 4. 29.	%5 MgCl ₂ çözeltisindeki numunelerin UPV değerleri	82
Şekil 4. 30.	%5 NaCl çözeltisindeki numunelerin ağırlık değişimleri.....	83
Şekil 4. 31.	%5 MgCl ₂ çözeltisindeki numunelerin ağırlık değişimleri.....	84
Şekil 4. 32.	%5 NaCl çözeltisindeki numunelerin boy değişimleri.....	85
Şekil 4. 33.	%5 MgCl ₂ çözeltisindeki numunelerin boy değişimleri.....	86
Şekil 4. 34.	%5 NaCl çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin görünüşleri.....	86

Şekil 4. 35.	%5 $MgCl_2$ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin görünümleri.....	86
Şekil 4. 36.	%5 $MgSO_4$ çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri	88
Şekil 4. 37.	%5 Na_2SO_4 çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri	89
Şekil 4. 38.	%5 $MgSO_4$ çözeltisindeki numunelerin UPV değerleri	93
Şekil 4. 39.	%5 Na_2SO_4 çözeltisindeki numunelerin UPV değerleri.....	93
Şekil 4. 40.	%5 $MgSO_4$ çözeltisindeki numunelerin ağırlık değişimleri	95
Şekil 4. 41.	%5 Na_2SO_4 çözeltisindeki numunelerin ağırlık değişimleri.....	95
Şekil 4. 42.	%5 $MgSO_4$ çözeltisindeki numunelerin boy değişimleri.....	97
Şekil 4. 43.	%5 Na_2SO_4 çözeltisindeki numunelerin boy değişimleri	98
Şekil 4. 44.	%5 $MgSO_4$ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin görünümleri.....	99
Şekil 4. 45.	%5 Na_2SO_4 çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin görünümleri.....	99
Şekil 4. 46.	Suda kür edilen geopolimer betonların SEM görüntüleri; (a) E0, (b) E50, (c) E100.....	101
Şekil 4. 47.	%5 H_3PO_4 çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin SEM görüntüleri; (a) E0, (b) E100.....	102
Şekil 4. 48.	%5 HCl çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin SEM görüntüleri; (a) E0, (b) E100.....	102
Şekil 4. 49.	%5 HF çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin SEM görüntüleri; (a) E0, (b) E100.....	103
Şekil 4. 50.	%5 H_2SO_4 çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin SEM görüntüleri; (a) E0, (b) E100.....	104
Şekil 4. 51.	%5 $NaCl$ çözeltisinde 12 hafta bekletilen E0 kodlu geopolimer betonun SEM görüntüsü	105
Şekil 4. 52.	%5 $MgCl_2$ çözeltisinde 12 hafta bekletilen E0 kodlu geopolimer betonun SEM görüntüsü	105
Şekil 4. 53.	%5 $MgSO_4$ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin SEM görüntüleri; (a) E0, (b) E100.....	106
Şekil 4. 54.	%5 Na_2SO_4 çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin SEM görüntüleri; (a) E0, (b) E100.....	106

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2. 1.	Farklı endüstri kollarında ortaya çıkan asitler.....	18
Çizelge 2. 2.	Değişik asitlerin beton üzerindeki etkisi.....	19
Çizelge 2. 3.	Bazı tuz kristallerinin yoğunluğu ve molar hacimleri	25
Çizelge 3. 1.	Elazığ ferrokrom cürufu ve yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimleri	31
Çizelge 3. 2.	Sodyum hidroksit ve sodyum metasilikatın kimyasal özellikleri.....	33
Çizelge 3. 3.	Asit, tuz ve sülfat çözeltilerinin pH değerleri	36
Çizelge 3. 4.	Geopolimer beton kodları	43
Çizelge 3. 5.	Karışımında kullanılan malzeme miktarları (1 m ³ geopolimer beton için)	43
Çizelge 4. 1.	Agreganın özgül ağırlık ve su emme oranı	50
Çizelge 4. 2.	Geopolimer beton numunelerin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri	51
Çizelge 4. 3.	Kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonraki basınç dayanım değerleri.....	52
Çizelge 4. 4.	Kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonraki UPV ölçümleri	54
Çizelge 4. 5.	Kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonraki ağırlık değişimleri	55
Çizelge 4. 6.	Kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonraki boy değişimleri	56
Çizelge 4. 7.	Asit çözeltilerinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri	59
Çizelge 4. 8.	Asit çözeltilerinde bekletilen numunelerin UPV ölçümleri.....	64
Çizelge 4. 9.	Asit çözeltilerinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri	67
Çizelge 4. 10.	Asit çözeltilerinde bekletilen numunelerin boy değişimleri	72
Çizelge 4. 11.	Tuz çözeltilerinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri	78
Çizelge 4. 12.	Tuz çözeltilerinde bekletilen numunelerin UPV ölçümleri	81
Çizelge 4. 13.	Tuz çözeltilerinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri	83
Çizelge 4. 14.	Tuz çözeltilerinde bekletilen numunelerin boy değişimleri.....	85
Çizelge 4. 15.	Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri	88
Çizelge 4. 16.	Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin UPV ölçümleri	92
Çizelge 4. 17.	Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri	94
Çizelge 4. 18.	Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin boy değişimleri	97

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

H ₂ SO ₄	Sülfürik asit
H ₃ PO ₄	Fosforik asit
HCl	Hidroklorik asit
HF	Hidroflorik asit
MgCl ₂	Magnezyum klorür
MgSO ₄	Magnezyum sülfat
Ms	SiO ₂ /Na ₂ O (Silis modülü)
Na ₂ O	Sodyum oksit
Na ₂ SiO ₃	Sodyum metasilikat
Na ₂ SO ₄	Sodyum sülfat
NaCl	Sodyum klorür
NaOH	Sodyum hidroksit

Kısaltmalar

Açıklama

ASTM	American Society for Testing and Materials
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
PÇ	Portland çimentosu
s/b	Su/bağlayıcı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TS	Türk Standartları
UK	Uçucu kül
UPV	Ultrasonik ses hızı
YFC	Yüksek fırın cürufu

1. GİRİŞ

Dünyanın en önde gelen sektörlerinden biri olan inşaat sektörünün olmazsa olmazı betondur. Betonun en maliyetli bileşeni ise çimentodur. Portland çimentosu (PÇ) nun hem maliyet olarak hem de üretim aşamasında çevreye verdiği zarardan dolayı sürekli olarak alternatifi aranmaktadır. Bu bağlamda çevreci beton için yapılan çalışmalar hız kazanmaktadır.

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

Dünyada yüksek karbonlu ferrokrom üretimi 2005 yılında 6 milyon tona ulaşmıştır ve bu üretim 2004 yılından bu yana %2.8 oranında artmıştır (Niemelä ve Kauppi, 2007). Dünya kromit rezervleri yaklaşık %45 Cr₂O₃ içeriğiyle 7.6 milyar tondur. Türkiye'deki kromit rezervleri yaklaşık 30.4 milyon tondur ve bu miktar dünya rezervinin %0.4'nü oluşturmaktadır (Aydın vd., 2007). Türkiye'de, Antalya Ferrokrom İşletmesi ve Elazığ Ferrokrom İşletmesi olmak üzere endüstriyel olarak iki yerde ferrokrom cürufu çıkmaktadır. Cüruflar stok alanlarında depolanıp, bu cüruflardan tam olarak faydalanılmamaktadır (Yılmaz ve Süttaş, 2008). Elazığ merkezli ETİ Krom, dünyanın en büyük yüksek karbonlu ferrokrom üreticisi durumundadır (Vapur vd., 2013). Bu çalışmada, geopolimer beton dayanıklılığına etkisini incelemek amacıyla atıl durumda olan Elazığ ferrokrom cürufu (EFC) kullanılmıştır.

2006 yılı sonunda Türkiye'de üretilen demir çelik üretimi 23 milyon ton olup, bu miktar ile Türkiye dünya çelik üretiminde 11. sıradadır. Dünyadaki demir çelik üretiminin ise %1.87'lik kısmı Türkiye'de üretilmiştir. 2014 yılının ilk 10 ayında ise 34 milyon ton ham çelik üretimi ile dünya çelik üretiminde Türkiye 8. sırada yer almıştır. Demir çelik üretiminde önemli miktarda yüksek fırın cürufu (YFC)

oluşmaktadır. (Topçu ve Canbaz, 2008; Mutlugeldi, 2015). Geopolimer beton dayanıklılığına etkisini incelemek amacıyla bu çalışmada YFC kullanılmıştır.

Bu çalışmanın amacı EFC ve YFC kullanılarak geopolimer betonlar üretmek ve üretilen bu geopolimer betonların asit, tuz ve sülfat etkilerine karşı dayanıklılığını belirlemektir. Bu çalışmada bağlayıcı olarak EFC ve YFC, alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum metasilikat, agrega olarak dere agregası kullanılmıştır. Geopolimer beton karışımlarında silis modülü 1.5, NaOH çözeltisinin molaritesi 10 M, Na₂O içeriği %10 ve su/bağlayıcı (s/b) oranı 0.43 olarak belirlenmiştir. Geopolimer beton karışımları 50x50x50 mm ve 40x40x160 mm boyutlarındaki çelik kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıplar etüvde 80 °C sıcaklıkta 24 saat bekledikten sonra numuneler kalıplardan çıkarılıp 27 gün boyunca 23 ± 1 °C sıcaklıktaki kür havuzunda kür edilmiştir. Üretilen numuneler kür sürelerini tamamladıktan sonra %5 konsantrasyonundaki fosforik asit, hidroklorik asit, hidroflorik asit, sülfürik asit, sodyum klorür, magnezyum klorür, magnezyum sülfat ve sodyum sülfat çözeltilerinde 12 hafta süresince bekletilmiştir. Bu süreçte, 1, 2, 4, 6, 8, 10 ve 12 haftalık periyotlarda numunelerin ağırlık ve boy değişimleri belirlenmiş ve görsel değişimleri incelenmiştir. 4, 8 ve 12 haftalık periyotlarda ise numunelerin basınç dayanımları ve ultrasonik ses hızları (UPV) ölçülmüştür. Bu sonuçlar aynı yaştaki suda bekletilen kontrol numunelerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. 12 hafta çözeltilere maruz kalan numunelerin içyapı analizleri de incelenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Geopolimer

Davidovits'in 1978'de geopolimer bağlayıcıları tanıtmasından itibaren, geopolimer bağlayıcıları üretmek birçok mühendisliğin ve kimya alanının ilgisini çekmiştir. Geopolimer bağlayıcıların çevre dostu olmalarının yanı sıra asit ve sülfat saldırılarına karşı gösterdikleri direnç ve yüksek erken dayanımlarının belirlenmesi nedeniyle PÇ'ye bir alternatif olarak görülmektedir (Thokchom vd., 2009).

CO₂ emisyonu esasen çimento üretimi için fosil yakıtların yakılması ve kireçtaşının ayrışmasından dolayı oluşmaktadır, aynı zamanda öğütme ve taşıma da çimento endüstrisinin çevresel zararlarında önemli etkenlerdir. Çimento endüstrisi sınırlandırılmış karbon endüstrisinde alternatif bağlayıcı olmasını kabul etmeye başlamaktadır. CO₂ emisyonunu azaltan ve aynı zamanda bazı avantajları da bulunan alternatif bağlayıcı sistemleri bulunmaktadır (Van Deventer vd., 2012). PÇ'ye alternatif bağlayıcılar olarak; kalsiyum sülfatlı alüminat içeren çimentolar, magnezyum çimentosu, magnezyum fosfat sistemi ve alkali ile aktif edilmiş malzemeler ya da geopolimerler görülmektedir (Juenger vd., 2011; Van Deventer vd., 2012).

Kireç ve normal PÇ'den sonra geopolimer üçüncü nesil bağlayıcı olarak düşünülmektedir. Geopolimer terimi genellikle bir amorf alüminosilikatı tanımlamak için kullanılır. Aynı zamanda geobağlayıcılar, inorganik polimerler, alkali aktive edilmiş bağlayıcılar, alkali bağlanmış seramikler, hidroseramikler vb. içinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kadar çok terim olmasına rağmen, bu terimlerin hepsi aynı kimya kullanılarak sentezlenen malzemeleri tanımlamaktadır (Singh vd., 2015). Yüksek dayanım, durabilite ve çevresel etkilerinin düşük olması nedeniyle, PÇ'nin alternatifi olarak alkali ile aktif edilmiş bağlayıcılara olan ilgi artmaktadır (Juenger vd., 2011).

2.1.1. Geopolimer kimyası

Esas olarak geopolimerler tekrarlanan silikat monomerlerinden (-Si-O-Al-O-) oluşmaktadır. Geopolimerizasyon teknolojisinde kaolin, feldispat ve endüstriyel katı atıklar (UK, cüruf, madencilik atıkları vb.) gibi çeşitli alüminosilikat malzemeler katı hammaddeler olarak kullanılmaktadır. Bu alüminosilikat kaynakların reaktivlikleri bu

malzemelerin kimyasal mineralojik kompozisyonlarına, yapılarına, morfolojilerine, inceliklerine ve camsı faz içeriklerine bağlıdır. Kaynak malzemelerinin amorf olması ve yeterli reaktif camsı içeriğe sahip olması geopolimer için ana kriterdir. Alüminosilikat malzemelerin aktif edilmesinde sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3), potasyum hidroksit (KOH) ve potasyum silikat (K_2SiO_3) gibi alkali aktivatörler kullanılmaktadır. NaOH'e göre KOH'in alkalilik seviyesi yüksek olmasına rağmen NaOH daha fazla silikat ve alüminat monomeri oluşturma kapasitesine sahiptir (Singh vd., 2015).

Geopolimer hamurların özelliklerini etkileyen en önemli faktörler; $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı, $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}$ oranı, $\text{R}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı ($\text{R} = \text{Na}^+$ veya K^+) ve sıvı/katı oranıdır. Basınç dayanımı ile $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}$ oranı arasındaki ilişkiye bakıldığında alkali içeriğindeki artış veya silikat içeriğindeki azalış geopolimerlerin basınç dayanımını arttırmaktadır. De Silva vd. (2007) ve De Vargas vd. (2011)'in belirttiğine göre genellikle optimum geopolimer dayanımı, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 3 ile 3.8 arasında ve $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 1 olarak seçildiğinde elde edilmiştir. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranının bu aralık dışından seçilmesi durumunda düşük dayanım elde edilmiştir. Başlangıç karışımındaki $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranının artması geopolimer hamurların priz süresini arttırmıştır (Singh vd., 2015).

Geopolimer yapının oluşumu, üç boyutlu bir ağ yapısını oluşturan $[\text{SiO}_4]$ ve $[\text{AlO}_4]$ dört yüzlünün kopma ve yeniden yapılanma işlemidir (Chen vd., 2018). Geopolimerler, inorganik polimerlerin yapılarındaki Si/Al oranına bağlı olarak üç sınıftan oluşmaktadır. Bunlar;

- a) Poli (sialat) (-Si-O-Al-O-)
- b) Poli (sialat-silokso) (-Si-O-Al-O-Si-O-)
- c) Poli (sialat-disilokso) (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)

Farklı Al ve Si temel yapılarının her birinin dağılımı ve relatif miktarları ürünün fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkilemektedir (Bondar, 2013).

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

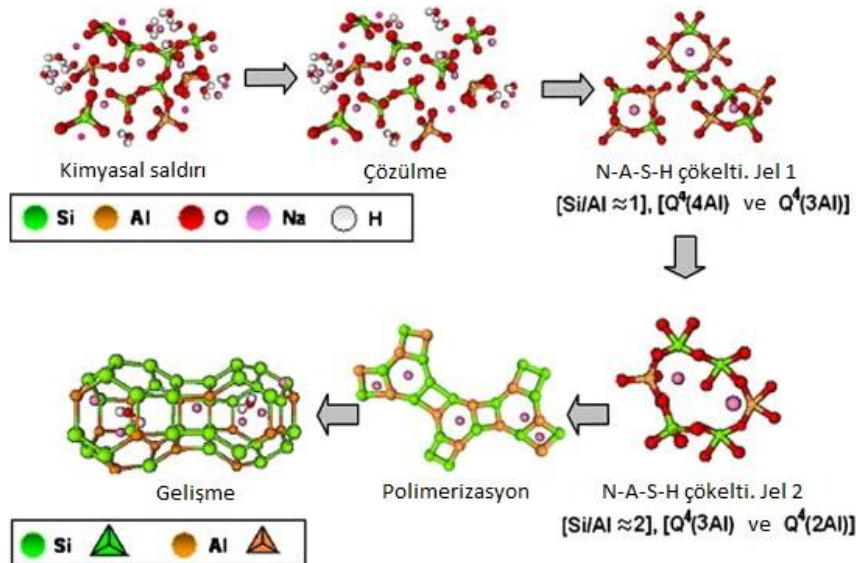
Geopolimer beton, beton üretiminde bağlayıcı malzeme olarak çimento hamuru yerine geopolimerler kullanılarak üretilir. Geopolimer hamuru, iri agrega ve ince agregayı bağlayarak diğer malzemelerle birlikte geopolimer betonu oluştururlar. Geopolimer beton klasik beton teknolojisi kullanılarak üretilmektedir. PÇ'li betonda

olduğu gibi geopolimer betonun da yaklaşık %75-80'i agregadan oluşmaktadır (Hardjito vd., 2004).

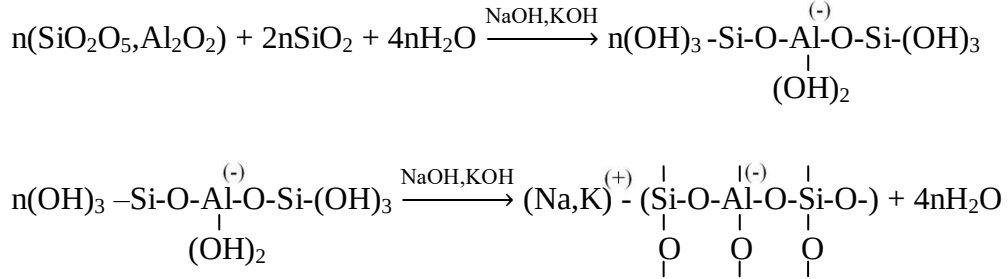
Geopolimerler silisyum ve alüminyum içeren cüruf ve UK gibi endüstri yan ürünleri ya da metakaolin gibi doğal malzemelerin termal olarak aktive edilmesiyle elde edilirler. Bir alkali aktive edici çözelti içerisinde silisyum ve alüminyum çözüldükten sonra moleküler zincirler içinde polimerleşip bağlayıcı madde olurlar (Abdul Aleem ve Arumairaj, 2012).

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

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



Geopolimerizasyon ekzotermik bir olaydır. Şekil 2.2’de gösterilen senteze bakılarak oligomerler vasıtasıyla üç boyutlu makromoleküler yapıların oluşumunu sağladığı varsayılmaktadır (Davidovits, 1991).



Şekil 2. 2. Geopolimerizasyon işlemi (Davidovits, 1991)

2.1.2. Geopolimer betonun avantajları

Geopolimer teknolojisinin önemli özelliklerinden biriside üretim sürecinin çok yönlü ve sağlam olmasıdır. Kömür külü kaynaklarından diğer alüminosilikat ham maddelere kadar uygun ürünler olabilmektedir. Mevcut uygulamalar arasında klor geçirimsizliğine karşı iyi direnç gösteren düşük ya da yüksek dayanımlı betonlar, yangın veya aside dayanıklı kaplamalar, nükleer ve kimyasal endüstriler için atık immobilizasyonu bulunmaktadır (Duxson vd., 2007).

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

- Bol hammadde kaynağı: Geopolimer üretiminde herhangi puzolanik bileşik veya alkali çözeltilerle kolay çözülen silikatlar ya da alümino-silikatlar bir kaynak olarak yeterli olabilmektedir.
- Enerji tasarrufu ve çevre koruması: Geopolimerler için yüksek enerji tüketimine gerek duyulmamaktadır. Doğal alümino-silikatların düşük rölatif sıcaklıktaki (600° ile 800°) ısı işlemleri sonucu uygun geopolimerik hammaddeler elde edilmektedir. PÇ ile karşılaştırıldığında, geopolimerlerin %60 daha az enerji tüketimi yaptığı varsayılmaktadır ve düşük miktarda CO₂ yaymaktadır.
- Basit hazırlama tekniği: Alümino-silikat reaktif malzemeler ve güçlü alkali çözeltilerin karışımı ile geopolimerler basit bir şekilde sentezlenebilir ve oda sıcaklığında kür edilebilirler. Kısa sürede yeterli dayanıma ulaşmaktadır.

Geopolimer betonların hazırlanması PÇ'li betonun hazırlanmasına benzemektedir.

- İyi hacim kararlılığı: Geopolimerler, PÇ'ye göre %80 daha az büzülme yaparlar.
- Kısa zamanda uygun dayanım kazanımı: Geopolimerler, sertleşmeye başladığı ilk 4 saatte nihai basınç dayanımının %70'ine ulaşabilirler.
- Mükemmel dayanıklılık: Geopolimer beton ya da harç çok uzun süre hava koşullarına karşı fazla işlev kaybına uğramadan dayanabilir.
- Yüksek ısı dayanımı ve düşük ısı iletkenliği: Geopolimer 1200 °C'ye kadar herhangi bir işlev kaybı olmaksızın dayanabilir. Geopolimerin ısı iletkenliği 0.24 W/m.K ile 0.3 W/m.K arasındadır ve bu değer hafif tuğlaların ısı iletkenliğinden daha düşüktür.

Geopolimerler bu özelliklerden dolayı inşaat mühendisliği, otomotiv ve uzay endüstrisi, paslanmaz döküm ve metalurji, atık yönetimi, binaların güçlendirilmesi, sanat ve dekorasyon, plastik endüstrisi gibi birçok alanda kullanılır (Li vd., 2004).

2.1.3. Geopolimerin önündeki engeller

Geopolimer teknolojisinin gelişmesi ve ticarileştirilmesi için aşması gereken bazı engeller bulunmaktadır. Bunlar (Duxson vd., 2007);

- Geopolimer ya da inorganik polimer sistemler için tek tip isimlendirme eksikliği,
- Çimento endüstrisindeki sabit tutumlar (örneğin alkali bütün sistemler için kötü, UK içeren bağlayıcıların tuz mevcudiyetindeki donma-çözülme dirençlerinin zayıf olması gibi),
- Düzensel olarak bulunan inşaat kanunları ve yasalarına bağlı olma (örneğin geopolimerler normal PÇ içermez ve bu nedenle maksimum izin verilebilir ilave bağlayıcı madde içeriğini belirten standartlar bulunmamaktadır),
- Bu alandaki araştırmaların nispeten yeni popülerleşmesinden dolayı durabilitesi hakkındaki veri eksikliği,
- Yeni ürünlerle ilgili inşaat ve yapı ürünleri endüstrisinin anlaşılabilir korumacı içgüdüğü (yani eğer bir ürün başarısız olursa, insan kaybı ihtimalinin var olması).

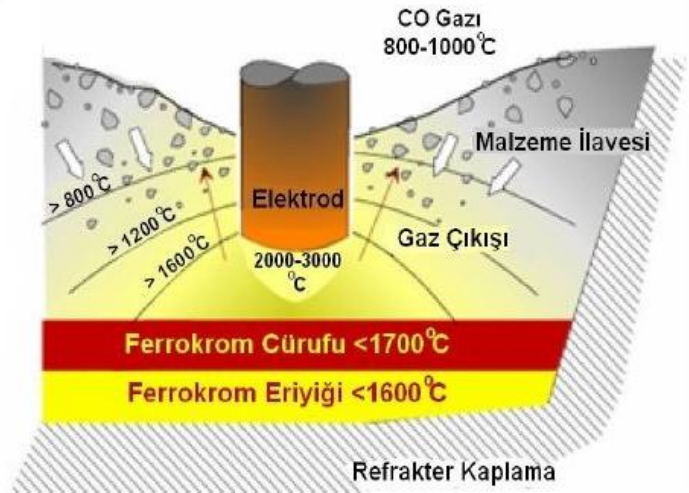
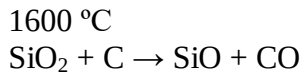
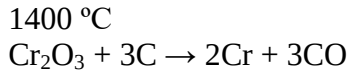
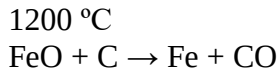
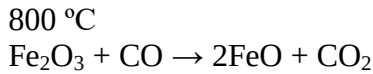
Yeni mühendislik malzemeleri olarak ortaya çıkan geopolimerler ya da inorganik polimer betonlar çevresel sürdürülebilir inşaat ve yapı ürünleri endüstrisi için önemli bir elemandır (Duxson vd., 2007).

2.2. Elazığ Ferrokrom Cürufu (EFC)

2.2.1. Ferrokrom cürufunun üretilmesi

Isıya karşı dirençli ve genellikle paslanmaz bir metal bileşiği olan Ferrokrom, çelik üretiminde kullanılmaktadır. Silikoferrokrom ve Ferrokrom cürufu, ferrokrom üretiminin yapıldığı tesislerde elektrik-ark fırınlarından üretim sonucu oluşan atık malzemelerdir. Bu iki atık malzemenin üretimi sırasında bir miktar silisyum oksit ile indirgenmeyen oksitler, metal yüzeyinde sıvı halde olan bir cüruf tabakası meydana getirir. Bu sıvı haldeki cüruf ise kalıplara dökülerek alınır (Yılmaz ve Süttaş, 2008).

Metalürjik kok kömürü kullanılan elektrik ark fırınlarının içerisine bırakılan metalin bünyesindeki demir ve krom oksitleri indirgenmektedir. Bununla birlikte eş zamanlı olarak silikanın bir kısmı da indirgenmektedir. Bu şekilde üretilen metal “şarj kromu” olarak tasnif edilmektedir. Şarj kromu bünyesinde %53 Cr, %7 C ve %4-5 Si içermektedir (Niemelä ve Kauppi, 2007). Ferrokrom fırınındaki tipik indirgeme reaksiyonları Şekil 2.3’te gösterilmiştir (Niemelä ve Kauppi, 2007; Vapur vd., 2013).



Şekil 2. 3. Ferrokrom fırınındaki tipik indirgeme reaksiyonları (Niemelä ve Kauppi, 2007; Vapur vd., 2013)

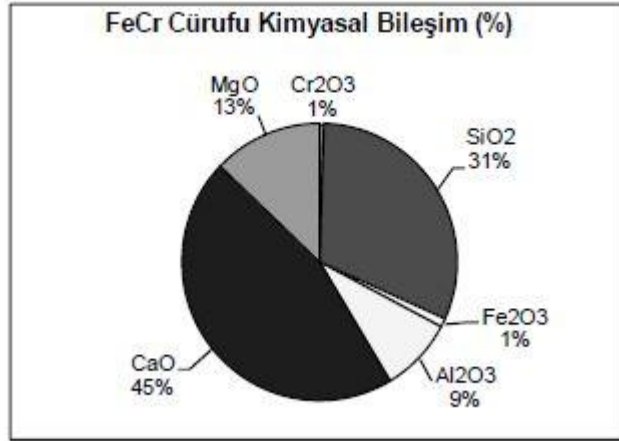
12.300 t/y ferrosilikon (FeSi) ve 161.500 t/y ferrosilikokrom (SiCr) üretimi ile hem yüksek hem de düşük karbonlu ferrokrom (HCFeCr ve LCFeCr) üretimi olmak üzere Türkiye'nin toplamda 173.800 t/y ferroalaşımı üretim kapasitesi bulunmaktadır (Aydın vd., 2007). Yüksek karbonlu ferrokrom (HCFeCr) farklı derecelerdeki paslanmaz çelik üretimi için en yaygın alaşım malzemesidir. Kromit cevherindeki krom ve demir, %45-80 krom içeren belirli ısıtma şartlarında sürekli bir katı çözelti serisini oluşturabilir (Panda vd., 2013).

Metalurjik atıkları azaltmak için en etkili ve en ekonomik yöntem ancak geri dönüşümle sağlanabilir. Cüruf geri dönüşümünde, demir üretimi ve çelik yapımı gibi birçok sektör başarılı olmaktadır. Ancak bazı sektörlerin cüruf üretiminin büyük bir miktarının kullanımıyla ilgili sorunları devam etmektedir (Reuter vd., 2004).

2.2.2. 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 Cr- ve Fe- oksit ve kalsiyum oksit içermektedir. Cürufun genel fazları cam, spinel ve fosferittir (Niemelä ve Kauppi, 2007).

Kimyasal kompozisyonu incelendiğinde ferrokrom cürufunun silisyum, alüminyum, kalsiyum ve magnezyum olmak üzere dört ana elementten oluştuğu Şekil 2.4'te görülmektedir. Bu elementlere ilaveten krom ve demir elementleri de az miktarda bulunmaktadır (Yılmaz ve Süttaş, 2008).



Şekil 2. 4. Ferrokrom cürufunun kimyasal kompozisyonu (Yılmaz ve Süttaş, 2008)

Farklı soğutulma işlemleri uygulanan cürufların özellikleri de farklı olmaktadır. Cüruf havada yavaş soğutulur ise kristal yapıya sahip olmakta ve yüksek mekanik özellikler göstermektedir. Bu haliyle genellikle agrega olarak kullanılmaktadır. Eğer eriyik halinde yüksek fırından çıkan cüruf hızlı olarak soğutulur ise camsı yapıya sahip bir katı madde elde edilmektedir. Yarı kararlı olan bu camsı malzemenin bir miktar hidrolik özelliği bulunmaktadır. Bu tür cürufların kullanım alanı ise çimento ve beton üretimidir (Yılmaz ve Süttaş, 2008).

2.2.3. Ferrokrom cürufu kullanım alanları

Cüruflar günümüzde beton ve asfalt agregası olarak, demiryolu balastı olarak, yollarda temel ve alt temel malzemesi olarak, çimento sanayisinde, briket ve tuğla üretiminde, cüruf yünü ve prefabrik elemanların üretimi gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Yılmaz ve Süttaş, 2008).

2.2.4. Ferrokrom cürufu kullanılarak yapılan çalışmalar

Kantarcı (2013) yaptığı çalışmada EFC'yi NaOH ve Na₂SiO₃ ile aktif ederek geopolimer beton üretmiştir. İri agrega olarak dere çakılı, ince agrega olarak da dere kumu ve kırma kum olacak şekilde iki grup numune üretilmiştir. Geopolimer beton karışımlarında ağırlıkça sodyum oksit miktarı 9.13 ve silis modülü 1.35 olarak seçilmiştir. Üretilen numunelere 72 saat %60 nem ve 75 °C sıcaklıkta buhar kürü

uygulanmıştır. Dere kumu kullanılarak üretilen 28 günlük geopolimer betonun basınç dayanımı 35.10 MPa iken, kırma kum kullanılarak üretilen geopolimer betonun basınç dayanımı 25.18 MPa olarak bulunmuştur.

Karakoç vd., (2014) yaptıkları çalışmada üç farklı silis modülü (0.50, 0.60 ve 0.70) ve dört farklı Na₂O konsantrasyonuna (%4, %7, %10 ve %12) sahip ferrokrom cürufu esaslı geopolimer hamur ve harç üretmişlerdir. 28 günlük geopolimer hamur numunelerinden en yüksek basınç dayanımı, silis modülü 0.70 ve Na₂O konsantrasyonu %7 olan numunelerde 13.82 MPa olarak ölçülmüştür. 28 günlük geopolimer harç numunelerinde ise en yüksek basınç dayanımı, s/b oranı 0.30 olan ve laboratuvar ortamında kür edilen numunelerde 22.04 MPa olarak ölçülmüştür.

Acharya ve Patro (2015), yaptıkları çalışmada betona %10, %20, %30 ve % 40 oranlarında çimento yerine ferrokrom külü ve %7 oranında kireç ikame edilmesinin betonun dayanımına, geçirimsizliğine ve UPV'ye etkisini incelemişlerdir. Beton karışımları kalıplara yerleştirilip 24 saat oda sıcaklığında bekletildikten sonra kalıptan çıkarılıp su kürüne bırakılmıştır. 7, 28 ve 91 günlük numunelerin basınç dayanımı incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı %10 ferrokrom külü ve %7 kireç ikame edilen beton numunelerinde görülmüştür. Betona katılan ferrokrom külü ikame oranı %10'u geçtikten sonra, ikame oranı arttıkça basınç dayanımında azalma olduğu görülmüştür. Aynı şekilde ferrokrom külü ikame oranının %10'u aşmasından sonra, ikame oranı arttıkça numunelerin UPV değerleri azalmaktadır.

Mahmut (2015), dozajı 400 g olarak belirlediği EFC'yi NaOH ve Na₂SiO₃ ile aktif ederek s/b oranı 0.30 olan harç numuneleri üretmiştir. Üç farklı molaritede (6, 9 ve 12 mol) aktivatör kullanılarak harç numuneleri üretilmiş ve harç karışımları kalıplara yerleştirildikten sonra 3 gün kalıpta bekletilmiş ve kalıptan çıkartılıp 4 gün laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Ardından numunelere 40, 65 ve 90 °C sıcaklıklarda 1, 2 ve 4 gün ısıtma işlemi uygulanmış ve numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Basınç dayanımı deneyi sonuçlarına göre en iyi sonuç 90 °C sıcaklıkta ve 12 molaritedeki 2 gün ısıtma işlemine tabi tutulan harç numunelerinde (16.76 MPa) ölçülmüştür. Genel olarak aktivatörlerin molarite değeri arttıkça harç numunelerinin basınç dayanımının da arttığı görülmüştür.

Ferrokrom cürufunun; asfalt beton kaplamalarında (Taşgın, 2014), asfalt betonunda (Yılmaz, 2002), hafif agrega olarak (Zhang vd., 2015) kullanımları da bulunmaktadır.

2.3. Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

2.3.1. Yüksek fırın cürufunun elde edilmesi

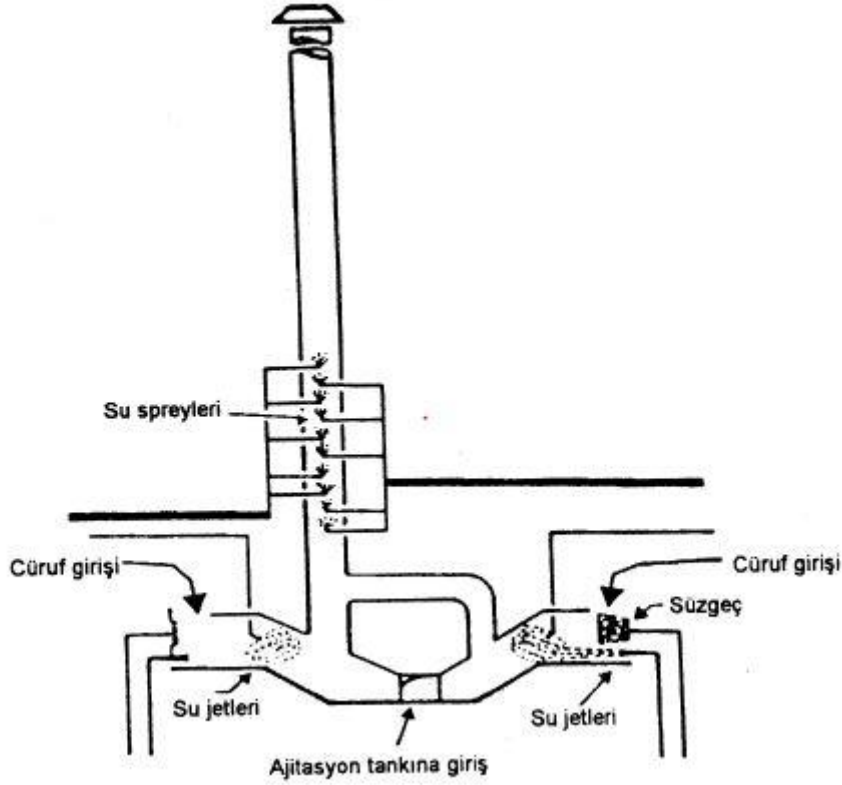
Doğada demir oksit olarak bulunan demir cevheri içerisinde bir miktar yabancı maddeler de (alümina, silis, kükürt gibi) içermektedir. Demir oksit içerisindeki oksijenin dışarı çıkartılması ve aynı zamanda yabancı maddelerin de cevherden uzaklaştırılması ile demir elde edilmektedir. Bu nedenle, yüksek fırın içerisine kok kömürü, kalkertaşı ve cevher kademeler halinde yerleştirilip, kok kömürünün yakılmasıyla birlikte uygulanan sıcaklık yaklaşık 1600 °C'ye ulaşmaktadır. Demir oksitteki oksijen ile kok kömürü karbonunun birleşmesi sonucu oluşan karbon monoksit veya karbon dioksit gazları ortamı terk ederek geride eriyik halde demir ve yine eriyik halde cüruf (yabancı maddeler topluluğu) bırakmaktadır. Bu işlem sonucunda elde edilen bir yan ürün olan cürufun bünyesinde yüksek oranda silika, kalsiyum oksit ve alümina bulunmaktadır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

Cürufun farklı uygulamalarını bulmak için cüruf işleme teknikleri 1970'lerden beri önemli ilerleme kaydetmiştir. Bu sürecin ilk adımı, cürufun söndürülmesi ya da yavaşça soğutulmasıdır. YFC'ler genellikle dört farklı şekilde katılaşır. Bunlar; kaplarda veya döküm yataklarda cürufun katılaşmasıyla elde edilen havada soğutulmuş cüruf, suda soğutulmuş granüle cüruf, köpürtme ile yüksek poroziteli su yapıları pomza cürufu, ısı yalıtımı için hava ya da buhar basılmış cüruf yünüdür (Reuter vd., 2004).

Eriyik durumda yüksek fırından çıkartılan cüruf, havada yavaş soğuma işlemi uygulanması durumunda kristal yapıya sahip olurken; eğer suya dökülerek ya da başka bir yöntemle çok hızlı bir şekilde soğutulması durumunda amorf yapıya sahip iri kum tanesi boyutunda granüle duruma gelmektedir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

Atık bir malzeme olan YFC demir-çelik üretimi aşamasında oluşmaktadır. Bünyesinde yüksek oranda SiO_2 ve Al_2O_3 içeren YFC amorf yapıya sahiptir ve bu nedenle puzolanik özellik göstermektedir. Demir üretimi sırasında oluşan YFC yüksek sıcaklıkta iken çok hızlı soğutulursa amorf yapıya sahip granüle halde ince malzeme haline gelmektedir. Bu şekilde elde edilen YFC beton üretiminde ince malzeme olarak kullanılabilirken, eğer öğütülürse betona katkı maddesi olarak ve çimento üretiminde kullanılabilir (Topçu ve Canbaz, 2008).

YFC'nin ani soğutulması için uygulanan iki yöntem bulunmaktadır. Bunlar Granülasyon Yöntemi ve Peletleme Yöntemidir. Granülasyon yönteminde YFC'nin soğutulması için çok miktarda su kullanımı gerekmektedir. Bu yöntem sonucunda elde edilen YFC'nin özellikleri iyi olmakla birlikte bu yöntemin pahalı olması kullanımını sınırlamaktadır. Granülasyon yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.5'te gösterilmiştir (Tokyay ve Erdoğan, 2009).

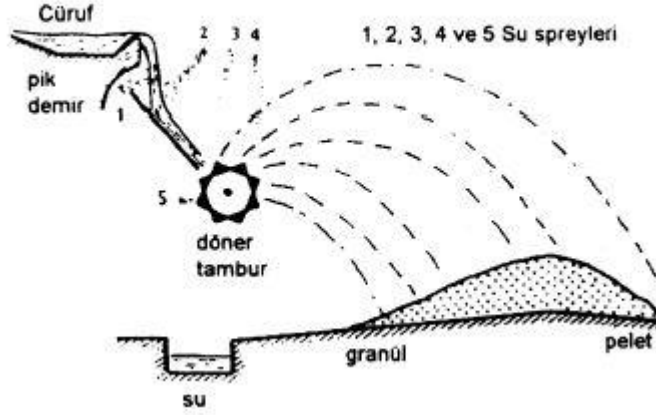


Şekil 2. 5. Granülasyon yönteminin şematik gösterimi (Tokyay ve Erdoğan, 2009)

Diğer bir yöntem olan Peletleme yöntemi ise Kanada'da geliştirilmiştir. Bu yöntemde yarı-kuru proseste erimiş haldeki çürüf ilk olarak suyla soğutulur ve ardından dakikada 300 tur dönen bir tambur aracılığıyla havaya fırlatılır. Bu yöntemde 1 ton çürüf için kullanılan su miktarı yaklaşık 1 m³'tür. Peletleme yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.6'da gösterilmiştir (Tokyay ve Erdoğan, 2009).

Genleştirilmiş çürüf ve havada soğutulmuş çürüf genellikle beton ve bitüm uygulamalarında agrega olarak kullanılmaktadır. Öğütölüp ince bir toz haline gelmesi durumunda ise çimentoya katkı maddesi olarak kullanılabilir. Çürüfler çimento klinkeri üretimi için ilave bir ham malzeme olarak kullanılabilir. Kalsinasyon işlemini gerçekleştirmek için daha az sıcaklık ve

enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Bu sayede CO₂ salınımını da azaltmaktadır (İmbabi vd., 2012).



Şekil 2. 6. Peletleme yönteminin şematik gösterimi (Tokyay ve Erdoğan, 2009)

YFC'nin granüle hale getirilmesiyle ilgili çalışmalar ilk olarak 1862 yılında Alman Emil Langen tarafından başlatılmıştır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

2.3.2. Yüksek fırın cürufu esaslı bağlayıcılar

Al-Otaibi (2008), yaptığı çalışmada aktif edilen cürufu betonların durabilitesini araştırmıştır. Cürufun aktifleştirilmesi için silis modülü 1.65 olan sodyum silikat ve silis modülü 1 olan sodyum metasilikat kullanılmış ve bu iki aktivatörün etkileri karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda aktivatörlerde iki farklı Na₂O içeriği de (%4 ve %6) kullanılarak numuneler üretilmiştir. Üretilen bu numuneler normal PÇ'li betonlarla karşılaştırılmıştır. Numunelerin basınç dayanımları, poroziteleri, hızlı klor geçirimsizlikleri, karbonatlaşma etkisi ve alkali-silika reaksiyonları incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, aktivatördeki yüksek silis modülü ve yüksek dozaj ile daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Ms= 1 olan aktivatörde artan Na₂O dozajıyla birlikte porozite azalırken, Ms= 1.65 olan aktivatörde ise artan Na₂O dozajıyla birlikte porozite de artmaktadır. Sonuçlar, alkali ile aktifleştirilmiş cürufu betonların normal PÇ'li betonlara göre iyi durabiliteye sahip olduğunu göstermiştir.

Bernal vd., (2011) alkali ile aktif edilmiş üç farklı dozajda (300, 400 ve 500 kg/m³) YFC'li beton numuneleri üretmişlerdir. Beton numunelerin silis modülü 2.4, s/b oranı 0.42 ve ağırlıkça Na₂O içeriği %5 olarak belirlenmiştir. Beton numuneler

%90 bağıl nem ve 25 ± 5 °C sıcaklıktaki bir nem kontrollü haznede kür edilmiştir. YFC dozajının artmasıyla birlikte, 28 ve 90 günlük kür sürelerini tamamlayan beton numunelerin basınç dayanım değerleri de artmıştır.

Chi (2012), silis modülü 0.8 olan üç farklı Na_2O konsantrasyonuna (%4, %5 ve %6) sahip alkali ile aktif edilmiş cüruflu beton üzerinde yaptığı çalışmada fosforik asit içeren ve içermeyen beton karışımı olmak üzere iki grup beton üretmiştir. 24 saat kalıpta bekledikten sonra, kalıptan çıkarılan numuneler üç farklı şekilde (hava, kirece doymun su, bağıl nemi %80 ve sıcaklığı 60 °C olan kür odası) kür edilmiştir. Deney sonuçlarına göre beton numunelerinin durabilitesi ve özellikleri açısından en iyi özelliği artan Na_2O içeriğiyle birlikte %80 bağıl nem ve 60 °C sıcaklıkta kür edilen numuneler gösterirken, onu havada kür edilen ve kirece doymun suda kür edilen numuneler takip etmiştir.

Yuan vd., (2014) NaOH kullanılarak aktif edilen cüruflu geopolimer beton üretmişlerdir. Kalıpta 12 saat bekledikten sonra çıkarılan beton numuneler 20 ± 3 °C sıcaklıkta ve %90'dan büyük bağıl neme sahip nem haznesinde kür edilmiştir. Numunelerin 1 ve 3 günlük basınç dayanımı değerleri sırasıyla 40.50 ve 51.33 MPa olarak ölçülmüştür.

Bilim vd., (2013) iki farklı sodyum içeriği (%4 ve %6) ve iki farklı silis modülü (0.75 ve 1) olmak üzere dört grup alkali ile aktif edilmiş cüruflu harç üretmişlerdir. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. Üretilen bu numuneler üç farklı şekilde kür edilmiştir. Birinci kür metodu %95 bağıl nem ve sıcaklığı 23 ± 2 °C olan nem kabini, ikinci kür metodu %50 bağıl nem ve sıcaklığı 23 ± 2 °C olan nem kabini, üçüncü kür metodu ise 2 saatte 65 °C sıcaklığa ulaşan suyun 5 saat bu sıcaklığı koruması ardından ısıtıcının kapatılıp numunelerin soğumaya bırakılması ve numunelerin %50 bağıl nem ve sıcaklığı 23 ± 2 °C olan nem kabine bırakılmasıdır. Numunelerin 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, 85.75 MPa dayanım değeri ile %95 bağıl nem ve sıcaklığı 23 ± 2 °C olan nem kabinde kür edilen ve sodyum içeriği %6, silis modülü ise 0.75 olan harç numunelerinde görülmüştür.

Ismail vd., (2013a) UK ikame edilen alkali ile aktif edilmiş cüruflu beton numuneleri üretmişlerdir. Beton karışımları ağırlıkça %100 cüruf, %75 cüruf + %25 UK, %50 cüruf + %50 UK olacak şekilde 3 grup numune hazırlanmış ve aktivatör konsantrasyonu ağırlıkça %8 olarak seçilmiştir. Numuneler basınç dayanımları belirlenene kadar 20 ± 3 °C sıcaklığındaki suda kür edilmiştir. Numunelerin 28 ve 90

günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra ölçülen basınç dayanım değerleri 55-65 MPa arasındadır.

Jang vd., (2014) alkali aktive edilmiş UK ve cürufllu hamur numuneleri üretmişlerdir. Alkali aktivatör olarak NaOH ve Na_2SiO_3 kullanılmıştır. Polikarboksilat esaslı ve naftalin esaslı süper akışkanlaştırıcılar hamur karışımlarına ağırlıkça %0, %1, %2, %3 ve %4 seviyelerinde eklenmiştir. Numuneler oda sıcaklığında kür edilmiştir. Numunelerde artan cüruf oranı ile birlikte basınç dayanımı da artmıştır. Polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı, naftalin esaslı süper akışkanlaştırıcıya göre önemli derecede harç numunelerinin işlenebilirliğini geliştirmiştir.

Açıkgöz (2015), üç farklı dozaja (300, 350 ve 400 kg/m^3), üç farklı Na içeriğine (%4, %6 ve %8) sahip ve iki farklı aktivatör (NaOH ve $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{SiO}_3$) kullanılarak aktif edilen YFC'li beton üretmiştir. Karışımlar 24 saat kalıpta bekledikten sonra 20 ± 2 °C sıcaklıktaki kür havuzunda kür edilmiştir. Numunelerin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları ölçülmüştür. Deney sonuçlarına göre sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile aktif edilen betonların basınç dayanımları, sodyum hidroksitle aktif edilen betonların basınç dayanımlarıyla karşılaştırıldığında %191 oranına kadar artış göstermektedir. Na içeriğinin ise %4'ten %6 oranına çıkarken basınç dayanımlarına etkisinde belirgin bir artış olurken, bu oran %6'dan %8'e yükseldiğinde basınç dayanımı artış miktarında azalma olmuştur.

Nadoushan ve Ramezaniapour (2016), aktivatör türlerinin ve konsantrasyonlarının doğal puzolan ve cüruf esaslı geopolimer hamurların basınç dayanımlarına etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla hamur karışımlarının hazırlanmasında, sodyum silikata sodyum hidroksit (NaOH) veya potasyum hidroksit (KOH) eklenerek iki farklı aktivatör ve molaritesi %6, %8 ve %10 olan üç farklı aktivatör konsantrasyonu kullanılmıştır. Potasyum hidroksit içeren hamur numunelerinin basınç dayanımı değerleri, sodyum hidroksit içeren hamur numunelerine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Alkali çözeltilerin optimum konsantrasyonu 6 ve 8 molar olduğu belirlenmiştir. Alkali çözeltideki optimum sodyum silikatın oranı 0.4 ve optimum sodyum silikat modülünün 2.33 olduğu belirlenmiştir.

Rashad vd., (2016) Na_2O konsantrasyonunun, alkali ile aktif edilmiş cürufllu hamurlara etkisini çalışmışlardır. Hamur numuneleri için silis modülü 1.7 olarak belirlenmiş ve dört farklı Na_2O konsantrasyonuna (%3.5, %5.5, %6.5 ve %10.5)

sahip numuneler üretilmiştir. 28 gün kür edilen numunelerin basınç dayanımı değerleri sırasıyla en yüksek Na₂O konsantrasyonuna göre %6.5, %10.5, %5.5 ve %3.5 olan numunelerde görülmüştür.

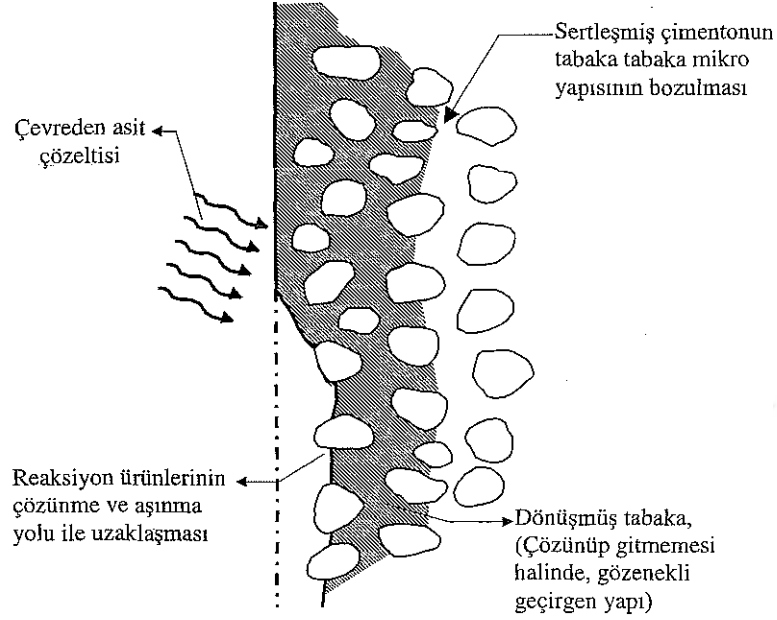
Rostami ve Behfarnia (2017), alkali ile aktive edilmiş cürufllu betonlara ağırlıkça %0, %5, %10 ve %15 oranında silis dumanı ikame edilmesinin betona etkisini çalışmışlardır. Ürettikleri beton numunelerini su kürü ve plastik örtü ile kür ederek bu iki kür metodunu karşılaştırmışlardır. Hem 28 günlük hem de 90 günlük basınç dayanım değerleri incelendiğinde silis dumanı ikame oranı arttıkça beton numunelerin basınç dayanımlarının arttığı gözlemlenmiştir. Kür koşulları karşılaştırıldığında 28 günlük numunelerde her iki koşulda kür edilen numunelerin basınç dayanımları birbirine yakinken, 90 günlük numunelerde suda kür edilen numuneler bariz bir şekilde daha yüksek basınç dayanım değerlerine ulaşmıştır.

2.4. Betonda Asit Etkisi

Sertleşmiş betonun asit etkisine maruz kalması sonucu; Ca(OH)₂, CSH, CAH gibi kalsiyum bileşenleri kalsiyum tuzlarına dönüşür. Suda çözünebilen kalsiyum tuzlarından dolayı bir süre sonrada çimento harcında çözümler meydana gelir ve beton zarar görür. Asit etkisine maruz kalan betondaki bozulma süresi, kalsiyum tuzlarının suda çözünme sürelerine bağlıdır. Örneğin; HCl çok kolay çözünebilen CaCl₂ meydana getirir. Nitrik asit kalsiyum nitratı, sülfürik asit kalsiyum sülfatı yani alçıyı oluşturur (Baradan vd., 2002).

Bazik karakterde olan PÇ asitlere karşı dayanıksızdır. Asit etkisine; bacalarda, buharlı trenlerin geçtiği tünellerde, bataklık sularında, kanalizasyon sularında, arıtma tesislerinde, buz bulunan dağlık bölgelerde, açık madenlerden sızan sularda, asit buharlarının meydana geldiği döküm yapılan tesisler vb. yerlerde maruz kalınır. Asidin türü, etki süresi ve asidin yoğunluğu gibi parametrelere bağlı olarak asit reaksiyonlarının hızı ve şiddeti değişiklik gösterir. Fakat en önemlisi oluşan kalsiyum tuzlarının çözünürlüğünün artmasıyla birlikte su ile taşınan maddelerin betonda oluşturduğu hasarların da artmasıdır. Şekil 2.7’de görüldüğü gibi asit reaksiyonları sonucu sertleşmiş betonun yüzeyinden başlayarak yumuşama ve gözenekler meydana gelmektedir. Su, zemin ve gaz ortamlarında asit etkisi oluşabilir. 6.5’ten küçük pH değerine sahip olan sular, beton içerisindeki çimento harcı ve agregada bulunan

karbonat kökenli tanecikler üzerinde çözücü ve ayrıştırıcı etki oluşturur (Baradan vd., 2002).



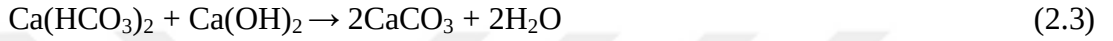
Şekil 2. 7. Asit etkisiyle betonun bozulması (Baradan vd., 2002)

Çizelge 2.1’de hangi endüstri kolunda hangi asit türlerinin olduğu görülmektedir (Erdoğan, 2003).

Çizelge 2. 1. Farklı endüstri kollarında ortaya çıkan asitler (Erdoğan, 2003)

Asit	Formülü	Ortaya Çıktığı Endüstri Kolu
Hidroklorik asit	HCl	Kimya endüstrisi
Nitrik asit	HNO ₃	Gübre endüstrisi
Asetik asit	CH ₃ CO ₂ H	Fermentasyon işlemi
Formik asit	H.CO ₂ H	Gıda ve boya endüstrisi
Laktik asit	C ₂ H ₄ (OH).CO ₂ H	Süt endüstrisi
Tannik asit	C ₇₆ H ₅₂ O ₄₆	Deri endüstrisi
Fosforik asit	H ₃ PO ₄	Gübre endüstrisi
Tartarik asit	[CH(OH).CO ₂ H] ₂	Şarapçılık

Sertleşmiş beton üzerindeki değişik asitlerin etkisi Çizelge 2.2’de gösterilmiştir. CO₂ gazının kolay bir şekilde suda çözünmesiyle karbonik asit meydana gelir (Denklem 2.1). Su içinde bulunan CaO ile CO₂ birleşerek CaCO₃’ın oluşmasını sağlar. Karbonik asit ise CaCO₃ ile reaksiyona girerek, kalsiyumbikarbonatı oluşturur (Denklem 2.2). Denklem 2.3’te görüldüğü gibi kalsiyumbikarbonat ile çimentodaki Ca(OH)₂’in reaksiyona girmesiyle tekrardan CaCO₃ oluşur (Baradan vd., 2002).



Çizelge 2. 2. Değişik asitlerin beton üzerindeki etkisi (Baradan vd., 2002)

Saldırı hızı	Asit Tipi	
	İnorganik	Organik
Hızlı	Hidroflorik, Hidroklorik, Nitrik, Sülfürik	Asetik, Formik, Laktik
Orta	Fosforik	Tannik
Yavaş	Karbonik	--
İhmal edilebilir	--	Oksalik, Tartarik

PÇ’nin olumsuz koşullar altında dayanımı iyidir. Ancak asit saldırısı, sülfat saldırısı ve yüksek sıcaklıklara karşı zayıf bir dirence sahiptir. Asit saldırısına maruz kaldığında Ca(OH)₂’in bozulması ve hidrate olmuş silikat ve alüminyum fazlarının bozulması sebebiyle PÇ’de ciddi hasarlar meydana gelmektedir. Normal PÇ’nin asit saldırısına karşı direncini geliştirmek için UK ve silis dumanı gibi farklı karışımları PÇ ile birleştirerek yapılan çok sayıda çalışma vardır ve bu çalışmalardan da olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Thokchom vd., 2009).

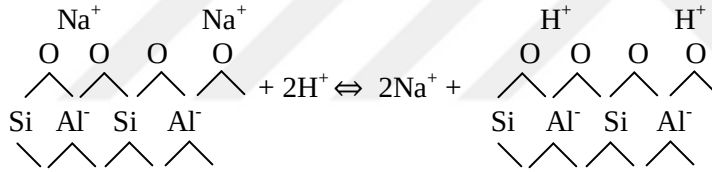
Asit hücumunun betonda oluşturabileceği hasarları azaltabilmek için alınacak ilk önlem, betonun geçirimsizliğini sağlayabilmektir. Geçirimsiz beton üretiminde ise su/çimento oranı 0.5’ten az olmalıdır. Yine beton yüzeylerinin bitümlü veya reçineli maddelerle kaplanması halinde de, asit etkisi azaltılabilmektedir. Asit etkisine maruz kalacak betonların, ince taneli puzolanik katkıları veya daha az kalsiyum hidroksit oluşmasını sağlayacak çimentolar kullanarak betonun üretilmesi

gerekmektedir. Beton iyice kuruduktan sonra asitli ortamla temas etmelidir (Erdoğan, 2003).

Yapısal bütünlüğü tutturması açısından alüminyum-silikatın, kalsiyum silikat hidrateden daha güvenilir olmasından dolayı geopolimer bağlayıcıların betonun asit direncini geliştirebileceği düşünülmektedir (Thokchom vd., 2009).

Çok agresif bir asit türü olan sülfürik asit, beton bünyesindeki serbest kireç $[Ca(OH)_2]$ ile reaksiyona girerek alçı taşına ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) dönüştürmektedir. Bu oluşan alçıtaşı kristalleri ile kalsiyum aluminat arasındaki reaksiyon daha yıkıcı bir etki oluşturmaktadır. Bu iki ürün arasındaki reaksiyon sonucu daha az çözülebilir bir ürün olan etrenjit ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) oluşmaktadır. Çok genleşen bir bileşik olan etrenjit beton içerisinde iç basınç oluşturarak betonda çatlakların oluşmasına neden olmaktadır (Monteny vd., 2001).

Geopolimerin asit çözeltisi ile etkileşimi sonucunda Şekil 2.8’de görüldüğü gibi polimerdeki değiştirilebilir katyonlar (Na,K) ile hidrojen veya hidronyum iyonları yer değiştirebilmektedir (Bakharev, 2005a).



Şekil 2. 8. Geopolimerlerin asit çözeltisi ile etkileşimi (Bakharev, 2005a)

Si/Al oranı 1 olan polimer yapılar daha fazla silisli polimerlere göre asit saldırılarından daha fazla etkilenmektedir (Bakharev, 2005a).

Roy vd., (2001) yaptıkları çalışmada PÇ ve PÇ’nin yerine farklı oranlarda silis dumanı, metakaolin ve düşük kalsiyumlu UK ikame ederek, farklı s/b oranlarında harç numuneleri üretmişlerdir. Üretilen harç numuneleri %1 H_2SO_4 , %5 H_2SO_4 , %1 HCl, %1 HNO_3 , %5 H_3PO_4 , %5 CH_3COOH , Na_2SO_4 - $MgSO_4$ çözeltilerine yerleştirilmiş ve 28 gün boyunca bekletilmiştir. 28 günün sonunda çözeltilerden çıkarılan numunelerin ağırlık kaybı ve basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre %5 H_2SO_4 , %5 CH_3COOH ve %5 H_3PO_4 çözeltilerinde bekletilen harçların basınç dayanımı değerleri, diğer asit çözeltilerinde bekletilen harçların dayanımından daha düşük olduğu belirlenmiştir. Metakaolin ve silis dumanı ikame oranı değiştikçe basınç dayanımında önemli değişiklikler olmazken,

UK ikame oranı arttıkça basınç dayanımı azalmıştır. Silis dumanı, UK ve metakaolinin, harçların asit etkilerine karşı direncini arttırabileceği belirtilmiştir.

Almusallam vd., (2003) betonun durabilitesini geliştirmek amacıyla betonda yüzey kaplaması kullanımını incelemişlerdir. Yüzey kaplaması olarak akrilik kaplama, polimer emülsiyon kaplama, epoksi reçine kaplama, poliüretan kaplama ve klor-kauçuk kaplama olmak üzere beş adet kaplama kullanılmış ve her kaplama iki farklı üreticiden alınarak test edilmiştir. Harç numunelerin bütün yüzeyleri seçilen kaplama ile kaplandıktan sonra %2.5 H_2SO_4 çözeltisine yerleştirilmiştir. Kaplamalarda meydana gelecek bozulmalar 1'den 5'e kadar bozulma oranı olarak numaralandırılmıştır. 1 numara kaplamada hiç bozulma olmadığını, 5 numara ise kaplamanın tamamen bozulduğunu göstermektedir, yani numaranın büyümesiyle kaplamadaki bozulma arasında doğru orantı bulunmaktadır. 60 günün sonunda çözeltiden çıkarılan numunelerin değerlendirilme sonuçları ise, her iki firmadan temin edilen epoksi kaplama ve poliüretan kaplamanın bozulma oranı 2 olup en iyi sonucu verirken, akrilik kaplamaların bozulma oranı 3, ilk firmadan temin edilen klor-kauçuk kaplamanın bozulma oranı 5, ikinci firmadan temin edilen klor-kauçuk kaplamanın bozulma oranı 4, polimer emülsiyon kaplamaların ise bozulma oranı 5 olarak belirlenmiştir.

Chang vd., (2005) betonun sülfürik asit direncini geliştirmek amacıyla farklı bağlayıcılar ve iki farklı agrega kullanarak numuneler üretmişlerdir. Bağlayıcı malzemesi olarak PÇ, granüle YFC, UK ve silis dumanı kullanarak farklı kombinasyonlarla, agrega olarak da kalkerli kireçtaşı agregası ve silisyumlu agrega kullanarak numuneler üretilmiştir. Numuneler kürden sonra %1 H_2SO_4 çözeltisine bırakılmıştır. Numuneler 168 gün boyunca çözeltide bekletilmiştir. Deney sonuçlarına göre en iyi sonuç, %60 PÇ + %33 UK + %7 silis dumanı kullanılarak üretilen kireç taşı agregalı numunelerde gözlemlenmiştir.

Ghrici vd., (2007) doğal puzolan ve kireçtaşı filleri PÇ'ye ikame ederek harç numuneler üretmişlerdir. Bu amaçla %100 PÇ, %70 PÇ + %30 doğal puzolan, %85 PÇ + %15 kireçtaşı filleri, %70 PÇ + %20 doğal puzolan + %10 kireçtaşı filleri olacak şekilde numuneler hazırlanmıştır. Harç numuneleri kürden sonra 180 gün %1 HCl ve %3 H_2SO_4 çözeltilerinde bekletilmiştir. HCl çözeltisine maruz kalan hem %15 kireçtaşı filleri içeren harçların hem de katkısız harçların ağırlık kayıpları yaklaşık %35'tir. %30 doğal puzolan ve %20 doğal puzolan + %10 kireçtaşı filleri içeren harçların ağırlık kayıpları ise katkısız harçla karşılaştırıldığında, kontrol

numunelerine göre sırasıyla %16 ve %6 daha azdır. H_2SO_4 çözeltilerine maruz kalan katkısız harçların ve %30 doğal puzolan içeren harçların ağırlık kayıpları yaklaşık %75'tir. %15 kireçtaşı filleri ve %20 doğal puzolan + %10 kireçtaşı filleri içeren harçların ağırlık kayıpları ise katkısız harçla karşılaştırıldığında, sırasıyla %24 ve %10 daha azdır. Deney sonuçlarına göre doğal puzolanın HCl direncini arttırdığı, kireçtaşı fillerinin de H_2SO_4 direncini arttırdığı sonucu çıkarılabilmektedir.

Sathia vd., (2008) aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanarak üç farklı dozajda (350, 450 ve 550 kg/m³) UK içeren geopolimer beton numuneleri üretmişlerdir. Üretilen numuneler 28 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra %3 sülfürik asit çözeltisinde 90 gün bırakılmış ve numunelerin ağırlık değişimleri incelenmiştir. Deney süresi boyunca çözeltinin konsantrasyonu kontrol edilip belirli aralıklarla yenilenmiştir. Çözeltiden çıkarılan numuneler yumuşak bir fırça yardımıyla musluk suyunda yüzeyleri temizlenip yüzeyleri kuruduktan sonra numuneler tartılmıştır. Bütün geopolimer betonlardaki ağırlık kaybının %0.5'ten az olduğu görülmüştür.

Goyal vd., (2009) ürettikleri normal PÇ, PÇ + silis dumanı ve PÇ + silis dumanı + UK bağlayıcılı beton numunelerin %1 sülfürik asit, %1 nitrik asit ve %1 hidroklorik asit çözeltilerine 48 hafta süresince maruz kalmaları durumunda numunelerin kütle kayıpları ve basınç dayanımlarının nasıl değiştiğini gözlemlemişlerdir. Deney sonucunda mineral katkıların betonun asit saldırılarının bozucu etkilerini azalttığı görülmüştür. Üçlü bağlayıcı (PÇ + silis dumanı + UK) kullanılarak üretilen beton numuneleri, ikili bağlayıcı (PÇ + silis dumanı) kullanılarak üretilen beton numunelerine göre daha iyi sonuç göstermiştir.

Adesanya ve Raheem (2010), yaptıkları çalışmada çimento miktarının %0, %2, %4, %6, %8, %10, %15, %20 ve %25'i kadar mısır koçanı külü ikame ederek harç numuneleri üretmişlerdir. Üretilen harç numuneleri kürden sonra H_2SO_4 ve HCl çözeltilerine yerleştirilmiştir. Deney sonuçları %15'e kadar mısır koçanı külü ikame edilmesinin kimyasal saldırılara karşı harçların direncini arttırdığını göstermiştir..

Najimi vd., (2012) yaptıkları çalışmada doğal zeolit içeren betonun durabilitesini incelemişlerdir. Bu amaçla beton içerisine çimento miktarının %15 ve %30 oranında doğal zeolit ikame edilerek numuneler üretilmiş ve doğal zeolit içermeyen kontrol betonuyla karşılaştırılmıştır. Numuneler hazırlanıp 28 gün kür edildikten sonra 28 gün de laboratuvar koşullarında bekletilip ağırlıkları ölçüldükten sonra H_2SO_4 çözeltisine yerleştirilmiştir. 300 gün boyunca sülfürik asit çözeltisi

içerisinde bekleyen numunelerin basınç dayanımlarındaki azalmalar ve ağırlık değişimleri belirlenmiştir. Asit çözeltisi içerisindeki kontrol betonun ağırlığı artarken, doğal zeolit katkılı betonlarda ise ağırlık kaybı olduğu belirlenmiştir. Basınç dayanımındaki azalmaların belirlenmesi için suda ve asit çözeltisinde bekleyen numunelerin basınç dayanımları ölçülmüş ve basınç dayanımındaki azalmalar yüzde olarak hesaplanmıştır. Deney sonuçlarına göre, basınç dayanımındaki azalma yüzdeleri kontrol betonunda %6, %15 doğal zeolit ikame edilen betonda %21, %30 doğal zeolit ikame edilen betonda ise %23 olduğu görülmüştür.

Onuaguluchi ve Eren (2012), bakır atıklarının çimento harcında bir katkı maddesi olarak kullanımını araştırmışlardır. Çimentonun kütlece %0, %5 ve %10'u kadar bakır atıkları katılarak harçlar üretilmiştir. Asit saldırısına maruz kalan harç numunelerin kütle kayıpları belirlenmiştir. Üretilen numuneler 90 gün havada kür edildikten sonra %5 HCl çözeltisine yerleştirilmiş ve asit çözeltisi içerisinde 28 gün bekletilmiştir. Deney sonuçlarına göre çimento harcı içindeki bakır atıklarının artmasıyla birlikte kütle kaybının azaldığı saptanmıştır.

Dursun (2013), yaptığı çalışmada çimento ağırlığınca %0.2, %0.3 ve %1 oranlarında zantan gam, kitin ve kitosan biyopolimerleri katarak çimento harç numuneleri üretmiştir. 28 gün suda kür edilen numuneler %3, %5 ve %7 HCl çözeltilerinde 7 gün bekletilmiştir. Numunelerin asit çözeltisine konulmadan önceki ve sonraki ağırlıkları ölçülüp ağırlık kayıpları belirlenmiştir. HCl çözeltisinde en fazla ağırlık kaybı zantan gam kullanılarak üretilen numunelerde görülürken, kitin ve kitosan biyopolimerlerinin betonda katkı olarak kullanımında ise ağırlık kaybını azalttığı görülmüştür.

Ariffin vd., (2013) çalışmalarında öğütülmüş yakıt külü ile palm yağı yakıt külünü alkali aktivatörlerle karıştırarak hazırladıkları geopolimer betonları 18 ay boyunca %2 sülfürik asit çözeltisine bırakmışlardır. Deney periyodu sonunda numunelerdeki basınç dayanımı kaybının %35, ağırlık kaybının ise %8 olduğu görülmüştür.

Thomas vd., (2015) ince agreganın %0'dan %20'lik kısmına kadar %2.5 oranında artışla lastik kırıntıları kullanarak yüksek dayanımlı beton üretmişlerdir. Bu beton numuneleri de %3 H₂SO₄ çözeltisine bırakılmıştır. Asit çözeltisi içerisinde numuneler 84 gün bekletildikten sonra numunelerin basınç dayanımları, ağırlık kayıpları ve su emme oranları ölçülmüştür. Beton numunelerin içerdiği lastik kırıntı

yüzdesi arttıkça su emme oranının arttığı belirlenmiştir. En fazla ağırlık kaybı %8.53'lük azalmayla %2.5 lastik kırıntısı içeren numunelerde görülürken, en az ağırlık kaybı ise %6.31'lik azalmayla %17.5 lastik kırıntısı içeren numunelerde görülmüştür. 84 gün sonraki basınç dayanımlarında ise, lastik kırıntı miktarı arttıkça numunelerin basınç dayanımlarındaki kayıpların azaldığı belirlenmiştir.

Siad vd., (2016) yaptıkları çalışmada asit etkisine maruz kalan harçların dayanıklılığını arttırabilmek amacıyla, çimentoya bir miktar cam tozu, kireçtaşı tozu, cüruf ve UK ikame ederek harç numuneleri üretmişlerdir. Üretilen numuneler 12 hafta süresince %5 H_2SO_4 çözeltisinde bekletilmiştir. Deney sonuçlarına göre çimentonun %45'ine kadar cam tozu ikame edilmesinin, sülfürik asit saldırısına karşı harçların direncini arttırdığı belirlenmiştir.

Acharya ve Patro (2016), yaptıkları çalışmada betona %10, %20, %30 ve %40 oranında çimento yerine ferrokrom külü ve %7 oranında kireç ikame ederek numuneler üretmişlerdir. Üretilen numunelerin asit direnci ve dayanım özellikleri incelenmiştir. Numuneler 28 gün kürden sonra %1 H_2SO_4 çözeltisine yerleştirilmiştir. Numuneler çözelti içerisinde 28, 91 ve 180 gün bekletildikten sonra deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre betona %40 ferrokrom külü ile %7 kireç ikame edilen numuneler, katkısız normal betondan daha iyi özellikler göstermiştir.

Nuaklong vd., (2018) yüksek kalsiyumlu UK esaslı geopolimer betonlara metakaolin ikame edilmesini incelemişlerdir. Bu amaçla betona UK yerine %0, %10, %20 ve %30 oranlarında metakaolin ikame edilmiş ve iri agrega olarak geri dönüşüm agregası kullanılarak beton numuneleri üretmişlerdir. Numuneler 120 gün %3 sülfürik asit çözeltisinde bekletilmiştir. Deney sonunda ağırlık değişimi incelendiğinde en fazla kayıp kontrol numunelerinde görülmüştür.

2.5. Betonda Tuz Etkisi

Beton boşluklarına çözünmüş halde giren tuz konsantrasyonu, ıslanma-kuruma ile birlikte giderek artmaktadır. Tuz konsantrasyonunun %4-5 seviyelerine ulaşması halinde tuzların kristallenmesi etkili olmaktadır. Tuzlu suların beton boşluklarına girmesi sonucu, tuzlu sular boşluklarda kristalleşerek don etkisinde olduğu gibi genişmeye neden olabilir. Kristal suyu içeren tuzların molar hacmi çözelti içinde kapsadığı hacimden çok daha yüksektir. Çizelge 2.3'te pratikte sıkça rastlanan bazı

tuzların molar hacimleri gösterilmektedir. Beton bünyesine giren tuzların zararlı etkileri şu şekildedir (Yalçın ve Gürü, 2006):

1. Beton içerisine giren tuzların (başta CaCl_2 ve NaCl olmak üzere) higroskopik karakterleri sebebiyle betonun su ile doygunluk derecesi artar.
2. Beton bünyesine giren tuz konsantrasyonu üniform bir dağılım göstermeyerek yer yer farklı olmaktadır. Kapiler boşluklar içinde meydana gelen osmotik basınçta bu fark nedeniyle artar.
3. Suyun kısmen uzaklaşması ile beraber beton bünyesine giren tuzlu suların doygun hale gelmesiyle kristaller oluşur.

Çizelge 2. 3. Bazı tuz kristallerinin yoğunluğu ve molar hacimleri (Yalçın ve Gürü, 2006)

Tuz	Kimyasal Formülü	Yoğunluğu g/cm^3	Molar hacmi cm^3/mol
Kalsiyum sülfat	CaSO_4 (Anhidrit)	2.96	46
	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Jips)	2.32	55
Magnezyum sülfat	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (kieserit)	2.45	57
	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Hegzahidrat)	1.75	130
	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Epsomit)	1.68	147
	$\text{MgSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (Dodekahidrat)	1.45	232
Sodyum sülfat	Na_2SO_4 (Tenardit)	2.68	53
	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Mirabilit)	1.46	220
Sodyum karbonat	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (termonatrit)	2.25	55
	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Heptahidrat)	1.51	154
	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Natron)	1.44	199

2.6. Betonda Sülfat Etkisi

Sülfat saldırıları, beton yapıların uzun vadede durabilitesini etkileyen en agresif çevresel bozulmalardan biridir. Sülfat saldırıları köprüler, iskeleler, beton borular, temeller vb. sülfat etkisine maruz kalan birçok mühendislik yapılarının genişlemesine, çatlamasına ve bozulmasına yol açmaktadır. Toprakta, yeraltı suyundan ve deniz suyundan gelen sülfat iyonları sodyum, magnezyum, kalsiyum ve potasyum iyonları gibi diğer iyonlarla kombinasyon halinde bulunurlar (Al-Akhras, 2006).

Magnezyum sülfat, sodyum sülfat, kalsiyum sülfat ve potasyum sülfat vb. tuzlar bazı killi topraklarda, yeraltı sularında ve cürufıla doldurulmuş arazilerde oldukça yüksek miktarlarda bulunabilmektedir. Aynı zamanda deniz suları da önemli

miktarlarda sülfat içermektedir. Sertleşmiş beton içerisine sülfatlar dışarıdan sızan sularla birlikte girmektedir. Sülfatların varlığıyla oluşan kimyasal olaylar sonucunda beton genleşip çatlamaktadır (Erdoğan, 2003).

Sülfat saldırılarından dolayı betonun bozulma mekanizmasını tanımlamak için birden fazla teori vardır (Suleiman, 2014):

1. Katı hacim değişimi
2. Tehlikeli tuz hidratasyonu
3. Kristalizasyon basıncı

Genellikle sülfat saldırıları sonucunda sülfat iyonları ile kalsiyum hidroksit ve kalsiyum alüminat hidratlar rekasiyona girerek alçıtaşı ve etrenjit oluşumuna neden olmaktadır (Al-Akhras, 2006; Ramyar ve İnan, 2007). Sülfat saldırısı sonucu oluşan bu etrenjit ve alçıtaşı bileşenleri başlangıçta tepkimeye giren maddelere göre oldukça büyük hacimlidir. Etrenjit ve alçıtaşı oluşumu betonarme yapılarda genleşmeye, çatlak oluşumuna, bozulmalara ve parçalanmalara neden olmaktadır. Etrenjit ve alçıtaşı oluşumundan sonra, sülfat saldırılarından dolayı süzülen kalsiyum bileşiği, kalsiyum silika hidrate (C-S-H) jelinin bozulmasına neden olmaktadır. Bu süreç C-S-H jelinin sertliğini kaybetmesine ve çimento hamuru matrisinin bozulmasına yol açmaktadır (Al-Akhras, 2006; Bulatović vd., 2017).

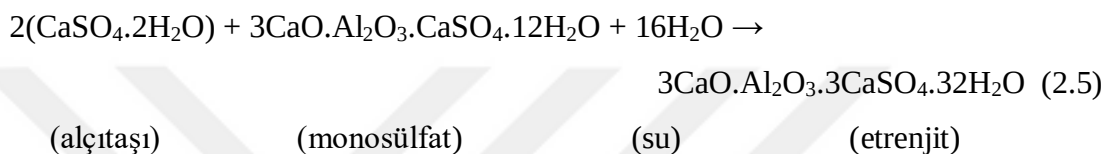
Betonun sülfat saldırılarına karşı direncini belirleyen ana bileşenler çimentodaki serbest kireç (Ca(OH)_2), kalsiyum alüminat (C_3A) ve ferroalüminat fazlarıdır. Etrenjit ve alçıtaşı çimento hidratasyonunun iki tane kimyasal ürünüdür. Etrenjit oluşumu genleşmeye yol açan hacim artışına neden olmaktadır. Eğer bu hacim artışı sınırlandırılırsa çatlaklara yol açmaktadır. Alçıtaşı oluşumunda ise betonun ağırlık ve dayanım kaybetmesine ve rijitliğini kaybetmesine neden olmaktadır (Wang vd., 2017).

Çimento bileşimi, betonun geçirimsizliği, s/b oranı, sülfat tuzlarındaki katyon türü, sülfat iyonlarının konsantrasyonu, maruz kalma koşulları ve maruz kalma süresi, yeraltı su seviyesi ve yeraltı su seviyesinin hareketliliği gibi sülfat direncini etkileyen birçok faktör vardır (Irassar vd., 1996; Bulatović vd., 2017).

2.6.1. Dış kaynaklı sülfat saldırısı

Dış sülfat saldırılarının yol açtığı betondaki bozulmalar genel olarak yüksek konsantrasyonda sülfat iyonları içeren yeraltı sularına, topraklara, deniz sularına,

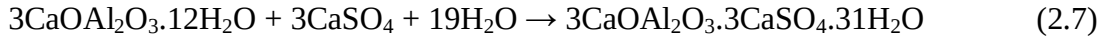
Beton içerisine dışarıdan sülfat girmesi durumunda, sülfat ile alçıtaşı, C_3A ve/veya monosülfat reaksiyona girerek etrenjit oluşumuna neden olurlar (Denklem 2.4 ve 2.5) (Tosun vd., 2009).



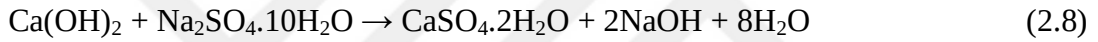
Beton içerisine su içinde çözülmüş olarak giren sülfat iyonlarının etkisi iki şekilde görülür. Birincisi, beton boşluklarında bulunan kalsiyum hidroksit ile magnezyum sülfatın birleşmesi ile oluşan kalsiyum sülfattır (Denklem 2.6). Bu reaksiyon sonucu meydana gelen magnezyum hidroksitin çözünürlüğü az olduğundan dolayı çökelmektedir. İki mol su bağlayan kalsiyum sülfat kristal hale gelir ve yaklaşık %15 oranında bir hacim genişlemesine neden olmaktadır (Yalçın ve Gürü, 2006).



Sülfatın betona asıl zararlı etkisi, kalsiyum sülfat ile C₃A arasında oluşan kimyasal reaksiyondur (Denklem 2.7). Bu reaksiyon sonucunda 31 mol kristal suyu içeren trikalsiyum alüminat (Candlot tuzu) oluşmaktadır ve bu bileşiğin mukavemeti yoktur. Bu bileşik beton içinde hacim genişlemesine (%227 oranında) neden olarak betonun çatlamasına ve parçalanmasına yol açmaktadır (Yalçın ve Gürü, 2006).



Sodyum sülfat ile Ca(OH)₂ arasındaki reaksiyon Denklem 2.8’de belirtilmektedir. Bu reaksiyonun gerçekleşmesi sonucunda katı fazın hacmi %124 oranında artmaktadır. Suyun sürekli yıkaması nedeniyle Ca(OH)₂ tamamen bünyeden uzaklaşabilir. Reaksiyon, NaOH’in birikimi sonucunda dengeye ulaşıncaya, sadece SO₃’ün bir miktarı alçı taşına dönüşmektedir (Baradan vd., 2002).



2.6.2. İç kaynaklı sülfat saldırısı

İki tür iç kaynaklı sülfat etkisi vardır. Birincisi normal sıcaklıktaki beton ve harçlarda oluşan iç kaynaklı sülfat etkisidir. İkincisi ise buhar kürü gibi yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonlarda oluşan iç kaynaklı sülfat etkisidir. Beton üretimi aşamasında su ile çimento ürünlerinin reaksiyonu sonucu çimentodaki alüminler ile sülfat bulunduran elemanların reaksiyonundan birincil etrenjit oluşmaktadır. Çimento hidratasyonunda fazla gelen Al₂O₃ ve SO₃, sertleşmiş betonda uygun şartlar altında kimyasal reaksiyonlar gerçekleştirerek agrega arayüzeyinde ve çimento hamurunda etrenjit oluşumuna neden olabilmektedirler. Çimento ile birlikte beton içerisine giren sülfatlar, alitlerle (C₃A ve CA) ve feritlerle (C₄AF) reaksiyon gerçekleştirerek tüketilirler. İç kaynaklı sülfat etkisi, üretim aşamasında buhar kürü ya da yüksek sıcaklıkta bakım uygulanan ve yüksek sülfat içeren çimentolarla üretilen betonlarda görülmektedir. Buradaki yüksek sıcaklık betonun hidratasyonu sonucu oluşan sıcaklık veya beton üretimi sırasındaki yüksek çevre sıcaklığından kaynaklanabilir. Yüksek sıcaklıkta küre maruz kalan betonların kür sonrasında nemli ortamda bulunmaları durumunda, iç kaynaklı sülfat atağından dolayı betonda etrenjit oluşmaktadır. Buhar kürü gibi yüksek sıcaklıkta üretilen betonlarda bünyedeki

sülfattan dolayı etrenjit oluşmaktadır. Literatürde bu olaya gecikmiş etrenjit oluşumu da denilmektedir (Ustabaş, 2008).

Peiwei vd., (2001) yaptıkları çalışmada normal PÇ'ye bir miktar çok ince mineral fosforik cüruf tozu ikame edilerek üretilen yüksek performanslı betonun durabilitesini, dayanım ve dayanıklılığını incelemişlerdir. İki farklı oranda cüruf tozu ikame edilerek harç numuneler üretilmiştir. Suda 14 gün kür edilen numuneler, %5 NaCl + %5 Na₂SO₄ çözeltilerine yerleştirilip 90 ve 180 gün bekletildikten sonra çekme ve basınç dayanımları ölçülmüştür. Deney sonuçlarına göre hem 90 gün hem de 180 gün boyunca tuz saldırısına maruz kalan numunelerden en yüksek basınç ve çekme dayanımları sırasıyla %30 cüruf tozu kullanılarak üretilen numune, %50 cüruf tozu kullanılarak üretilen numune ve katkısız %100 normal PÇ'li numune şeklinde ölçülmüştür.

Yıldırım (2007), iki farklı dozajda (350 ve 450 kg/m³) hafif beton üretmiş ve üretilen numunelerin normal suda ve farklı agresif ortamlarda (tuzlu su ve asidik ortam) dayanımlarını incelemiştir. Numunelerde pomza agregası kullanılmış ve numunelere çimento ağırlığınca %20 oranında UK katılmıştır. Numuneler 7, 28 ve 90 gün %3 NaCl, pH değeri 3-6 arasında olan H₂SO₄ çözeltisi ve normal suda kür edilmiştir. Deney sonuçlarına göre en fazla çekme dayanımı sırasıyla normal suda, NaCl çözeltisinde, H₂SO₄ çözeltisinde kür edilen numunelerde görülmüştür. Dozaj miktarı arttıkça basınç ve çekme dayanımı da artmıştır.

Yıldız (2009), betona %0 pomza + %15 zeolit, %5 pomza + %10 zeolit, %10 pomza + %5 zeolit, %15 pomza + %0 zeolit katarak dört grup numune üretmiştir. Numuneler 28 gün kirece doygun suda kür edildikten sonra 7500 mg/l MgSO₄, %5 H₂SO₄, %5 NaCl ve kirece doygun suya konularak 28, 56 ve 90 gün bekletilmiştir. Numunelere en fazla hasarı H₂SO₄ çözeltisi verirken, NaCl ve MgSO₄ çözeltilerinin hasarlı etkisi ise betonun ilerleyen yaşlarında meydana gelmektedir. Agresif ortamlarda çok yüksek dayanım aranması halinde %0 pomza + %15 zeolit ve %5 pomza + %10 zeolit katkılı betonların, yüksek dayanım aranması halinde ise %10 pomza + %5 zeolit ve %15 pomza + %0 zeolit katkılı betonların kullanılabileceği belirlenmiştir.

Muhammad ve Ismail (2012), yaptıkları çalışmada doğal kauçuk lateks modifiyeli beton numunelerin kimyasal saldırılara karşı direncini belirlemişlerdir. H₂SO₄ çözeltisi için numunelerin lateks/su oranı %1.5, %5, %10 olarak, Na₂SO₄ çözeltisi için numunelerin lateks/su oranı %1.5, %3, %5 olacak şekilde numuneler

üretmiştir. %5 H_2SO_4 ve %2.5 Na_2SO_4 çözeltileri oluşturularak iki tane agresif kür koşulunda numuneler incelenmiştir. Deney sonuçları göstermiştir ki, beton içerisinde uygun miktarda lateks kullanımı, H_2SO_4 ve Na_2SO_4 saldırılarını önlemede önemli bir rol oynamıştır. Na_2SO_4 saldırısında lateks modifiyeli betonların normal betondan daha iyi dayanım kazandıkları belirlenmiştir. Ancak, fiziksel gözlemlerlerde lateks modifiyeli betonların H_2SO_4 etkisi altında büyük hacim değişikliğine uğradıkları görülmüştür.

Nguyen ve Škvára (2016), UK esaslı geopolimer harç numuneleri üretmişler ve bu numuneleri pH değeri 1 ve 2 olan HCl çözeltilerine, pH değeri 12,13 ve 14 olan NaOH çözeltilerine ve pH değeri 7 olan suya bırakmışlardır. Deney sonucunda geopolimer harçların zamanla kimyasal kompozisyonu ve yapısı değişse de, harçların mekanik özellikleri pH= 1'den pH= 14'e kadar çok değişkenlik göstermemiştir. Numuneler yüksek pH ortamına maruz kaldıklarında Si-O-Si bağının bozulması sebebiyle numunelerin basınç dayanımında azalmalar meydana gelmektedir. Ancak yeni oluşan Al-O-Si bağının üretilmesi bu dayanım düşüşünün hızının azaltılmasını sağlamakta olduğu düşünülmektedir. Bu Al-O-Si bağının etkisi HCl çözeltisinde Si-O-Si bağına göre daha zayıftır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

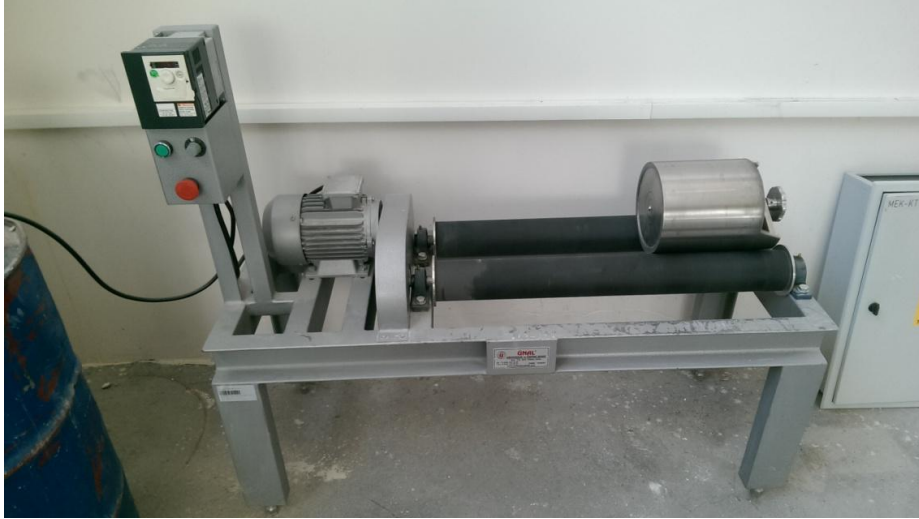
3.1. Materyal

3.1.1. Elazığ ferrokrom cürufu ve özellikleri

Elazığ ferrokom tesislerinden temin edilen EFC'lerin aktivasyon işleminin gerçekleştirilmesi için öğütülmesi gerekmektedir. EFC'ler Şekil 3.1'deki değirmen vasıtasıyla öğütülmüştür. 12 saat süresince öğütülen EFC 45 μm 'lik elekten elenip, geopolimer beton karışımında elekten geçen malzeme kullanılmıştır. EFC'nin özgül ağırlığı 2.86 g/cm³'tür. EFC'nin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1'de verilmiştir. EFC'nin doğal, öğütülmüş ve elenmiş hali Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3. 1. Elazığ ferrokrom cürufu ve yüksek fırın cürufunun 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



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. Malzeme yeterli incelikte olduğundan dolayı mevcut haliyle kullanılmıştır. YFC'nin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1'de verilmiştir.

3.1.3. Aktivatörler

Bu çalışmada üretilen geopolimer beton numunelerinde sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum metasilikat (Na_2SiO_3) alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Geopolimer beton karışımında kullanılan NaOH çözeltisi musluk suyu ile oluşturularak belirlenen molaritede hazırlanmıştır. Kullanılan aktivatörlerin kimyasal özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

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

Özellikler	Sodyum Hidroksit	Sodyum Metasilikat
Molekül formülü	NaOH	Na_2SiO_3
Molekül kütlesi (g/mol)	40.00	122.06
Renk	Beyaz	Beyaz
pH	13-14	-
Bağıl yoğunluk (g/cm^3)	2.13	1.38
Na_2O içeriği (%)	-	8.9
SiO_2 içeriği (%)	-	27.5
H_2O içeriği (%)	-	63.6

3.1.4. Agregat

Üretilen geopolimer beton numuneleri için ince agregat olarak dere kumu, iri agregat 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. Agrega

3.1.5. Asitler

Merck marka %85 konsantrasyonlu H_3PO_4 çözeltisi, %37 konsantrasyonlu HCl çözeltisi, %40 konsantrasyonlu HF çözeltisi ve %95-97 konsantrasyonlu H_2SO_4 çözeltisi şebeke suyuyla seyreltilerek %5 konsantrasyonlu H_3PO_4 , HCl , HF ve H_2SO_4 çözeltileri oluşturulmuştur. Oluşturulan asit çözeltilerinin pH değerleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Hazırlanan asit çözeltileri deney süresince dört haftalık periyotlarla yenilenmiştir. Deneyde kullanılan asitler Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 4. Deneyde kullanılan asitler

3.1.6. Tuzlar

Merck marka $NaCl$ ve $MgCl_2$ şebeke suyuyla karıştırılarak %5 konsantrasyonlu $NaCl$ ve $MgCl_2$ çözeltileri oluşturulmuştur. Oluşturulan tuz çözeltilerinin pH değerleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Hazırlanan tuz çözeltileri deney

süresince dört haftalık periyotlarla yenilenmiştir. Deneyde kullanılan tuzlar Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 5. Deneyde kullanılan tuzlar

3.1.7. Sülfatlar

Merck marka $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 şebeke suyuyla karıştırılarak %5 konsantrasyonlu $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 çözeltileri oluşturulmuştur. Oluşturulan sülfat çözeltilerinin pH değerleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Oluşturulan sülfat çözeltileri deney süresince dört haftalık periyotlarla yenilenmiştir. Deneyde kullanılan sülfatlar Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3. 6. Deneyde kullanılan sülfatlar

Çizelge 3. 3. Asit, tuz ve sülfat çözeltilerinin pH değerleri

Çözelti	pH
%5 H ₃ PO ₄	1.91
%5 HCl	0.72
%5 HF	3.13
%5 H ₂ SO ₄	1.44
%5 NaCl	7.60
%5 MgCl ₂	7.32
%5 MgSO ₄	7.70
%5 Na ₂ SO ₄	8.14

3.1.8. Aletler

3.1.8.1. Elekler

Geopolimer beton karışımında kullanılacak agreganın gerekli tane boyutlarına göre elenmesi için TS ISO 3310-2 (2015)'ye uygun olan Şekil 3.7'deki toplama kabı, 4 mm ve 8 mm göz açıklıklı kare delikli tel elekler kullanılmıştır.



Şekil 3. 7. Elekler

3.1.8.2. Beton karışım mikseri

Geopolimer beton üretimi için 5 litre kapasiteli düşük ve yüksek hızda karışım seçeneklerine sahip Şekil 3.8'deki Arma Test markalı laboratuvar tipi beton karışım mikseri kullanılmıştır.



Şekil 3. 8. Beton karışım mikseri

3.1.8.3. Çelik kalıplar

Hazırlanan geopolimer beton karışımları, Şekil 3.9'da görülen 50x50x50 mm ve 40x40x160 mm boyutlara sahip çelik kalıplara yerleştirilmiştir.



Şekil 3. 9. Çelik kalıplar

3.1.8.4. Etüv

Agreganın özgül ağırlık ve su emme oranı tayini deneylerinde ve geopolimer beton numunelerin kür aşamasında Şekil 3.10'daki Mikrotest marka dijital termostatlı etüv kullanılmıştır.



Şekil 3. 10. Etüv

3.1.8.5. Basınç dayanım cihazı

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



Şekil 3. 11. Basınç dayanımı test cihazı

3.1.8.6. Ultrasonik ses hızı ölçüm cihazı

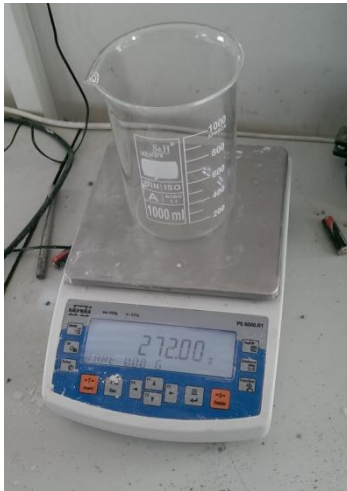
Numunelerin UPV ölçümleri için Şekil 3.12'deki Proceq marka UPV cihazı kullanılmıştır. Numunelerin ölçüm yapılacak yüzeylerine ultrason jeli sürülmüştür.



Şekil 3. 12. UPV ölçüm cihazı

3.1.8.7. Terazî

Çözelti içerisinde bekletilen numunelerin deney süresince ölçüm periyotlarında ağırlık değişimlerinin belirlenmesi için numunelerin ağırlık ölçümlerinde Şekil 3.13'deki Radwag marka 0.01 g hassasiyetli terazi kullanılmıştır.



Şekil 3. 13. Terazî

3.1.8.8. pH metre

Hazırlanan asit, tuz ve sülfat çözeltilerin pH'larının ölçülmesi için Şekil 3.14'deki Hanna marka pH metre kullanılmıştır.



Şekil 3. 14. pH metre

3.1.8.9. Boy değişimi ölçüm çerçevesi

Üretilen 40x40x160 mm boyutlarındaki geopolimer beton numunelerin boy ölçümleri için Şekil 3.15'deki dijital ekranlı boy değişimi ölçüm çerçevesi kullanılmıştır.



Şekil 3. 15. Boy değişimi ölçüm çerçevesi

3.1.8.10. SEM cihazı

Geopolimer beton numunelerin içyapı analizlerinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Analiz için Şekil 3.16'daki LEO EVO 40 isimli SEM cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3. 16. SEM cihazı

3.1.9. Diğer malzemeler

Geopolimer beton numunelerin kalıptan kolay çıkarılabilmesi için kalıpların döküm yapılan yüzeyleri döküm yapılmadan önce ince motor yağı ile yağlanmıştır. Durabilite deneyleri için hazırlanan asit, tuz ve sülfat çözeltileri için kapaklı plastik saklama kapları kullanılmıştır. UPV ölçümü için numunelerin ölçüm yapılan yüzeylerine ultrason jeli sürülmüştür. Çözeltilerden çıkarılan numuneler musluk suyu altında yıkandıktan sonra 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 anlatılmıştır. Hazırlanan asit, tuz ve sülfat çözeltilerinin geopolimer beton numunelerine etkisini incelemek için yapılan ölçümler anlatılmıştır.

3.2.1. Agregada deneylerinde uygulanan yöntemler

Temin edilen dere agregaları musluk suyu ile yıkanıp laboratuvar ortamında bir gün bekletildikten sonra kullanılacağı güne kadar depolanmıştır. Geopolimer beton üretiminde kullanılmak üzere temin edilen dere agregasının özelliklerini belirleyebilmek amacıyla numune alımında TS EN 932-2 (1999)'de belirtilen çeyreklenme metodu kullanılmıştır.

Çeyreklenme metodu ile numune alınmasında, numune koni oluşturacak şekilde karıştırılmış ve ardından numuneler kürekle alınarak tekrar bir koni oluşturulmuştur. Kürekle numune dökümü yapılırken farklı boyuttaki agregaların yığına eşit dağıtılacak biçimde dökülmesine dikkat edilmiştir. Üç defa bu işlem tekrar edildikten sonra yığın kürek yardımıyla düzgün yükseklik ve çapı olan bir daire biçiminde düzleştirilmiştir. Ardından bu daire kürekle dört parçaya bölünmüş, karşılıklı iki parçası atılıp, deneyler için gerekli miktarda numune kalıncaya kadar çeyreklenme işlemi tekrarlanmıştır (Şimşek, 2010).

Dere agregasının tane büyüklüğü dağılımı TS EN 933-1 (2015)'e göre 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.

Geopolimer beton karışımlarında en büyük agregada tane boyutu 8 mm olarak seçilmiş ve dere agregası kullanılmıştır. 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. Temin edilen agregalardaki ince madde miktarını azaltmak için agregalar yıkandıktan sonra kullanılmıştır.

3.2.2. Geopolimer beton karışım seçeneklerinin belirlenmesi

Geopolimer beton karışımları için bağlayıcı dozajı 400 kg/m^3 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 3.4'te geopolimer beton karışımı kodları verilmiştir. Yapılan denemeler sonucu optimum silis modülü 1.5, s/b oranı 0.43, NaOH çözeltisinin molaritesi 10 M ve ağırlıkça sodyum oksit içeriği %10 olarak belirlenmiştir. Bu değerlere göre aktivatör miktarı ve hacmi hesaplanmıştır. Bağlayıcı malzemelerin ve aktivatörlerin hacimlerinin 1 m³'den çıkarılması ile toplam agrega hacmi hesaplanmıştır. Belirlenen geopolimer beton karışım miktarları Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3. 4. 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. 5. 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 agregası ve iri agregası mikser kabına eklenerek karıştırılmıştır.

Hazırlanan geopolimer beton karışımı 50x50x50 mm ve 40x40x160 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 3.17). 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 3.18'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 17. Kalıpların etüve konması



Şekil 3. 18. Geopolimer beton numuneleri

3.2.4. Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler

Bu çalışma kapsamında üretilen geopolimer beton numuneleri 28 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra %5 konsantrasyonundaki H_3PO_4 , HCl , HF , H_2SO_4 , $NaCl$, $MgCl_2$, $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 çözeltilerine yerleştirilmiştir. Numuneler 12 hafta boyunca çözeltilerde bekletilmiş ve bu süre içerisinde numunelerin basınç dayanımları, UPV'leri, ağırlık ve boy değişimleri belirlenmiş ve görsel olarak değişimleri ile içyapıları incelenmiştir. Bu ölçüm değerleri, aynı yaştaki suda bekletilen kontrol numunelerin ölçüm değerleriyle karşılaştırılmıştır.

3.2.4.1. Basınç dayanımı

Geopolimer beton numunelerin basınç dayanımının belirlenmesi için TS EN 12390-3/AC (2012) ve 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. Üretilen bu numuneler %5 konsantrasyonlu 4 adet asit (H_3PO_4 , HCl , HF , H_2SO_4), 2 adet tuz ($NaCl$, $MgCl_2$) ve 2 adet sülfat ($MgSO_4$, Na_2SO_4) çözeltilerinde 12 hafta boyunca bekletilmiştir. 4, 8 ve 12 hafta sonunda çözeltiden çıkartılan numunelerin 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 döküm yönüne dik gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Numuneler cihaza yerleştirilmeden önce cihazın yükleme yüzeyleri temizlenmiştir. Numuneler aparata düzgün şekilde yerleştirildikten sonra cihaz ekranından numune boyutları seçilip, otomatik olarak cihaz tarafından numuneler 1.40 kN/s yük hızıyla yüklenmektedir. Numunelerin basınç dayanımları Denklem 3.1'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.

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

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 kalitesiz olduğu düşünülmektedir (Şimşek, 2010.)

UPV ölçümü ASTM C 597'deki prosedüre uygun olarak ölçülmüştür. İlk olarak ölçümlere başlamadan önce UPV ölçüm cihazının kalibre olup olmadığı kontrol edilmekte ve eğer cihaz kalibre değilse kalibre malzemesi ile cihaz kalibre edilmektedir. Ölçüm için numuneler çözeltiden çıkarılıp musluk suyunda yıkanıp ardından kağıt havlu ile yüzeyleri kurulanmıştır. Durulanan numunelerin ölçüm yapılacak yüzeylerine bir miktar ultrason jeli sürüldükten sonra alıcı ve gönderici uçlar ölçüm yüzeylerine tutturularak ölçüm yapılır. Her bir numune için 3 kez UPV ölçümü yapıp bu sonuçların ortalaması alınmıştır. Numunelerin UPV ölçüm değerleri Denklem 3.2 yardımıyla belirlenmiştir.

$$V = \frac{L}{T} \quad (3.2)$$

V: Dalga hızı, (m/s).

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

T: Geçiş süresi, (s).

3.2.4.3. Ağırlık değişimi

ASTM C 267’de belirtilen şekilde numunelerin ağırlık değişimleri hesaplanmıştır. Numuneler çözüldükten çıkarılıp musluk suyu altında yıkanıp ardından kağıt havlu ile yüzeyleri durulanmıştır. Numuneler yaklaşık yarım saat laboratuvar ortamında kurumaya bırakıldıktan sonra 0.01 g hassasiyetli terazide tartılmıştır. Numunelerin ağırlık değişimleri Denklem 3.3’deki formül ile hesaplanmıştır.

$$\text{Ağırlık değişimi (\%)} = \left[\frac{(W - W_0)}{W_0} \right] \times 100 \quad (3.3)$$

W_0 : Numunenin başlangıçtaki ağırlığı, g.

W: Çözeltiye batırıldıktan sonraki numunenin ağırlığı, g.

3.2.4.4. Boy değişimi

Hazırlanan çözümlere maruz kalan numunelerin boy değişimleri üretilen 40x40x160 mm boyutundaki prizmatik numuneler üzerinde ölçülmüştür. Numunelerin boy ölçümleri boy değişimi ölçüm çerçevesi ile yapılmıştır.

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. Asit etkisi

Kür sürelerini tamamlayan numuneler asit çözeltilerine (%5 H_3PO_4 , %5 HCl, %5 HF, %5 H_2SO_4) yerleştirilmiş ve 12 hafta çözeltilerin içerisinde bekletilmiştir (Şekil 3.19). Asit çözeltilerine bırakılan numuneler ASTM C267’de belirtilen yöntemlere göre değerlendirilmiştir. Çözeltilerde bekleyen numunelerin 1, 2, 4, 6, 8, 10 ve 12 haftalık periyotlarda ağırlık ve boy değişimleri ölçülmüştür. Basınç dayanımı ve UPV ölçümleri 4, 8 ve 12 haftalık periyotlarda yapılmıştır. Deney süresince numunelerin görsel olarak değişimleri incelenmiştir. 12 hafta asit çözeltilerinde bekletilen numunelerin içyapı analizleri de yapılmıştır. HF çözeltisine maruz kalan numunelerin yüzeylerinde asit ile etkileşimden dolayı köpük vb. oluşumlar meydana geldiğinden HF çözeltisindeki numunelerin UPV ölçümleri yapılamamıştır.



Şekil 3. 19. Numunelerin yerleştirildiği asit çözeltileri

3.2.4.7. Tuz etkisi

Kür sürelerini tamamlayan numuneler tuz çözeltilerine (%5 $MgCl_2$, %5 NaCl) yerleştirilmiştir ve 12 hafta çözeltilerin içerisinde bekletilmiştir (Şekil 3.20). Tuz çözeltilerine bırakılan numuneler ASTM C267’de belirtilen yöntemlere göre değerlendirilmiştir. Çözeltide bekleyen numunelerin 1, 2, 4, 6, 8, 10 ve 12 haftalık periyotlarda ağırlık ve boy değişimleri ölçülmüştür. Basınç dayanımı ve UPV ölçümleri 4, 8 ve 12 haftalık periyotlarda yapılmıştır. Deney süresince numunelerin görsel olarak değişimleri incelenmiştir. 12 hafta tuz çözeltilerinde bekletilen numunelerin içyapı analizleri de yapılmıştır.



Şekil 3. 20. Numunelerin yerleştirildiği tuz çözeltileri

3.2.4.8. Sülfat etkisi

Kür sürelerini tamamlayan numuneler sülfat çözeltilerine (%5 $MgSO_4$, %5 Na_2SO_4) yerleştirilmiş ve 12 hafta çözeltilerin içerisinde bekletilmiştir (Şekil 3.21). Çözeltide bekleyen numunelerin 1, 2, 4, 6, 8, 10 ve 12 haftalık periyotlarda ağırlık değişimleri ve boy değişimleri ölçülmüştür. Basınç dayanımı ve UPV ölçümleri 4, 8 ve 12 haftalık periyotlarda yapılmıştır. Deney süresince numunelerin görsel olarak değişimleri incelenmiştir. 12 hafta sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin içyapı analizleri de yapılmıştır.



Şekil 3. 21. Numunelerin yerleştirildiği sülfat çözeltileri

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Agregada Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma

Dere agregası için özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu deneylerde kuru özgül ağırlık, doymun kuru yüzey özgül ağırlık, görünen özgül ağırlık ve su emme oranı değerleri ince ve iri agregada için ayrı ayrı elde edilmiştir. Deneyde elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4. 1. Agreganın özgül ağırlık ve su emme oranı

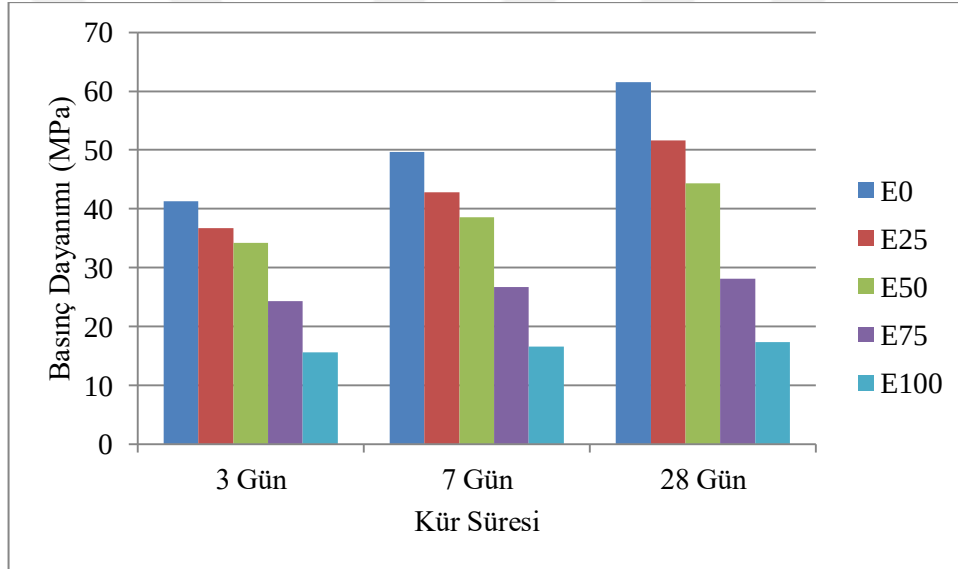
Özellik	Agregada, (mm)	
	0-4	4-8
Kuru özgül ağırlık	2.39	2.60
Doymun kuru yüzey özgül ağırlık	2.47	2.63
Görünen özgül ağırlık	2.55	2.65
Su emme oranı, (%)	2.40	1.30

4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma

Üretilen 5 grup geopolimer beton numuneleri 3, 7 ve 28 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra basınç dayanımları ölçülmüştür. 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, %13, %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 %11 oranında artmıştır.

Çizelge 4. 2. Geopolimer beton numunelerin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri

Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)		
	Kür Süresi		
	3 Gün	7 Gün	28 Gün
E0	41.32	49.63	61.53
E25	36.71	42.82	51.65
E50	34.25	38.56	44.38
E75	24.32	26.73	28.12
E100	15.65	16.61	17.35



Şekil 4. 1. Geopolimer beton numunelerin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri

Numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde, geopolimer beton karışımlarındaki artan YFC oranı ile birlikte numunelerin basınç dayanımlarında da artış olduğu görülmektedir. Bu artışın; YFC ile EFC'nin kimyasal bileşimleri incelendiğinde, SiO_2 , Al_2O_3 ve CaO bileşikleri toplamının YFC'de EFC'ye göre daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.3. Kontrol Numuneleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma

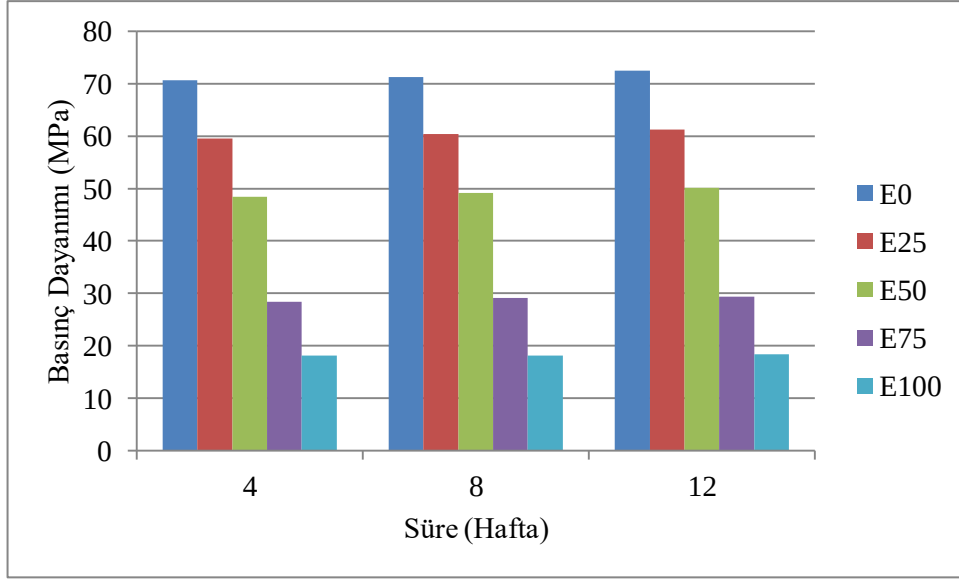
Asit, tuz ve sülfat etkilerine maruz bırakılan numunelerin sonuçlarının karşılaştırılması için aynı sürede suda bekletilen kontrol numunelerin sonuçları kullanılmıştır. Bu nedenle 28 günlük kür sürelerini tamamlayan kontrol numuneleri 12 hafta suda bekletilmiştir. Suda bekleyen numunelerin basınç dayanımları, UPV'leri, ağırlık ve boy değişimleri belirlenmiş, aynı zamanda numunelerin görsel değişimleri de incelenmiştir.

4.3.1. Kontrol numunelerin basınç dayanımları

Suda bekletilen kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonraki 4, 8 ve 12 hafta sonundaki basınç dayanım değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Şekil 4.2'de gösterildiği üzere karışımdaki YFC oranı arttıkça numunelerin basınç dayanımları da artmıştır.

Çizelge 4. 3. Kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonraki basınç dayanım değerleri

Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)		
	Süre (Hafta)		
	4	8	12
E0	70.65	71.23	72.45
E25	59.48	60.35	61.25
E50	48.43	49.21	50.17
E75	28.35	29.17	29.34
E100	18.14	18.17	18.38



Şekil 4. 2. Kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonraki basınç dayanım değerleri

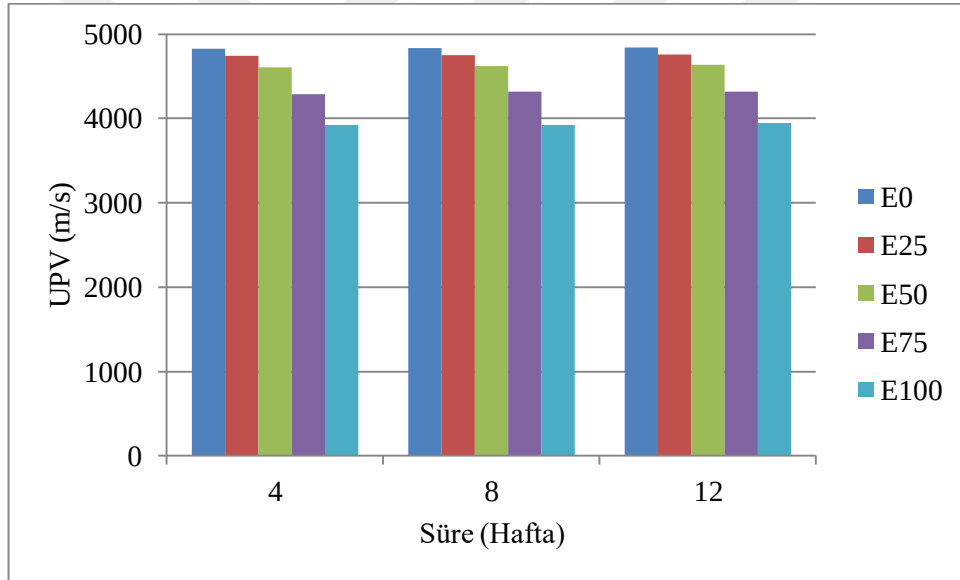
Kontrol numunelerin 28 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra 4 ve 12 haftalık basınç dayanımları incelendiğinde artış olduğu görülmektedir. Bu artış %1.32 ile %3.59 arasında gerçekleşmiştir. Şekil 4.1-2'den de görüldüğü gibi geopolimer betonlar nihai basınç dayanımlarının büyük bir kısmına ilk günlerde ulaşmaktadır.

4.3.2. Kontrol numunelerin UPV ölçümleri

Suda bekletilen kontrol numunelerinin kür sürelerini tamamladıktan sonraki 4, 8 ve 12 hafta sonundaki UPV ölçümleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.3'te de görüldüğü üzere karışımdaki YFC oranı arttıkça kontrol numunelerin UPV değerleri de artmıştır.

Çizelge 4. 4. Kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonraki UPV ölçümleri

Karışım	UPV Değeri (m/s)		
	Süre (Hafta)		
	4	8	12
E0	4826	4832	4844
E25	4741	4751	4762
E50	4606	4621	4639
E75	4288	4315	4320
E100	3921	3924	3950



Şekil 4. 3. Kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonraki UPV değerleri

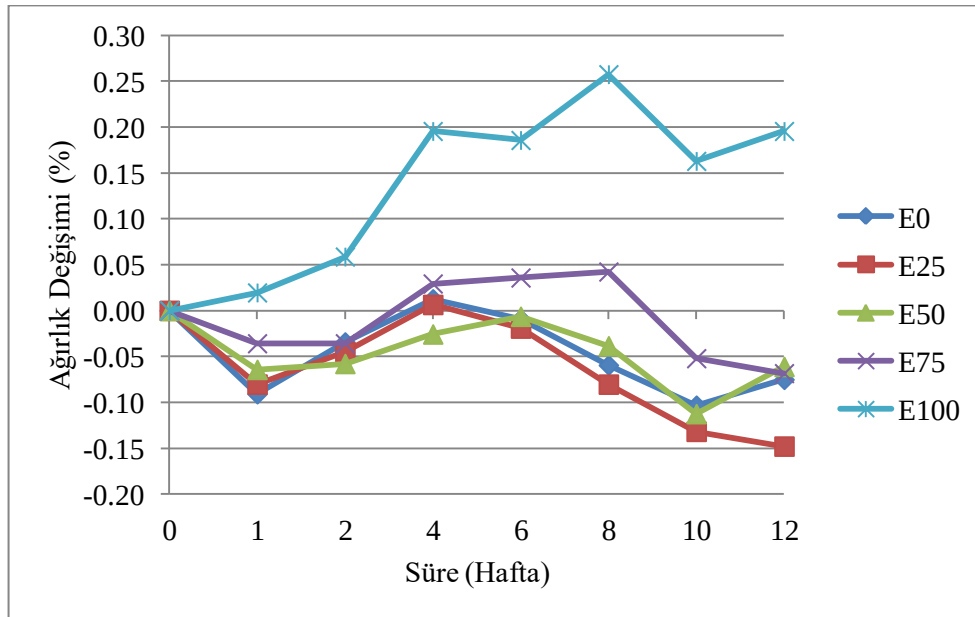
Numunelerin UPV değerleri incelendiğinde basınç dayanımları ile uyumlu olduğu görülmektedir. 28 günlük kür sürelerini tamamlayan geopolimer beton numunelerin 4, 8 ve 12 haftadaki UPV değerlerinde artış olmuştur.

4.3.3. Kontrol numunelerin ağırlık değişimleri

Suda bekletilen kontrol numunelerin zamana bağlı olarak ağırlık değişimleri Çizelge 4.5'te verilmiş ve Şekil 4.4'de gösterilmiştir. 12 hafta süresince belirli periyotlarda yapılan ağırlık ölçümleri sonucu belirlenen ağırlık değişimi sonuçlarına göre E0, E25, E50 ve E75 kodlu numunelerde ağırlık kaybı görülürken, E100 kodlu numunede ağırlık artışı görülmüştür, ancak bu değişimler maksimum ± 0.2 olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 4. 5. Kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonraki ağırlık değişimleri

Karışım	Ağırlık Değişimi (%)						
	Süre (Hafta)						
	1	2	4	6	8	10	12
E0	-0.09	-0.03	0.01	-0.01	-0.06	-0.10	-0.08
E25	-0.08	-0.05	0.01	-0.02	-0.08	-0.13	-0.15
E50	-0.06	-0.06	-0.03	-0.01	-0.04	-0.11	-0.06
E75	-0.04	-0.04	0.03	0.04	0.04	-0.05	-0.07
E100	0.02	0.06	0.20	0.19	0.26	0.16	0.20



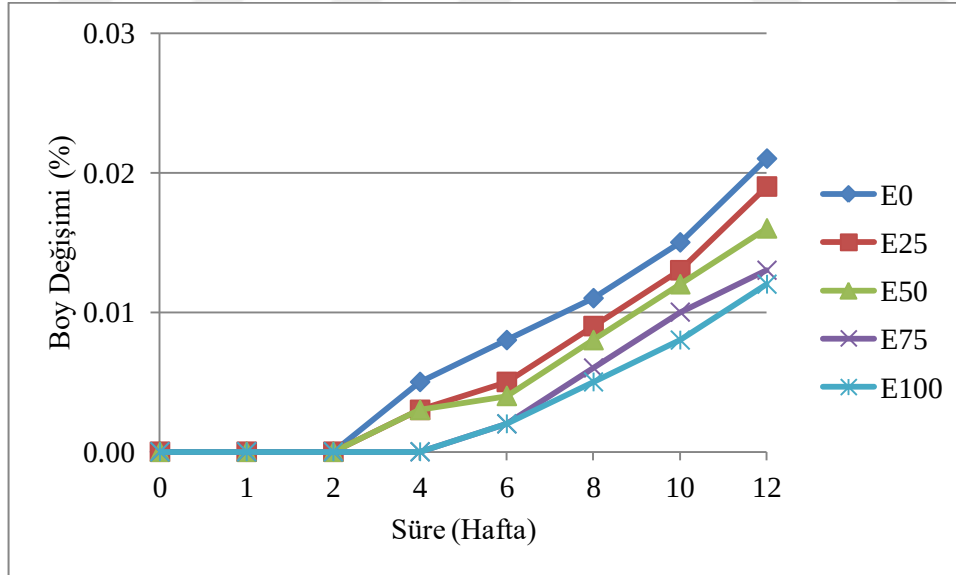
Şekil 4. 4. Kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonraki ağırlık değişimleri

4.3.4. Kontrol numunelerin boy değişimleri

Suda bekletilen kontrol numunelerin zamana bağlı olarak boy değişimleri Çizelge 4.6 ve Şekil 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4. 6. Kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonraki boy değişimleri

Karışım	Boy Değişimi (%)						
	Süre (Hafta)						
	1	2	4	6	8	10	12
E0	0.000	0.000	0.005	0.008	0.011	0.015	0.021
E25	0.000	0.000	0.003	0.005	0.009	0.013	0.019
E50	0.000	0.000	0.003	0.004	0.008	0.012	0.016
E75	0.000	0.000	0.000	0.002	0.006	0.010	0.013
E100	0.000	0.000	0.000	0.002	0.005	0.008	0.012



Şekil 4. 5. Kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonraki boy değişimleri

Kontrol numunelerin boy değişimleri incelendiğinde, kür sürelerini tamamladıktan sonraki ilk 2 haftada değişiklik olmadığı görülmüştür. Geopolimer

beton karışımında artan YFC oranı ile birlikte, numunelerin boy değişimlerinde de en fazla %0.02 olacak şekilde artışlar meydana gelmiştir.

4.3.5. Kontrol numunelerin görsel incelemeleri

Kür sürelerini tamamlayan kontrol numunelerin 12 hafta sonundaki görünüşleri Şekil 4.6'daki gibidir. Karışımındaki EFC oranı arttıkça numunelerin renginde koyulaşma olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 6. Kontrol numunelerin kür sürelerini tamamladıktan sonra 12 hafta sonundaki görünüşleri

4.4. Asit Etkisine Maruz Kalan Geopolimer Beton Numuneleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma

Üretilen geopolimer beton numuneleri kür sürelerini tamamladıktan sonra asit etkisine karşı dirençlerinin belirlenmesi için 12 hafta boyunca %5 konsantrasyonundaki, H_3PO_4 , HCl , HF ve H_2SO_4 çözeltilerinde bekletilmiştir. Bu süreçte numunelerin basınç dayanımları, UPV'leri, ağırlık ve boy değişimleri belirlenmiş, aynı zamanda numunelerin görsel değişimleri de incelenmiştir. Numunelerin basınç dayanım ve UPV değerleri, aynı yaştaki suda bekletilen kontrol numunelerin basınç dayanım ve UPV değerleriyle karşılaştırılmıştır.

4.4.1. Asit etkisindeki numunelerin basınç dayanımları

Asit çözeltilerine bırakılan numunelerin 4, 8 ve 12 haftalık periyotlarda basınç dayanımları ölçülmüştür. Numunelerin basınç dayanım değerleri Çizelge 4.7'de verilmiş ve Şekil 4.7-10'da grafik halinde gösterilmiştir. Asit çözeltilerine maruz kalan numunelerin basınç dayanım değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. Asit

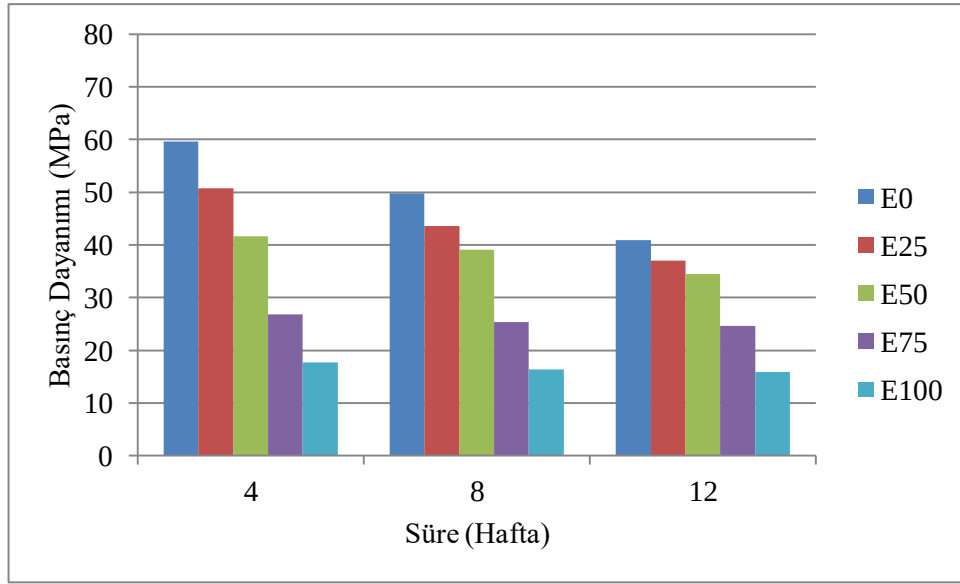
çözeltilerinin numunelerin basınç dayanımlarına etkisi incelendiğinde en fazla etkiyi sırasıyla H_2SO_4 , HF, HCl ve H_3PO_4 çözeltisinin yaptığı görülmektedir. Asit çözeltisine 12 hafta maruz kalan geopolimer beton numunelerin basınç dayanım değerleri, aynı yaştaki suda bekletilen kontrol numunelerin basınç dayanım değerleriyle karşılaştırıldığında;

- %5 H_3PO_4 çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %16, %15, %14, %5.3 ve %2.3 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %30, %28, %21, %13 ve %10 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %44, %40, %31, %16 ve %14 oranında azalmıştır.
- %5 HCl çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %29, %27, %25, %16 ve %3.5 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %56, %56, %55, %36 ve %16 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %69, %68, %65, %45 ve %24 oranında azalmıştır.
- %5 HF çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %46, %40, %33, %33 ve %27 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %60, %56, %49, %47 ve %50 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %72, %70, %70, %65 ve %100 oranında azalmıştır.
- %5 H_2SO_4 çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %39, %36, %36, %35 ve %21 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %73, %71, %71, %52 ve %78 oranında

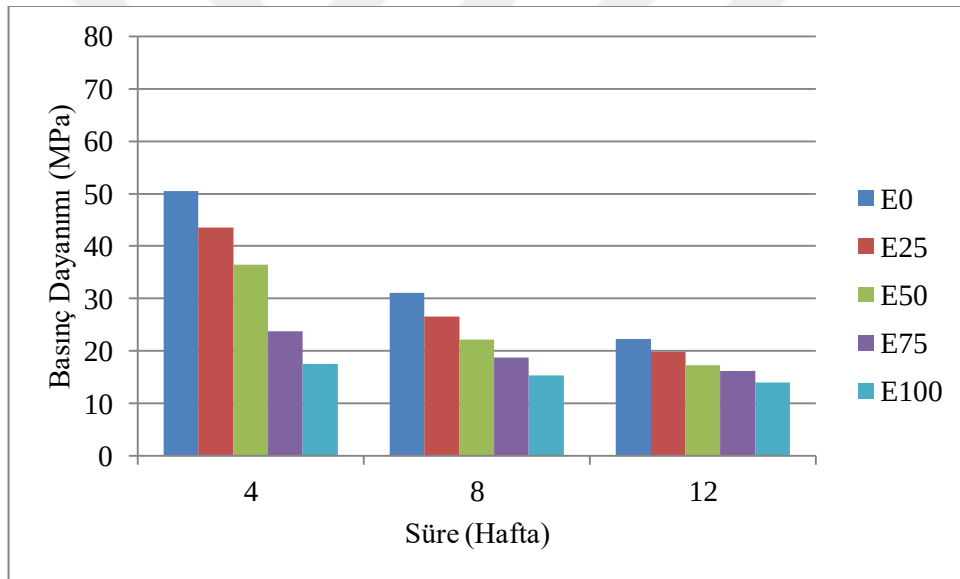
azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %86, %85, %84, %72 ve %100 oranında azalmıştır.

Çizelge 4. 7. Asit çözeltilerinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri

Çözelti	Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)		
		Süre (Hafta)		
		4	8	12
%5 H ₃ PO ₄	E0	59.64	49.74	40.91
	E25	50.77	43.54	36.98
	E50	41.59	39.06	34.54
	E75	26.84	25.37	24.64
	E100	17.73	16.38	15.85
%5 HCl	E0	50.47	31.06	22.32
	E25	43.52	26.55	19.91
	E50	36.46	22.23	17.35
	E75	23.74	18.75	16.17
	E100	17.51	15.34	13.96
%5 HF	E0	38.51	28.45	20.32
	E25	35.77	26.84	18.15
	E50	32.45	24.88	15.23
	E75	19.04	15.54	10.27
	E100	13.25	9.06	0
%5 H ₂ SO ₄	E0	42.87	19.35	9.89
	E25	37.95	17.27	8.95
	E50	31.24	14.54	8.26
	E75	18.53	13.95	8.11
	E100	14.37	4.07	0

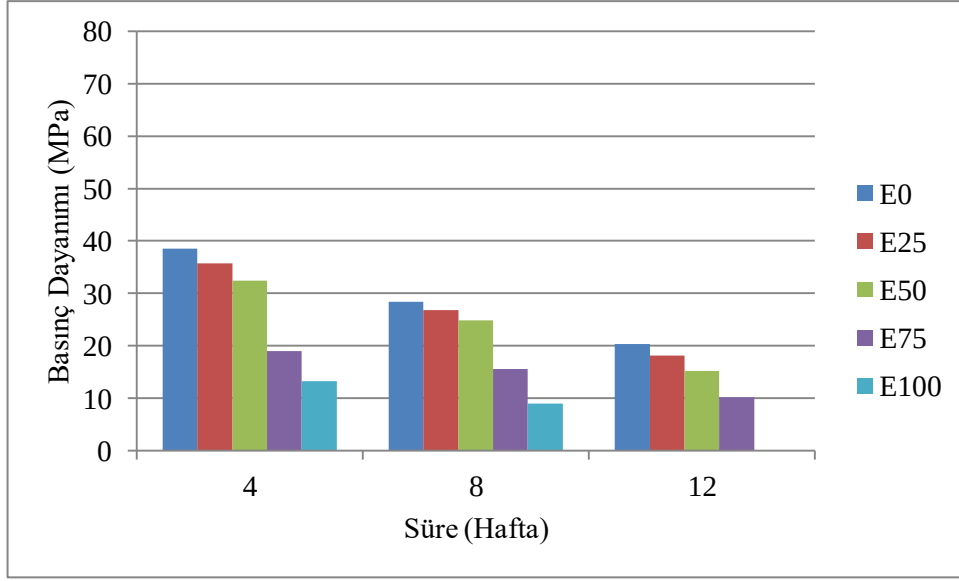


Şekil 4. 7. %5 H₃PO₄ çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri

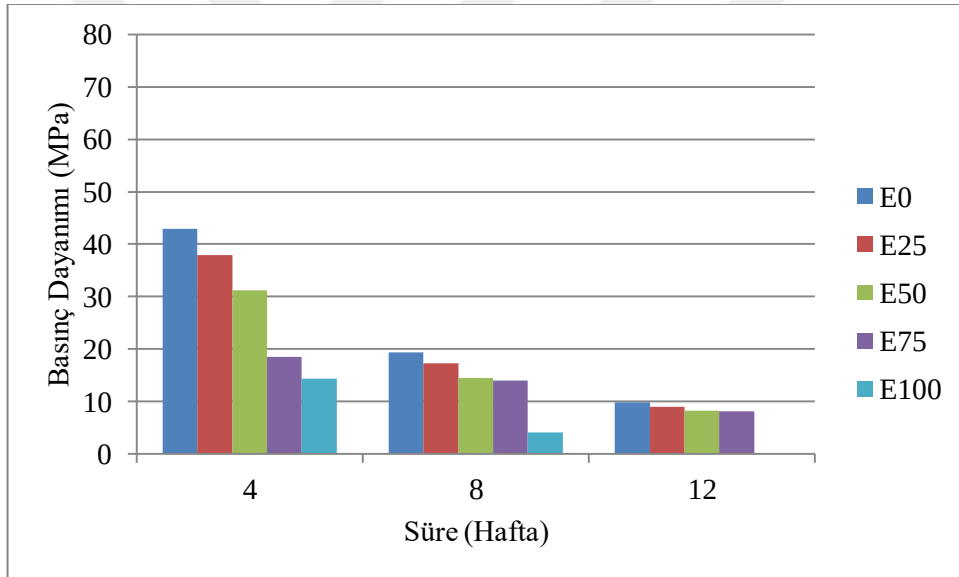


Şekil 4. 8. %5 HCl çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri

Sonuçlar incelendiğinde 4 asit çözeltisinde bekletilen numunelerin, asit çözeltilerin etki süresine bağlı olarak basınç dayanımlarında azalmalar olmuştur. %5 H₃PO₄ çözeltisi en az etkiyi yaparken, %5 HCl, %5 HF ve %5 H₂SO₄ çözeltileri numunelerin basınç dayanımlarını yüksek oranda azaltmışlardır. Baradan (2002), HCl, HF ve H₂SO₄ çözeltilerinin betona saldırı hızının hızlı olduğunu, H₃PO₄'ün ise orta hızda olduğunu belirtmiştir. Bu bilgiden yola çıkarak, %5 H₃PO₄ çözeltisinin diğer asit çözeltilerine göre geopolimer betonları daha az etkilediği düşünülmektedir.



Şekil 4. 9. %5 HF çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri



Şekil 4. 10. %5 H₂SO₄ çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri

Bakharev (2005a), yaptığı çalışmada alkali ile aktive edilmiş UK kullanılarak üretilen geopolimer malzemelerin asit dirençlerini belirlemiştir. Numuneler üretilirken UK; NaOH, Na₂SiO₃, NaOH + KOH kullanılarak üç farklı şekilde aktif edilmiştir. 30, 60, 90, 120 ve 150 gün boyunca %5 H₂SO₄ çözeltisine maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde, ilk ay %6.4 dayanım kaybıyla en iyi direnci NaOH ile aktif edilen geopolimer göstermiştir. 60 gün sonundaki dayanım kayıpları NaOH + KOH, Na₂SiO₃ ile aktif edilen geopolimerler için sırasıyla %89 ve %82 olarak belirlenmiştir. Singh vd., (2013) yaptıkları çalışmada 0.005 M ve 0.05 M

H₂SO₄ çözeltilerinde 90 gün bekletilen geopolimer betonların basınç dayanımlarını sırasıyla 31.22 ve 27.64 MPa olarak ölçmüşlerdir. Singh ve Siddique (2014), betonda ince agrega olarak kömür taban külünün kullanımını araştırmışlardır. İnce agrega olarak sadece kum (kontrol numunesi), sadece kömür taban külü ve farklı miktarlarda kum ve taban külünü birlikte kullanarak yedi farklı numune üretmişlerdir. Numuneler kürlerini tamamladıktan sonra %3 H₂SO₄ çözeltisine yerleştirilmiştir. Asit çözeltisi içerisinde 84 gün bekleyen numunelerin basınç dayanımları belirlenmiştir. Basınç dayanım kayıpları kontrol numunesinde %66, ince agrega olarak %100 kömür taban külünün kullanıldığı numunelerde ise %56'dır. Ganesan vd., (2015) yaptıkları çalışmada sodyum hidroksit ve sodyum silikatla aktif edilen UK esaslı geopolimer betona %0, %0.25, %0.5, %0.75, %1 oranlarında çelik lif ilave etmişlerdir. Kür sürelerini tamamlayan 10 mm'lik küp numuneleri %3 sülfürik asit çözeltisine 180 gün maruz bırakılmıştır. Deney sonuçlarını aynı etkilere maruz bırakılan PÇ'li betonla karşılaştırmışlardır. Numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde, artan çelik lif donatısı ile birlikte geopolimer betondaki dayanım kaybının azaldığını belirtmişlerdir. Deb vd., (2016) yaptıkları çalışmada nano silika içeren UK'lı geopolimer harçların asit direncini araştırmışlardır. Numuneler UK, UK + PÇ, UK + granüle YFC olmak üzere üç farklı bağlayıcı ve %2 oranında nano silika katılarak üretilmiştir. Numuneler kür edildikten sonra 90 gün süresince %3 H₂SO₄ çözeltisinde bekletilmiştir. Nano silika içermeyen harçların dayanım kayıpları %30 ile %41 aralığında iken, %2 oranında nano silika içeren harçların dayanım kayıpları ise %9 ile %11 aralığındadır. Djobo vd., (2016) yaptıkları çalışmada volkanik kül esaslı geopolimer harçlar üretmişlerdir. Numuneler 27 °C ve 80 °C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta kür edilmiş ve bu iki sıcaklıkta kür edilen numuneler karşılaştırılmıştır. Numuneler 28 günlük kürden sonra 180 gün boyunca %5 H₂SO₄ çözeltisine bırakılmıştır. Çözeltiden 180 gün sonra çıkarılan numunelerin basınç dayanımlarındaki kayıp yüzdeleri 27 °C'de kür edilen numunelerde %24 iken 80 °C'de kür edilen numunelerde ise %60'dır. Mehta ve Siddique (2017), betona UK'nın yerine %0, %10, %20 ve %30 oranlarında normal PÇ ikame ederek geopolimer beton numuneleri üretmişlerdir. Üretilen bu numuneler 365 güne kadar %2 H₂SO₄ çözeltisinde bekletilmiş ve bu süreçte numunelerin basınç dayanımlarını incelemişlerdir. Deney süresi sonunda asit çözeltisindeki numunelerden %10 PÇ ikameli geopolimer beton numunesi %52 oranında basınç dayanımını koruyarak en iyi sonucu gösterirken, %30 PÇ ikameli geopolimer beton numunesi ise %34

oranında basınç dayanımını koruyarak asit çözeltisinden en fazla etkilenen numune olmuştur. Yukarıdaki literatürde verilen çalışmaların sonuçlarına göre, asit etkisine maruz kalan geopolimerlerin basınç dayanımlarında azalmalar olduğu görülmektedir. Bu çalışmada da asit çözeltilerine maruz kalan geopolimer beton numunelerin basınç dayanımlarında azalmalar olduğu görülmüştür.

4.4.2. Asit etkisindeki numunelerin UPV ölçümleri

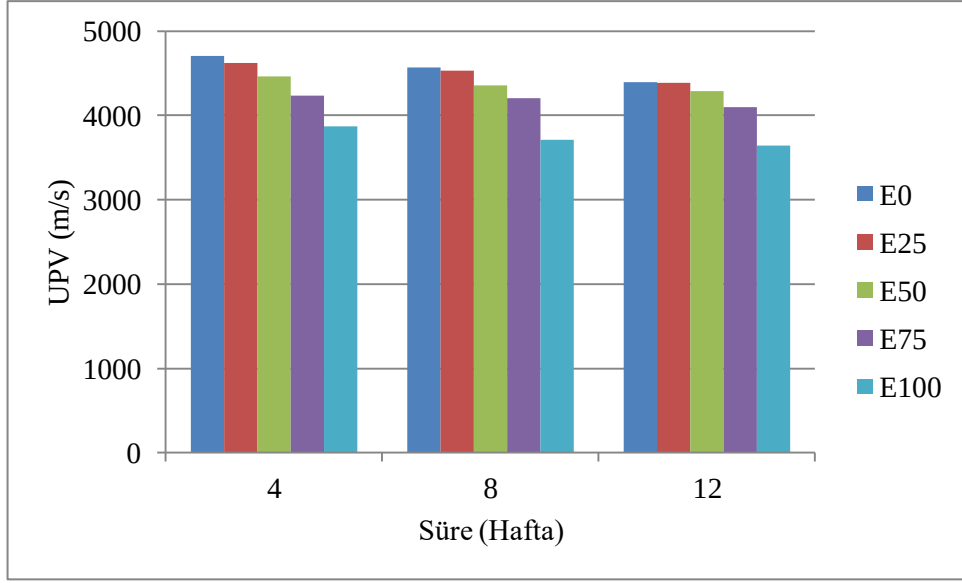
Asit çözeltilerine yerleştirilen numunelerin 4, 8 ve 12 haftalık periyotlarda UPV ölçümleri yapılmıştır. Numunelerin UPV ölçümleri Çizelge 4.8’de verilmiş ve Şekil 4.11-13’te grafik halinde gösterilmiştir. HF çözeltisinde bekletilen numunelerin çözelti ile kimyasal tepkimeye girmesi sonucunda numune yüzeylerinde köpürme vb. oluşumlar meydana geldiği için bu numunelerin UPV ölçümleri yapılamamıştır. Numuneler için yapılan ölçümler değerlendirilirken, her grup kendi içerisinde değerlendirilmiştir. Asit çözeltisine 12 hafta maruz kalan geopolimer beton numunelerinin UPV değerleri ile aynı yaştaki kontrol numunelerin UPV değerleri karşılaştırıldığında;

- %5 H_3PO_4 çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların UPV değerleri sırasıyla %2.57, %2.49, %3.10, %1.21 ve %1.28 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların UPV değerleri sırasıyla %5.42, %4.67, %5.76, %2.64 ve %5.50 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların UPV değerleri sırasıyla %9.33, %7.85, %7.52, %5.21 ve %7.75 oranında azalmıştır.
- %5 HCl çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların UPV değerleri sırasıyla %4.27, %5.04, %5.78, %3.94 ve %1.94 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların UPV değerleri sırasıyla %12.56, %11.11, %16.08, %7.39 ve %8.72 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların UPV değerleri sırasıyla %17.75, %17.49, %19.25, %10.76 ve %16.05 oranında azalmıştır.

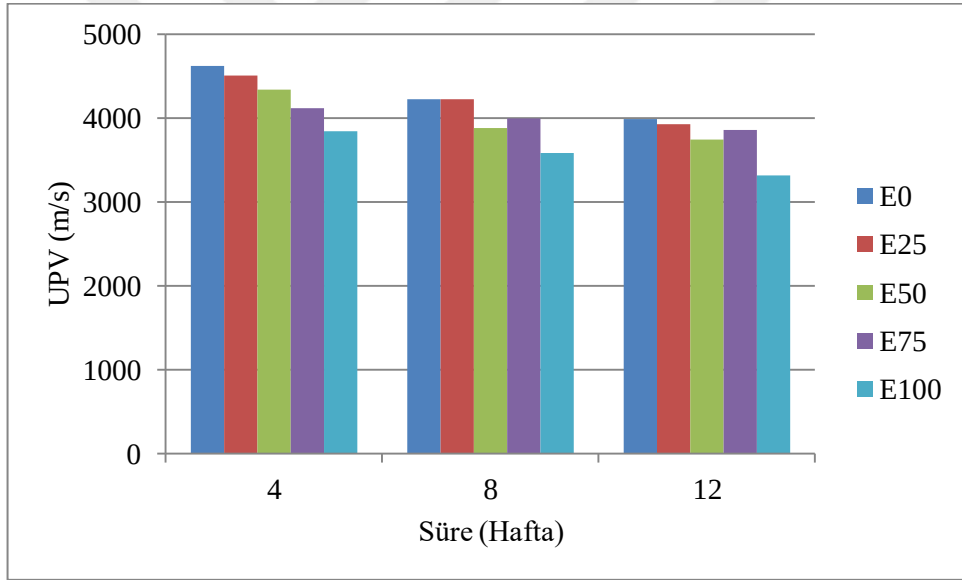
- %5 H₂SO₄ çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların UPV değerleri %7.56, %7.02, %11.07, %7.09 ve %11.63 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların UPV değerleri sırasıyla %19.39, %19.51, %29.00, %20.86 ve %38.30 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların UPV değerleri sırasıyla %25.91, %36.25, %40.68, %29.95 ve %58.76 oranında azalmıştır.

Çizelge 4. 8. Asit çözeltilerinde bekletilen numunelerin UPV ölçümleri

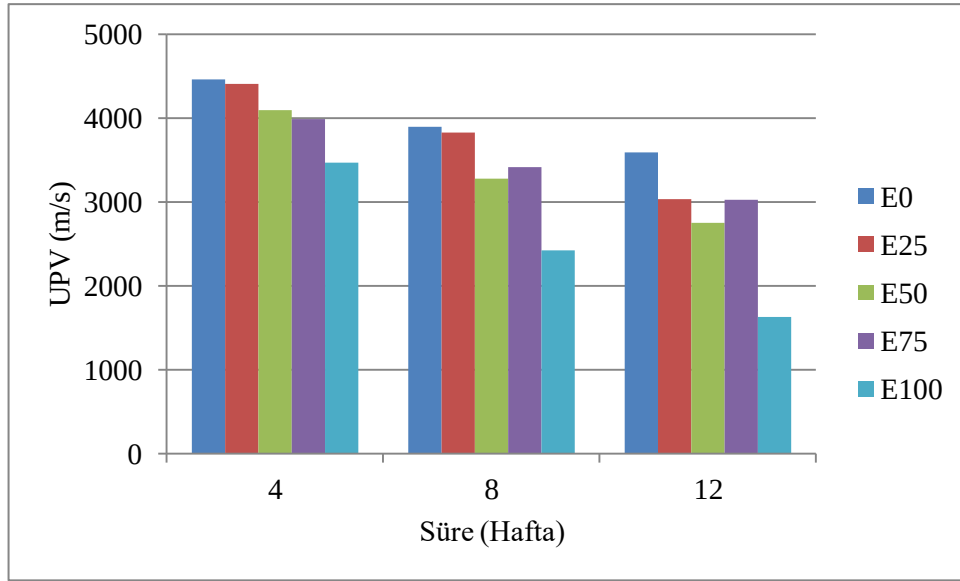
Çözelti	Karışım	UPV Değeri (m/s)		
		Süre (Hafta)		
		4	8	12
%5 H ₃ PO ₄	E0	4702	4570	4392
	E25	4623	4529	4388
	E50	4463	4355	4290
	E75	4236	4201	4095
	E100	3871	3708	3644
%5 HCl	E0	4620	4225	3984
	E25	4502	4223	3929
	E50	4340	3878	3746
	E75	4119	3996	3855
	E100	3845	3582	3316
%5 H ₂ SO ₄	E0	4461	3895	3589
	E25	4408	3824	3036
	E50	4096	3281	2752
	E75	3984	3415	3026
	E100	3465	2421	1629



Şekil 4. 11. %5 H₃PO₄ çözeltisindeki numunelerin UPV değerleri



Şekil 4. 12. %5 HCl çözeltisindeki numunelerin UPV değerleri



Şekil 4. 13. %5 H₂SO₄ çözeltisindeki numunelerin UPV değerleri

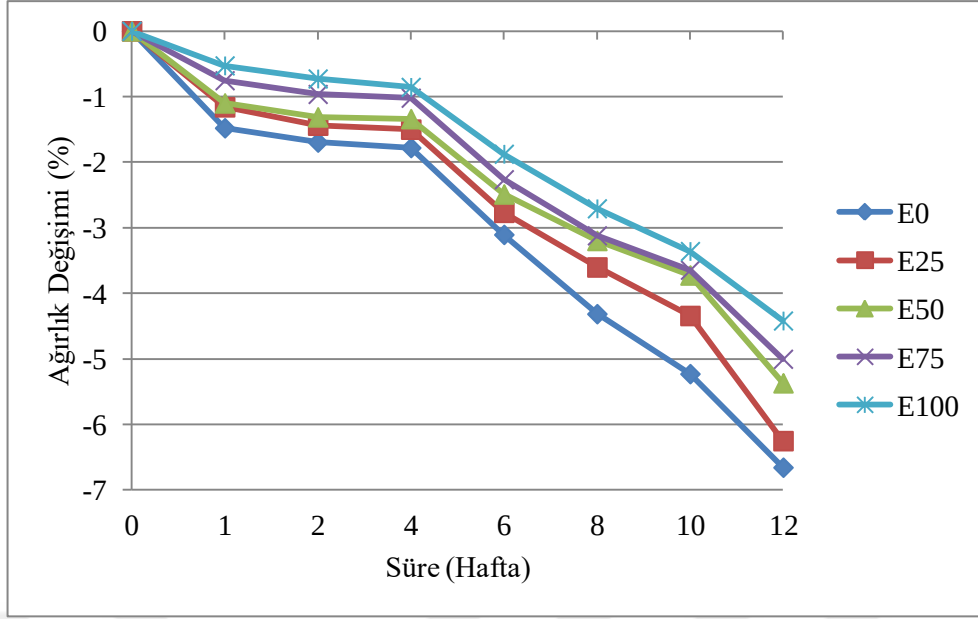
Asit etkisine maruz kalan geopolimer beton numunelerin UPV değerleri incelendiğinde, UPV değerlerinde zamanla azalma olduğu görülmektedir. Asit etkisine maruz kalan numunelerin basınç dayanımlarında olduğu gibi, UPV değerlerinde de en fazla etkiyi sırasıyla %5 konsantrasyonlu H₂SO₄, HCl ve H₃PO₄ çözeltileri yapmıştır. HF çözeltisindeki numunelerin UPV ölçümleri yapılamadığı için bu sıralamaya dahil edilmemiştir. Özellikle H₂SO₄ çözeltisinde bekleyen numunelerin dış yüzeylerinde yumuşama ve çatlaklar meydana geldiği için zamana bağlı olarak UPV değerlerinde azalma görülmüştür.

4.4.3. Asit etkisindeki numunelerin ağırlık değişimleri

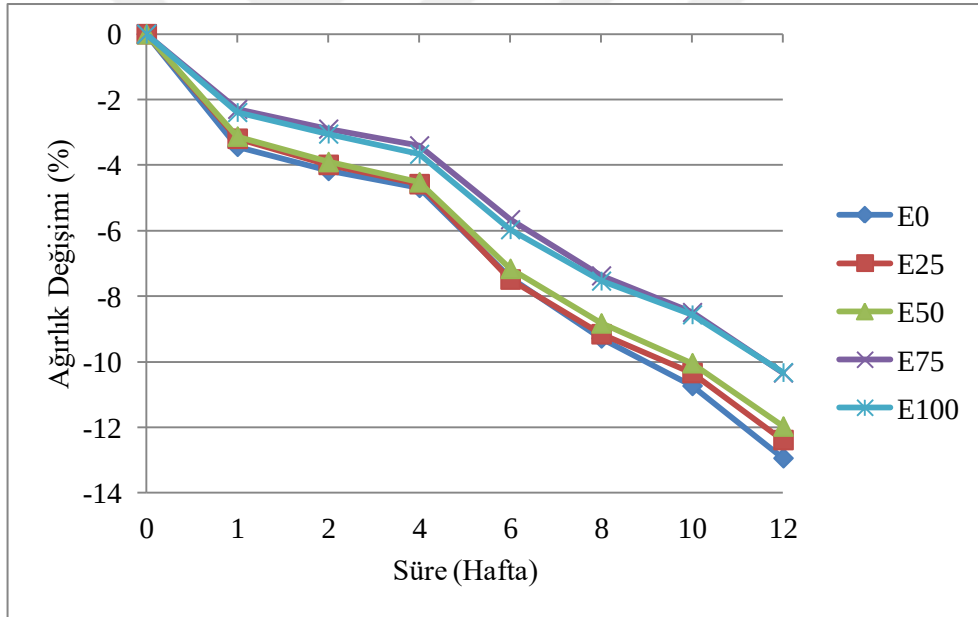
Kür sürelerini tamamlayan numuneler, 12 hafta boyunca asit çözeltisinde bekletilirken bu süreçte numunelerin ağırlık değişimleri incelenmiştir. Asit çözeltilerine bırakılan numunelerin ağırlık değişimleri Çizelge 4.9'da verilmiştir. Genel olarak asit çözeltilerine maruz kalan geopolimer beton numunelerinde ağırlık kayıplarının olduğu görülmüştür. Şekil 4.14-17'den de görüldüğü üzere en az ağırlık kaybı H₃PO₄ çözeltisine bırakılan numunelerde görülürken, HF, HCl ve H₂SO₄ çözeltilerine bırakılan numunelerin ağırlık kayıplarının ise birbirlerine yakın olduğu görülmektedir.

Çizelge 4. 9. Asit çözeltilerinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri

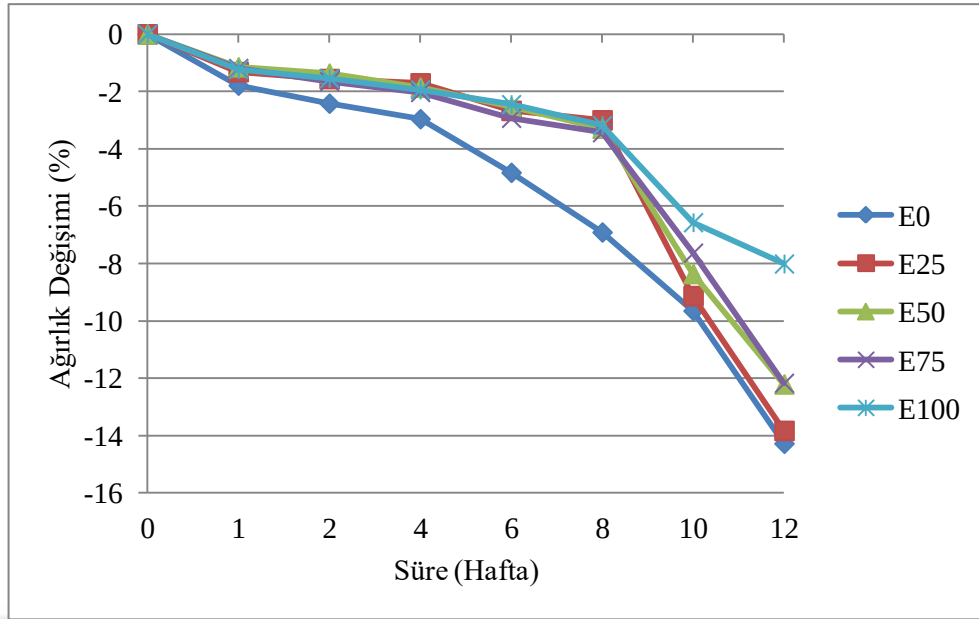
Çözelti	Karışım	Ağırlık Değişimi (%)						
		Süre (Hafta)						
		1	2	4	6	8	10	12
%5 H ₃ PO ₄	E0	-1.48	-1.70	-1.78	-3.11	-4.32	-5.23	-6.66
	E25	-1.16	-1.44	-1.50	-2.77	-3.60	-4.34	-6.25
	E50	-1.10	-1.31	-1.34	-2.49	-3.20	-3.72	-5.37
	E75	-0.75	-0.96	-1.02	-2.26	-3.12	-3.65	-5.00
	E100	-0.53	-0.73	-0.85	-1.88	-2.71	-3.36	-4.42
%5 HCl	E0	-3.44	-4.17	-4.69	-7.42	-9.28	-10.73	-12.94
	E25	-3.19	-3.99	-4.58	-7.49	-9.16	-10.34	-12.38
	E50	-3.12	-3.90	-4.52	-7.16	-8.83	-10.04	-11.97
	E75	-2.29	-2.90	-3.41	-5.66	-7.38	-8.49	-10.34
	E100	-2.39	-3.05	-3.67	-5.97	-7.54	-8.56	-10.33
%5 HF	E0	-1.79	-2.42	-2.96	-4.83	-6.91	-9.65	-14.28
	E25	-1.32	-1.56	-1.71	-2.67	-3.00	-9.13	-13.83
	E50	-1.15	-1.37	-1.86	-2.54	-3.29	-8.36	-12.21
	E75	-1.19	-1.65	-2.03	-2.93	-3.43	-7.63	-12.17
	E100	-1.23	-1.54	-1.94	-2.45	-3.18	-6.57	-8.01
%5 H ₂ SO ₄	E0	-0.06	0.13	0.12	-0.25	-1.60	-5.98	-11.40
	E25	-0.27	-0.12	0.06	-0.23	-0.49	-2.70	-9.73
	E50	-0.37	-0.35	-0.49	-1.39	-1.86	-3.74	-7.89
	E75	-0.71	-0.97	-1.24	-2.27	-3.14	-4.59	-6.90
	E100	-1.27	-1.74	-2.68	-4.10	-5.33	-9.59	-16.13



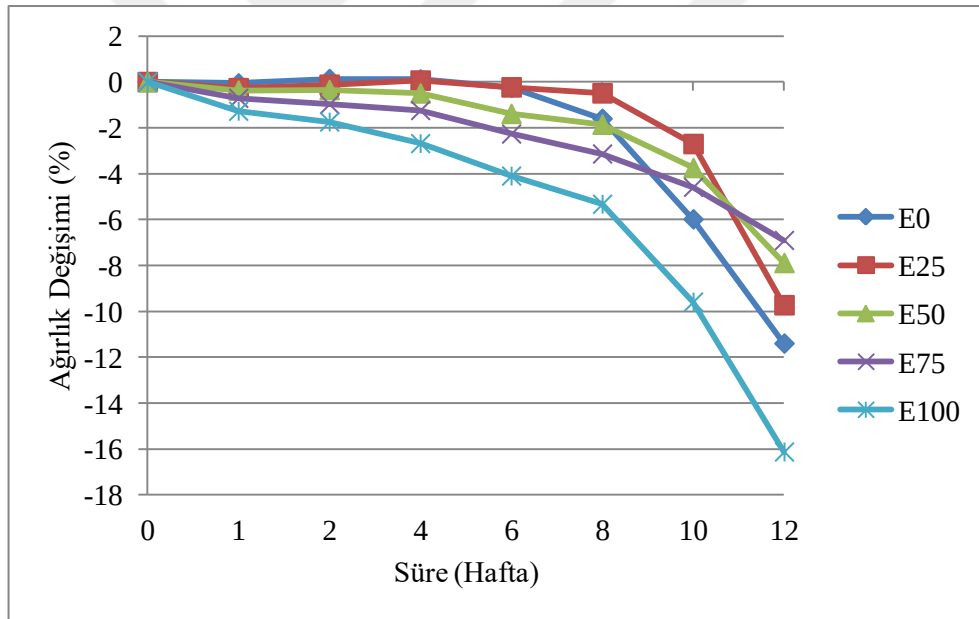
Şekil 4. 14. %5 H₃PO₄ çözeltisindeki numunelerin ağırlık değişimleri



Şekil 4. 15. %5 HCl çözeltisindeki numunelerin ağırlık değişimleri



Şekil 4. 16. %5 HF çözeltisindeki numunelerin ağırlık değişimleri



Şekil 4. 17. %5 H₂SO₄ çözeltisindeki numunelerin ağırlık değişimleri

%5 H₃PO₄ çözeltisindeki numunelerin ağırlık değişimleri incelendiğinde 12 hafta sonraki ağırlık kayıpları %4.42 ile %6.66 arasındadır. %5 HCl çözeltisindeki numuneler için bu değerler %10.33 ile %12.94 arasında, %5 HF çözeltisindeki numuneler için bu değerler %8.01 ile %14.28 arasında, %5 H₂SO₄ çözeltisindeki numuneler için ise bu değerler %6.90 ile %16.13 arasındadır. H₂SO₄ çözeltisindeki numunelerde ilk 6 haftaya kadar ağırlık kayıpları en fazla yaklaşık %4 iken, özellikle

8 haftadan sonra numunelerin ağırlık kayıpları oranlarında artış olduğu görülmüştür. HCl ve HF çözeltilerindeki geopolimer betonların ağırlık kayıpları, H_3PO_4 çözeltilisindeki numunelerin ağırlık kayıplarının 2~2,5 katı kadar gerçekleşmiştir.

Bakharev (2005a) 150 gün süresince %5 H_2SO_4 çözeltilisine maruz kalan farklı alkalilerle aktif edilen UK esaslı geopolimer malzemelerin ağırlık kayıplarının %1.96 ile %12.43 arasında olduğunu belirtmiştir. Sata vd., (2012) yaptıkları çalışmada üç farklı boyutta (ince, orta ve iri) linyit taban külü kullanarak geopolimer harçlar üretmişler ve numuneleri PÇ, PÇ + UK içeren harçlarla karşılaştırmışlardır. Numuneler 120 gün %3 H_2SO_4 çözeltilisine maruz bırakılıp incelenmiştir. Taban küllü geopolimer harçların tümünün H_2SO_4 saldırısına karşı, PÇ'li harçlara göre daha az etkilendiği görülmüştür. Çözeltiden çıkarılan taban küllü geopolimer harçların tümünde ağırlık kaybının %3.6'dan daha az olduğu görülmüştür. Singh vd., (2013) yaptıkları çalışmada 0.005 M ve 0.05 M H_2SO_4 çözeltilerinde 90 gün bekletilen geopolimer betonların ağırlık kayıplarının yaklaşık olarak sırasıyla %2.3 ve %3 olduğunu belirtmişlerdir. Singh ve Siddique (2014), betonda ince agrega olarak kum yerine kömür taban külünün kullanımı sonucunda kömür taban küllü beton karışımlarının düşük geçirgenliğe sahip olduğunu ve bundan dolayı da asit etkisinde kum kullanılan betona göre ağırlık kaybının daha düşük olduğunu düşünmektedirler. Ganesan vd., (2015) %3 sülfürik asit çözeltilisine 180 gün maruz kalan UK esaslı geopolimer betona çelik lif ilave edilmesinin, geopolimer betondaki ağırlık kaybını arttırdığını belirtmişlerdir. Deb vd., (2016) 90 gün süresince %3 H_2SO_4 çözeltilisinde bekletilen numunelerin kütle kayıplarını incelediklerinde, %2 oranında nano silika katılan geopolimer harçların ortalama kütle kayıplarının %6'dan %1.9'a düştüğünü belirtmişlerdir. Djobo vd., (2016) %5 H_2SO_4 çözeltilisinde bekletilen volkanik kül esaslı geopolimer harçların ağırlık kayıplarındaki azalma oranlarını, 27 °C ve 80 °C sıcaklıkta kür edilen geopolimer harç numuneleri için sırasıyla %3.51 ve %3.1 olduğunu belirtmişlerdir. Wei vd., (2017) vanadyum artığı esaslı geopolimer hamuru üretmişlerdir. Vanadyum artığını öğütülmemiş, 1 saat, 2.5 saat, 4 saat ve 5.5 saat öğütülmüş olarak kullanıp 5 grup numune üretmişlerdir. Karışımlar hazırlanıp 40x40x40 mm'lik kalıplara yerleştirilip 7 gün oda sıcaklığında kür edilmiştir. Daha sonra numuneler %3 sülfürik asit çözeltilisine 28 gün süresince numunelerin ağırlık kayıplarını incelemek üzere bırakılmıştır. Deney sonuçlarına göre sülfürik asit çözeltilisine maruz kalan numunelerdeki ağırlık kayıpları incelendiğinde, geopolimer hamurda kullanılan vanadyum artığının öğütülme süresi arttıkça numunelerin ağırlık

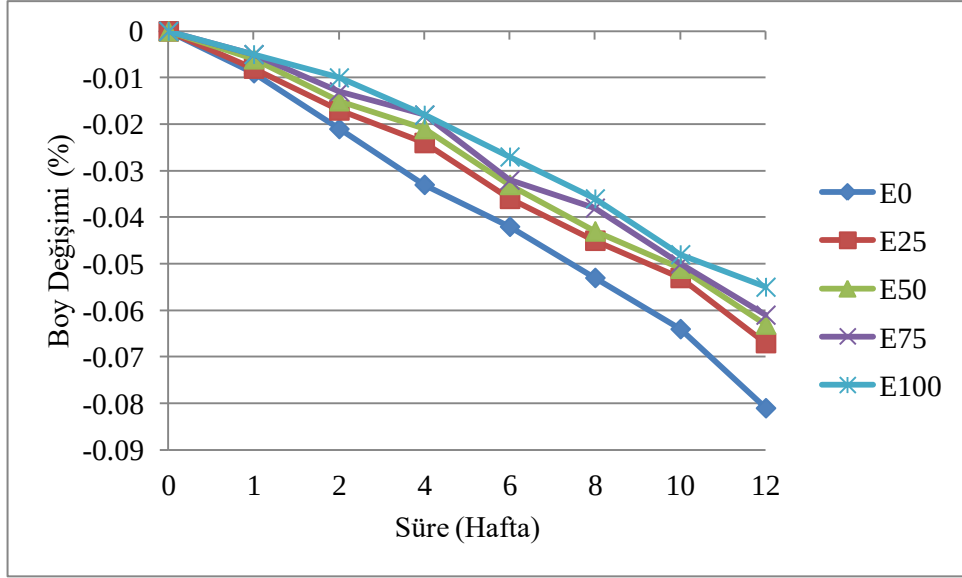
kayıpları azalmıştır. Mehta ve Siddique (2017), %2 H₂SO₄ çözeltisine maruz kalan geopolimer betonlardaki PÇ ikame oranı arttıkça, kütle kaybının da arttığını belirtmişlerdir. Kwasny vd., (2018) iki farklı basınç dayanımına sahip (37.5 ve 60 MPa) katı kil esaslı geopolimer harç numuneleri üretmişlerdir. Bu harç numuneler 3 farklı konsantrasyonda (0.10, 0.31 ve 0.52 mol/L) sülfürik asit ve hidroklorik asit çözeltilerinde 8 hafta bekletilmiştir. HCl çözeltilerine maruz kalan numunelerdeki ağırlık kayıplarının %1 ile %5 arasında olduğunu, H₂SO₄ çözeltilerine maruz kalan numunelerdeki ağırlık kayıplarının ise %2 ile %8 arasında olduğunu belirtmişlerdir. Literatürde verilen çalışmaların sonuçları incelendiğinde asit etkisine maruz kalan geopolimerlerde ağırlık kayıpları olduğu belirtilmiştir. Literatürdeki sonuçlarla tutarlı olacak biçimde bu çalışmadaki asit etkisine maruz kalan geopolimer betonlarda da ağırlık kayıpları olduğu görülmüştür.

4.4.4. Asit etkisindeki numunelerin boy değişimleri

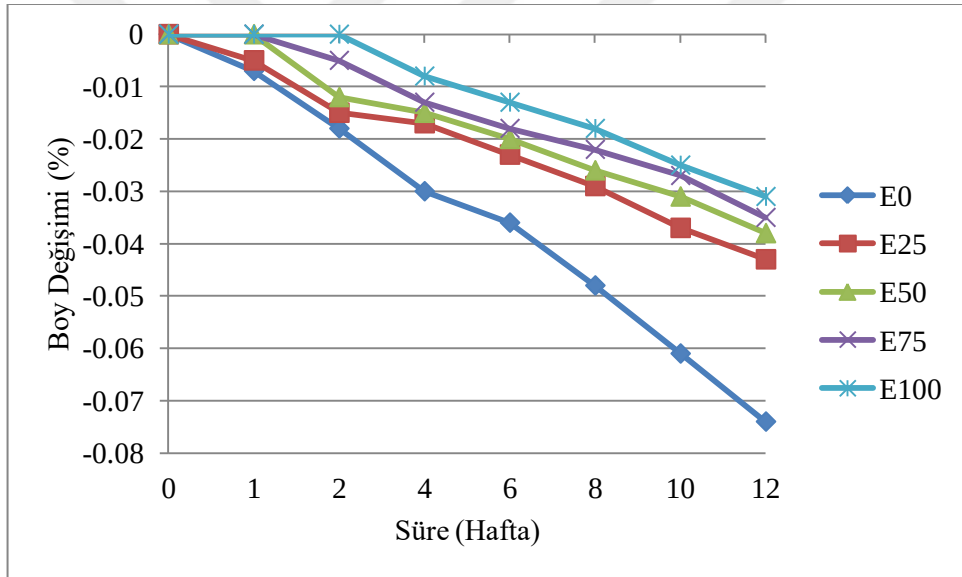
Kür sürelerini tamamlayan numuneler, 12 hafta boyunca asit çözeltisinde bekletilirken bu süreçte numunelerin boy değişimleri incelenmiştir. Asit çözeltilerine bırakılan numunelerin boy değişimleri Çizelge 4.10'da verilmiştir. Şekil 4.18-21'den de görüldüğü üzere H₂SO₄ ve HF çözeltilerine bırakılan numunelerde genleşme olurken, HCl ve H₃PO₄ çözeltilerine bırakılan numunelerde büzülme meydana gelmiştir. H₃PO₄ ve HCl çözeltilerine maruz kalan geopolimer betonlardaki boy değişimleri, HF ve H₂SO₄ çözeltisindeki geopolimer betonların boy değişimlerine oranla çok küçük olduğu görülmüştür. Özellikle H₂SO₄'ün, geopolimer beton içyapısında etrenjit oluşumuna neden olduğu görülmüştür (Djobo vd., 2016). Etrenjit beton içerisinde genleşen bir madde olduğu için betonda hacim genişlemesine neden olmaktadır. Bu nedenle %5 H₂SO₄ çözeltisindeki geopolimer beton numunelerinin genleştiği düşünülmektedir.

Çizelge 4. 10. Asit çözeltilerinde bekletilen numunelerin boy değişimleri

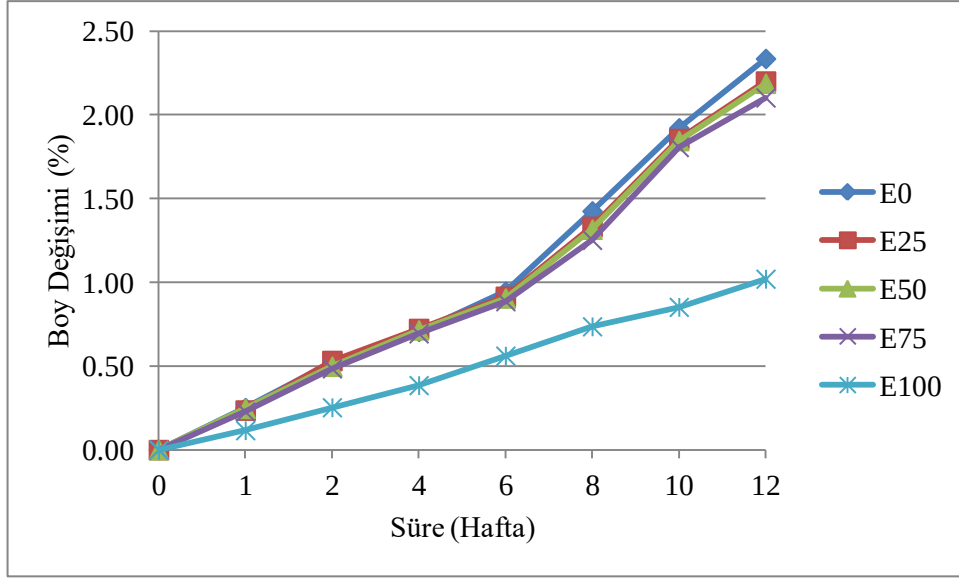
Çözelti	Karışım	Boy Değişimi (%)						
		Süre (Hafta)						
		1	2	4	6	8	10	12
%5 H ₃ PO ₄	E0	-0.009	-0.021	-0.033	-0.042	-0.053	-0.064	-0.081
	E25	-0.008	-0.017	-0.024	-0.036	-0.045	-0.053	-0.067
	E50	-0.006	-0.015	-0.021	-0.033	-0.043	-0.051	-0.063
	E75	-0.005	-0.013	-0.018	-0.032	-0.038	-0.050	-0.061
	E100	-0.005	-0.010	-0.018	-0.027	-0.036	-0.048	-0.055
%5 HCl	E0	-0.007	-0.018	-0.030	-0.036	-0.048	-0.061	-0.074
	E25	-0.005	-0.015	-0.017	-0.023	-0.029	-0.037	-0.043
	E50	0.000	-0.012	-0.015	-0.020	-0.026	-0.031	-0.038
	E75	0.000	-0.005	-0.013	-0.018	-0.022	-0.027	-0.035
	E100	0.000	0.000	-0.008	-0.013	-0.018	-0.025	-0.031
%5 HF	E0	0.251	0.523	0.706	0.946	1.425	1.921	2.335
	E25	0.236	0.532	0.723	0.915	1.332	1.857	2.200
	E50	0.246	0.498	0.715	0.905	1.316	1.845	2.187
	E75	0.227	0.485	0.694	0.886	1.252	1.806	2.102
	E100	0.116	0.253	0.385	0.561	0.736	0.852	1.020
%5 H ₂ SO ₄	E0	1.466	1.928	2.912	4.076	6.586	7.871	7.932
	E25	1.243	1.424	1.885	2.647	4.332	5.736	6.498
	E50	0.718	1.136	1.953	2.153	2.392	4.186	4.285
	E75	0.615	0.793	2.042	2.380	2.855	3.827	3.966
	E100	0.400	0.700	1.240	1.380	1.500	2.040	2.340



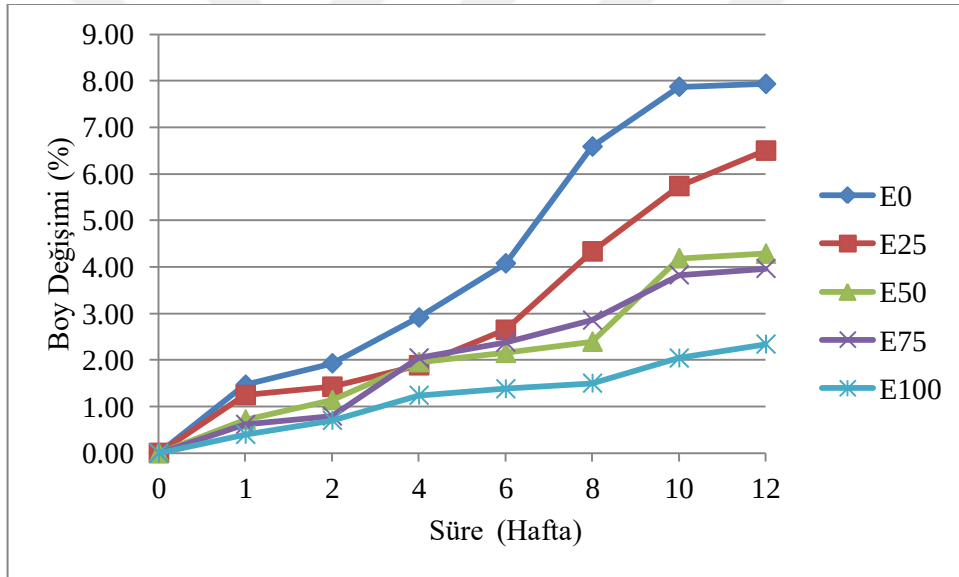
Şekil 4. 18. %5 H_3PO_4 çözeltisindeki numunelerin boy değişimleri



Şekil 4. 19. %5 HCl çözeltisindeki numunelerin boy değişimleri



Şekil 4. 20. %5 HF çözeltisindeki numunelerin boy değişimleri



Şekil 4. 21. %5 H₂SO₄ çözeltisindeki numunelerin boy değişimleri

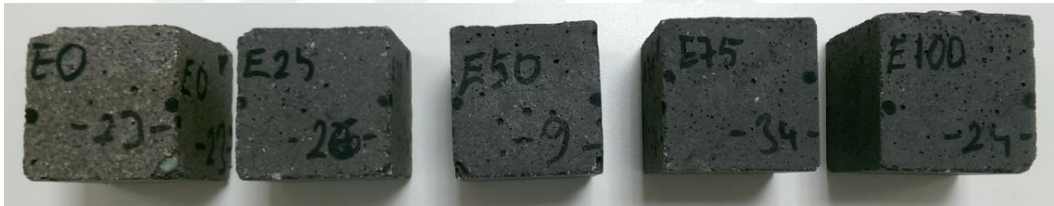
4.4.5. Asit etkisindeki numunelerin görsel incelemeleri

Asit çözeltilerine bırakılan numuneler görsel olarak incelendiğinde, özellikle H₂SO₄, H₃PO₄ ve HF çözeltilerinde bekletilen numunelerin yüzeylerinde çatlaklar olduğu görülmüştür. H₂SO₄ çözeltisine bırakılan numunelerde gözle görülür genişleme meydana gelmiştir. HCl çözeltisinde bekletilen numunelerde çatlak oluşumu meydana gelmezken, numunelerin çözeltide bekleme süresinin artmasıyla birlikte numunelerin renklerinde koyulaşma olduğu görülmüştür. H₂SO₄, HF ve

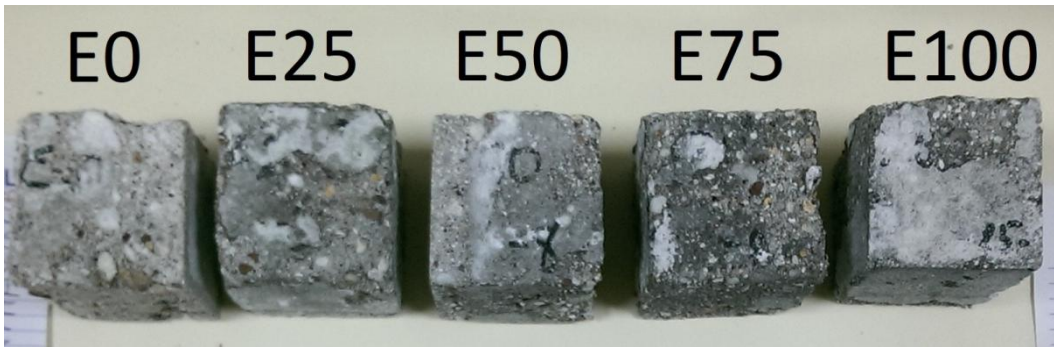
H_3PO_4 çözeltilerine bırakılan numunelerin yüzeylerinde yumuşama meydana gelmiştir ve bu çözeltilere maruz kalan numunelerin yüzeylerinde gözle görülür çatlaklar oluşmuştur. 12 hafta süresince asit çözeltilerine maruz kalan numuneler Şekil 4.22-25’de gösterilmiştir. Geopolimer beton numunelerinde EFC miktarı arttıkça numunelerin yüzeylerinde meydana gelen yumuşamaların ve bozulmaların azaldığı görülmüştür ve bu nedenle asit etkilerine karşı görsel olarak EFC’nin YFC’ye göre daha dirençli olduğu düşünülmektedir.



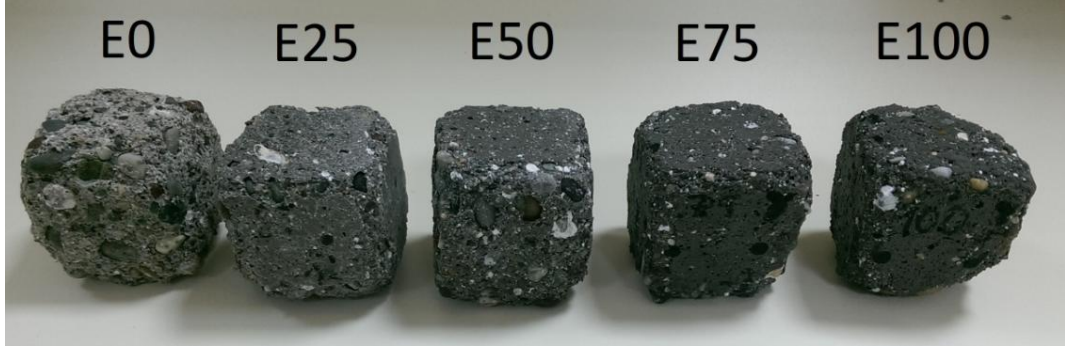
Şekil 4. 22. %5 H_3PO_4 çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin görünüşleri



Şekil 4. 23. %5 HCl çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin görünüşleri



Şekil 4. 24. %5 HF çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin görünüşleri



Şekil 4. 25. %5 H₂SO₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin görünüşleri

Lee ve Lee (2016), yaptıkları çalışmada alkali ile aktive edilmiş UK/cüruf hamurundaki cüruf içeriğinin asit direncine olan etkisini incelemişlerdir. %100 UK, %90 UK + %10 YFC, %70 UK + %30 YFC, %50 UK + %50 YFC ve normal PÇ'li kontrol betonu olmak üzere 5 grup numune üretilmiştir. Üretilen numuneler 28 günlük kürden sonra %10 H₂SO₄ çözeltisine yerleştirilmiştir ve çözeltide 56 gün bekleyen numunelerde oluşan bozulmaların nedeni araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre alkali ile aktif edilmiş UK/cüruf hamurunun sülfürik aside maruz kalması sonucunda bozulmasının iki nedeni bulunmaktadır. Bunlardan birincisi UK/cüruf hamurunun yüzeyine sülfat nüfuz etmesinden dolayı oluşan aşınmadır. İkincisi ise C-(A)-S-H ve N-A-S-H'nin arasındaki farklı düzeydeki sülfürik asit direncinden dolayı reaksiyon ürünlerinin aşınmasıdır.

4.5. Tuz Etkisine Maruz Kalan Geopolimer Beton Numuneleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma

Üretilen geopolimer beton numuneleri kür sürelerini tamamladıktan sonra tuz etkisine karşı dirençlerinin belirlenmesi için 12 hafta boyunca %5 konsantrasyonundaki NaCl ve MgCl₂ çözeltilerinde bekletilmiştir. Bu süreçte numunelerin basınç dayanımları, UPV'leri, ağırlık ve boy değişimleri belirlenmiş, aynı zamanda numunelerin görsel değişimleri de incelenmiştir. Numunelerin basınç dayanım ve UPV değerleri, aynı yaştaki suda bekletilen kontrol numunelerin basınç dayanım ve UPV değerleriyle karşılaştırılmıştır.

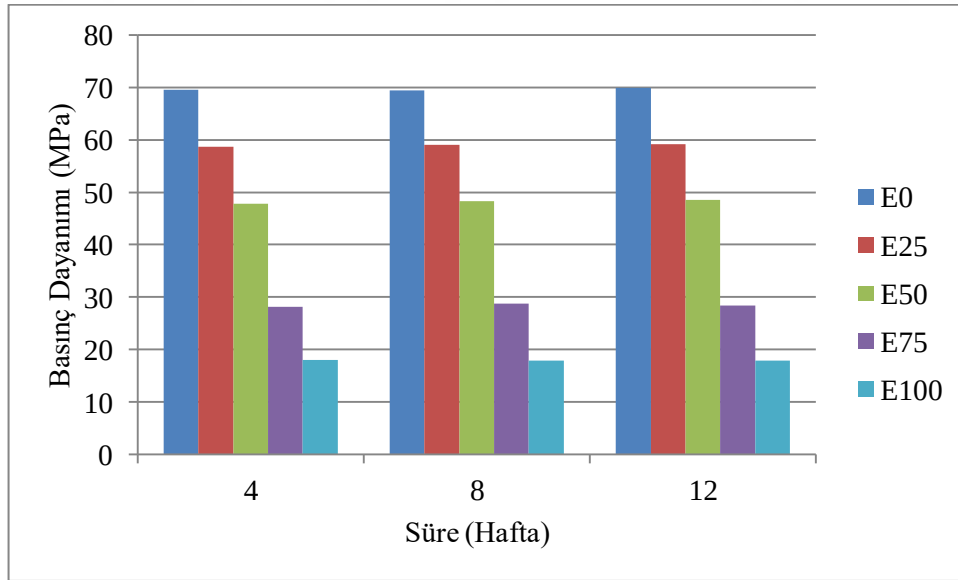
4.5.1. Tuz etkisindeki numunelerin basınç dayanımları

Tuz çözeltilerine bırakılan numunelerin 4, 8 ve 12 haftalık periyotlarda basınç dayanımları ölçülmüştür. Numunelerin basınç dayanım değerleri Çizelge 4.11’de verilmiş ve Şekil 4.26-27’de grafik halinde gösterilmiştir. 12 hafta tuz çözeltilerine maruz kalan geopolimer beton numunelerin basınç dayanım değerleri, aynı yaşta suda bekletilen kontrol numunelerin basınç dayanım değerleriyle karşılaştırıldığında;

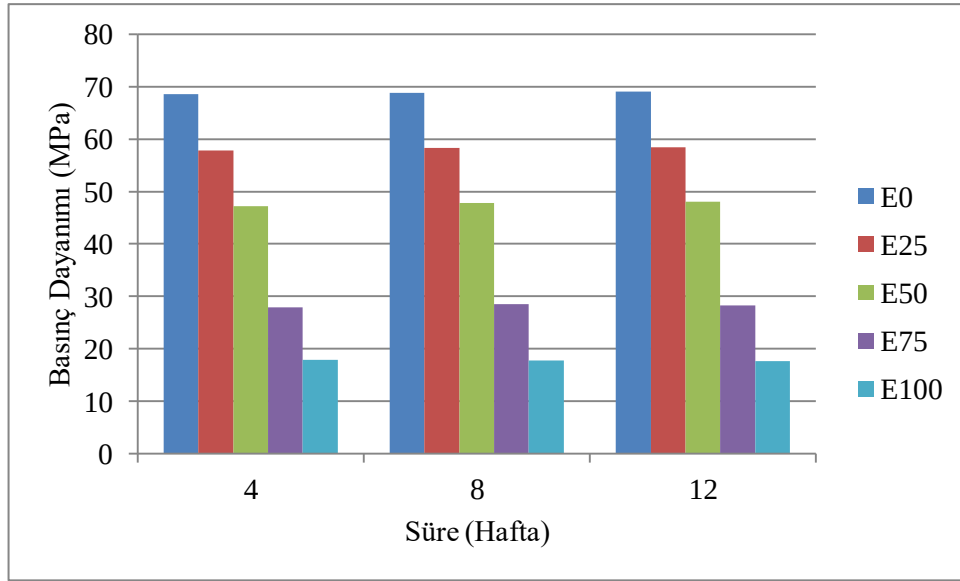
- %5 NaCl çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %1.53, %1.40, %1.34, %0.81 ve %0.55 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %2.48, %2.19, %1.95, %1.44 ve %1.32 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %3.59, %3.43, %3.31, %3.14 ve %2.67 oranında azalmıştır.
- %5 MgCl₂ çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %2.97, %2.89, %2.48, %1.41 ve %1.27 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %3.40, %3.35, %2.97, %2.23 ve %2.15 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %4.67, %4.57, %4.13, %3.78 ve %3.59 oranında azalmıştır.

Çizelge 4. 11. Tuz çözeltilerinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri

Çözelti	Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)		
		Süre (Hafta)		
		4	8	12
%5 NaCl	E0	69.57	69.46	69.85
	E25	58.65	59.03	59.15
	E50	47.78	48.25	48.51
	E75	28.12	28.75	28.42
	E100	18.04	17.93	17.89
%5 MgCl ₂	E0	68.55	68.81	69.07
	E25	57.76	58.33	58.45
	E50	47.23	47.75	48.10
	E75	27.95	28.52	28.23
	E100	17.91	17.78	17.72



Şekil 4. 26. %5 NaCl çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri



Şekil 4. 27. %5 $MgCl_2$ çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri

Singh vd., (2013) yaptıkları çalışmada %10 NaCl çözeltisinde 90 gün bekletilen geopolimer beton ve PÇ'li betonun basınç dayanımlarını sırasıyla 32.85 ve 37.92 MPa olarak ölçmüşlerdir. Shoaie (2013), $MgCl_2$ ve NaCl tuzlarının hafif betona olan etkisini araştırmıştır. Bu amaçla numunelere çimento ağırlığınca %10 silis dumanı ilave edilen hafif beton, %20 UK ilave edilen hafif beton ve mineral katkısız hafif beton olmak üzere üç grup numune üretilmiştir. Numunelerde ham perlit agregası kullanılmıştır. Üretilen numuneler kür edildikten sonra %3.5 ve %5 $MgCl_2$, %3.5 ve %5 NaCl ve %1.75 $MgCl_2$ + %1.75 NaCl çözeltilerinde 28, 56 ve 90 gün bekletilmiştir. En fazla dayanım kaybı katkısız numunelerde görülmüştür. Albitar vd., (2017) yaptıkları çalışmada F sınıfı UK esaslı geopolimer beton, UK ile öğütülmüş kurşun izabe cürufu karışımı esaslı geopolimer beton ve PÇ'li beton olmak üzere 3 grup numune üretmişlerdir. 9 ay süresince %5 NaCl çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımlarındaki kayıplar yaklaşık olarak %5'tir. Ren vd., (2017) alkalilerle aktif edilmiş metakaolin esaslı geopolimer bileşimine farklı oranlarda volastonit, tremolit ve kısa bazalt lifi ilave ederek numuneler üretmişlerdir. Kür sürelerini tamamlayan numuneler %5, %10, %15 ve %20 konsantrasyonlu NaCl çözeltilerinde 90 gün süresince bekletilmiştir. Deney sonuçlarına göre en yüksek basınç dayanımı %5 volastonit, %5 tremolit ve %2 kısa bazalt lifi ilave edilmiş geopolimer numunelerde elde edilmiştir. Sodyum klorür çözeltilerinin konsantrasyonu arttıkça numunelerin basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. Mineral katkıların tuz saldırılarına karşı geopolimerin basınç dayanımını arttırdığını

belirtmişlerdir. Yukarıda literatürde verilen çalışmalarda, tuz etkisine maruz kalan geopolimerlerin basınç dayanımlarında azalmalar olduğu sonucu çıkarılabilmektedir. Bu çalışmada da tuz çözeltilerine maruz kalan geopolimer betonların basınç dayanımlarındaki azalma %2.67 ile %4.67 arasındadır. Asit ve sülfat çözeltilerindeki dayanım azalmalarına oranla, tuz çözeltilerindeki numunelerdeki dayanım azalmaları daha az olmuştur.

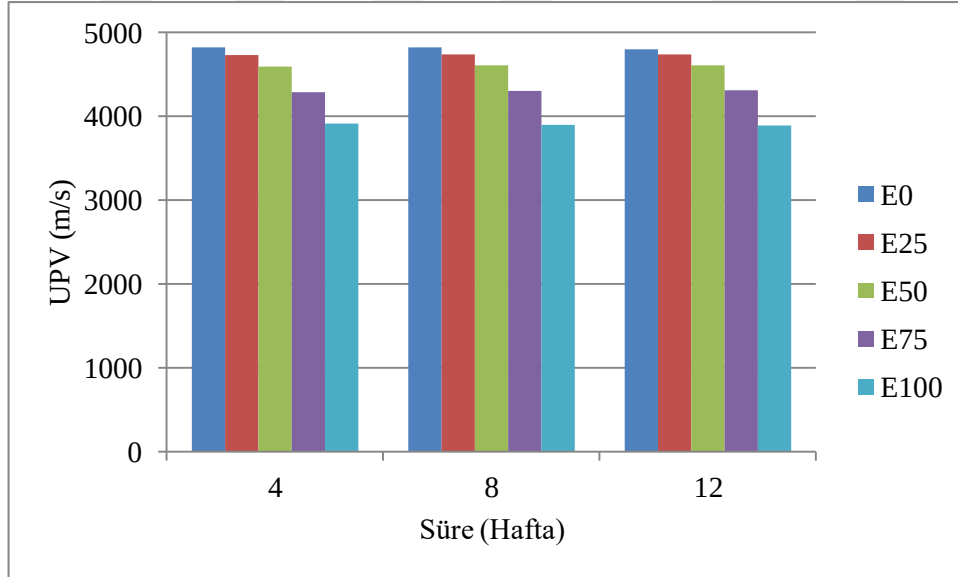
4.5.2. Tuz etkisindeki numunelerin UPV ölçümleri

Tuz çözeltilerine yerleştirilen numunelerin 4, 8 ve 12 haftalık periyotlarda UPV ölçümleri yapılmıştır. Numunelerin UPV ölçümleri Çizelge 4.12’de verilmiş ve Şekil 4.28-29’da grafik halinde gösterilmiştir. Numuneler için yapılan ölçümler değerlendirilirken, her grup kendi içerisinde değerlendirilmiştir. Tuz çözeltisine 12 hafta maruz kalan geopolimer beton numunelerin UPV değerleri ile aynı yaştaki kontrol numunelerin UPV değerleri karşılaştırıldığında;

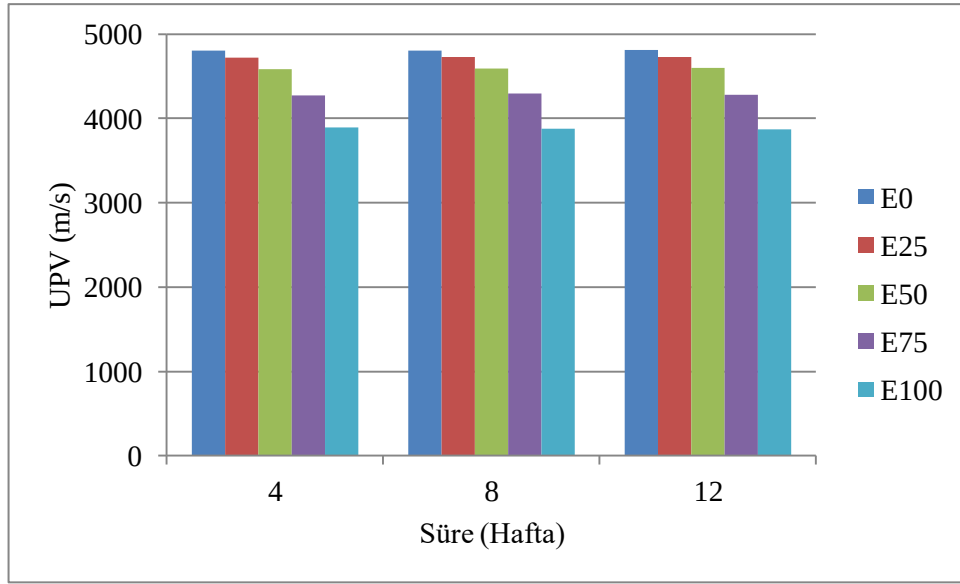
- %5 NaCl çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların UPV değerleri sırasıyla %0.23, %0.23, %0.28, %0.70 ve %0.31 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların UPV değerleri sırasıyla %0.31, %0.34, %0.41, %0.32 ve %0.74 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların UPV değerleri sırasıyla %0.95, %0.52, %0.69, %0.35 ve %1.52 oranında azalmıştır.
- %5 MgCl₂ çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların UPV değerleri sırasıyla %0.46, %0.46, %0.52, %0.33 ve %0.71 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların UPV değerleri sırasıyla %0.52, %0.53, %0.63, %0.49 ve %1.20 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların UPV değerleri sırasıyla %0.87, %0.71, %0.86, %0.83 ve %2.03 oranında azalmıştır.

Çizelge 4. 12. Tuz çözeltilerinde bekletilen numunelerin UPV ölçümleri

Çözelti	Karışım	UPV Değeri (m/s)		
		Süre (Hafta)		
		4	8	12
%5 NaCl	E0	4815	4817	4798
	E25	4730	4735	4737
	E50	4593	4602	4607
	E75	4285	4301	4305
	E100	3909	3895	3890
%5 MgCl ₂	E0	4804	4807	4810
	E25	4719	4726	4728
	E50	4582	4592	4599
	E75	4274	4294	4284
	E100	3893	3877	3870



Şekil 4. 28. %5 NaCl çözeltisindeki numunelerin UPV değerleri



Şekil 4. 29. %5 $MgCl_2$ çözeltisindeki numunelerin UPV değerleri

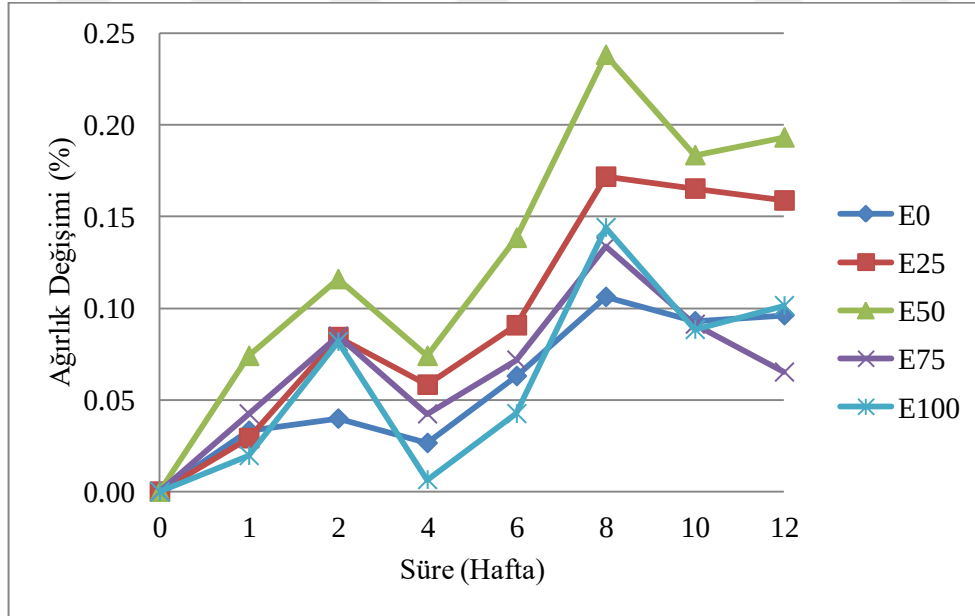
Tuz etkisine maruz kalan geopolimer betonların UPV değerlerinde azalma olmuştur. Hem %5 NaCl hem de %5 $MgCl_2$ çözeltisinde bekletilen geopolimer beton numunelerin basınç dayanımlarında olduğu gibi, UPV değerlerinde de büyük bir değişim olmamıştır.

4.5.3. Tuz etkisindeki numunelerin ağırlık değişimleri

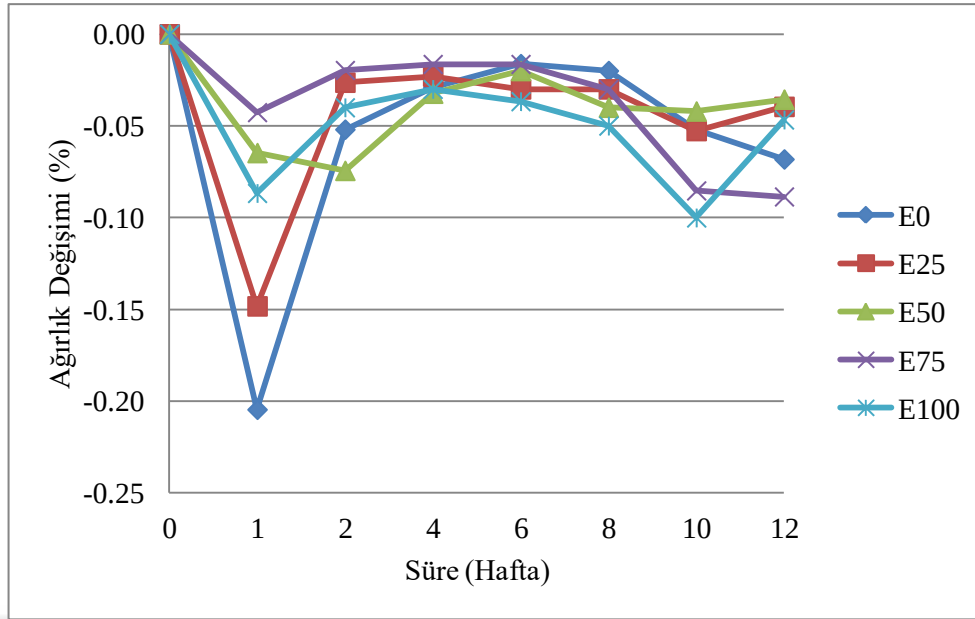
Kür sürelerini tamamlayan numuneler, 12 hafta boyunca tuz çözeltisinde bekletilirken bu süreçte numunelerin ağırlık değişimleri incelenmiştir. Tuz çözeltilerine bırakılan numunelerin ağırlık değişimleri Çizelge 4.13'te verilmiştir. Şekil 4.30-31'den de görüldüğü üzere %5 NaCl çözeltisindeki numunelerin ağırlıklarında artış olurken, %5 $MgCl_2$ çözeltisindeki numunelerin ağırlıklarında azalma olmuştur.

Çizelge 4. 13. Tuz çözeltilerinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri

Çözelti	Karışım	Ağırlık Değişimi (%)							
		Süre (Hafta)							
		1	2	4	6	8	10	12	
%5 NaCl	E0	0.03	0.04	0.03	0.06	0.11	0.09	0.10	
	E25	0.03	0.08	0.06	0.09	0.17	0.17	0.16	
	E50	0.07	0.12	0.07	0.14	0.24	0.18	0.19	
	E75	0.04	0.08	0.04	0.07	0.13	0.09	0.07	
	E100	0.02	0.08	0.01	0.04	0.14	0.09	0.10	
%5 MgCl ₂	E0	-0.20	-0.05	-0.03	-0.02	-0.02	-0.05	-0.07	
	E25	-0.15	-0.03	-0.02	-0.03	-0.03	-0.05	-0.04	
	E50	-0.06	-0.07	-0.03	-0.02	-0.04	-0.04	-0.04	
	E75	-0.04	-0.02	-0.02	-0.02	-0.03	-0.09	-0.09	
	E100	-0.09	-0.04	-0.03	-0.04	-0.05	-0.10	-0.05	



Şekil 4. 30. %5 NaCl çözeltisindeki numunelerin ağırlık değişimleri



Şekil 4. 31. %5 $MgCl_2$ çözeltisindeki numunelerin ağırlık değişimleri

Tuz çözeltilerindeki geopolimer beton numunelerin ağırlık değişimleri incelendiğinde, değişimlerin $\pm$ %0.25 olduğu görülmektedir. Numunelerin ağırlık kazanım veya kayıplarında bir süreklilik bulunmamaktadır.

Singh vd., (2013) yaptıkları çalışmada %10 NaCl çözeltisinde 90 gün bekletilen geopolimer betonun ağırlık kaybının yaklaşık olarak %1.4 olduğunu belirtmişlerdir. Shoaie (2013), %3.5 ve %5 konsantrasyonlarındaki NaCl ve $MgCl_2$ çözeltilerinde 90 gün bekletilen %10 silis dumanı ilave edilen hafif betonların, %20 UK ilave edilen hafif betonların ve mineral katkısız hafif betonların birim hacim ağırlıklarında artış olduğunu belirtmiştir. Albitar vd., (2017) 9 ay süresince %5 NaCl çözeltisinde bekletilen F sınıfı UK esaslı geopolimer betonların, UK ile öğütülmüş kurşun izabe cürufu karışımı esaslı geopolimer betonların ve PÇ'li betonların ağırlık artışlarının sırasıyla %1.8, %1 ve %1.7 olduğunu belirtmişlerdir.

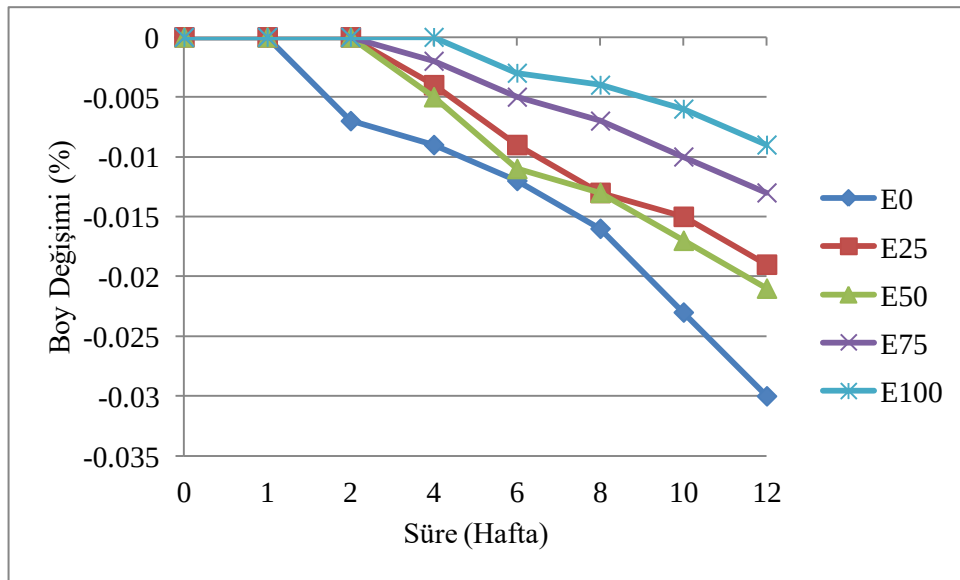
4.5.4. Tuz etkisindeki numunelerin boy değişimleri

Kür sürelerini tamamlayan numuneler, 12 hafta boyunca tuz çözeltisinde bekletilirken bu süreçte numunelerin boy değişimleri incelenmiştir. Tuz çözeltilerine bırakılan numunelerin boy değişimleri Çizelge 4.14'te verilmiştir. Şekil 4.32-33'ten de görüldüğü üzere NaCl ve $MgCl_2$ çözeltilerine bırakılan numunelerde büzülme meydana gelmiştir. Numunelerin boylarında ilk hafta değişiklik olmazken, tüm

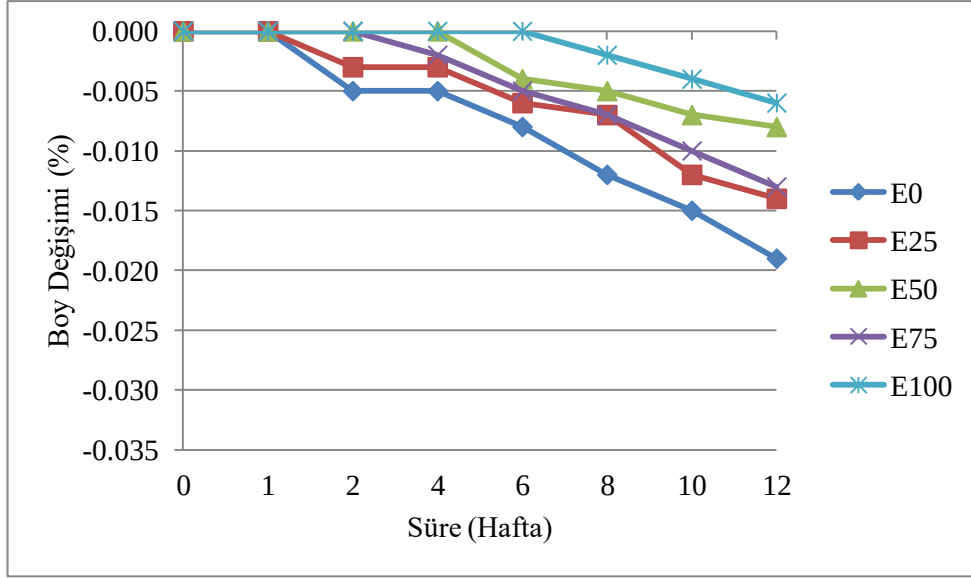
numunelerde boy değişimi; NaCl çözeltisi için 6. haftadan, MgCl₂ çözeltisi için ise 8. haftadan itibaren başlamıştır. Geopolimer beton karışımındaki YFC oranı arttıkça numunelerdeki büzülme oranı da artmıştır.

Çizelge 4. 14. Tuz çözeltilerinde bekletilen numunelerin boy değişimleri

Çözelti	Karışım	Boy Değişimi (%)						
		Süre (Hafta)						
		1	2	4	6	8	10	12
%5 NaCl	E0	0.000	-0.007	-0.009	-0.012	-0.016	-0.023	-0.030
	E25	0.000	0.000	-0.004	-0.009	-0.013	-0.015	-0.019
	E50	0.000	0.000	-0.005	-0.011	-0.013	-0.017	-0.021
	E75	0.000	0.000	-0.002	-0.005	-0.007	-0.010	-0.013
	E100	0.000	0.000	0.000	-0.003	-0.004	-0.006	-0.009
%5 MgCl ₂	E0	0.000	-0.005	-0.005	-0.008	-0.012	-0.015	-0.019
	E25	0.000	-0.003	-0.003	-0.006	-0.007	-0.012	-0.014
	E50	0.000	0.000	0.000	-0.004	-0.005	-0.007	-0.008
	E75	0.000	0.000	-0.002	-0.005	-0.007	-0.010	-0.013
	E100	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.002	-0.004	-0.006



Şekil 4. 32. %5 NaCl çözeltisindeki numunelerin boy değişimleri



Şekil 4. 33. %5 $MgCl_2$ çözeltisindeki numunelerin boy değişimleri

4.5.5. Tuz etkisindeki numunelerin görsel incelemeleri

Tuz çözeltilerine bırakılan numuneler görsel olarak incelendiğinde, numunelerin yüzeyleri düzgün ve herhangi bir çatlak vb. bozulma görülmemiştir. 12 hafta süresince tuz çözeltilerine maruz kalan numuneler Şekil 4.34-35'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 34. %5 $NaCl$ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin görünüşleri



Şekil 4. 35. %5 $MgCl_2$ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin görünüşleri

4.6. Sülfat Etkisine Maruz Kalan Geopolimer Beton Numuneleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma

Üretilen geopolimer beton numuneleri kür sürelerini tamamladıktan sonra sülfat etkisine karşı dirençlerinin belirlenmesi için 12 hafta boyunca %5 konsantrasyonundaki $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 çözeltilerinde bekletilmiştir. Bu süreçte numunelerin basınç dayanımları, UPV'leri, ağırlık ve boy değişimleri belirlenmiş, aynı zamanda numunelerin görsel değişimleri de incelenmiştir. Numunelerin basınç dayanım ve UPV değerleri, aynı yaştaki suda bekletilen kontrol numunelerin basınç dayanım ve UPV değerleriyle karşılaştırılmıştır.

4.6.1. Sülfat etkisindeki numunelerin basınç dayanımları

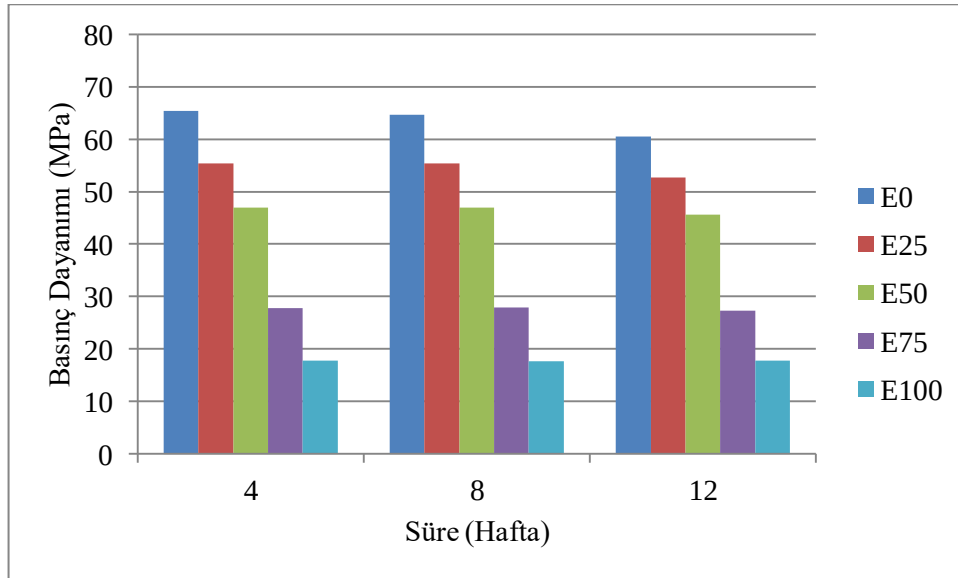
Sülfat çözeltilerine bırakılan numunelerin 4, 8 ve 12 haftalık periyotlarda basınç dayanımları ölçülmüştür. Numunelerin basınç dayanım değerleri Çizelge 4.15'te verilmiş ve Şekil 4.36-37'de grafik halinde gösterilmiştir. Sülfat çözeltisine 12 hafta maruz kalan geopolimer beton numunelerin basınç dayanım değerleri, aynı yaştaki suda bekletilen kontrol numunelerin basınç dayanım değerleriyle karşılaştırıldığında;

- %5 $MgSO_4$ çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %7.5, %6.9, %3.1, %1.8 ve %1.6 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %9.3, %8.3, %4.6, %4.5 ve %2.9 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %16.4, %13.9, %9.2, %6.9 ve %3.2 oranında azalmıştır.
- %5 Na_2SO_4 çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %9.7, %4.9, %2.9, %2.6 ve %2.1 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %15.9, %11.3, %6.8, %6.0 ve %3.5 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100

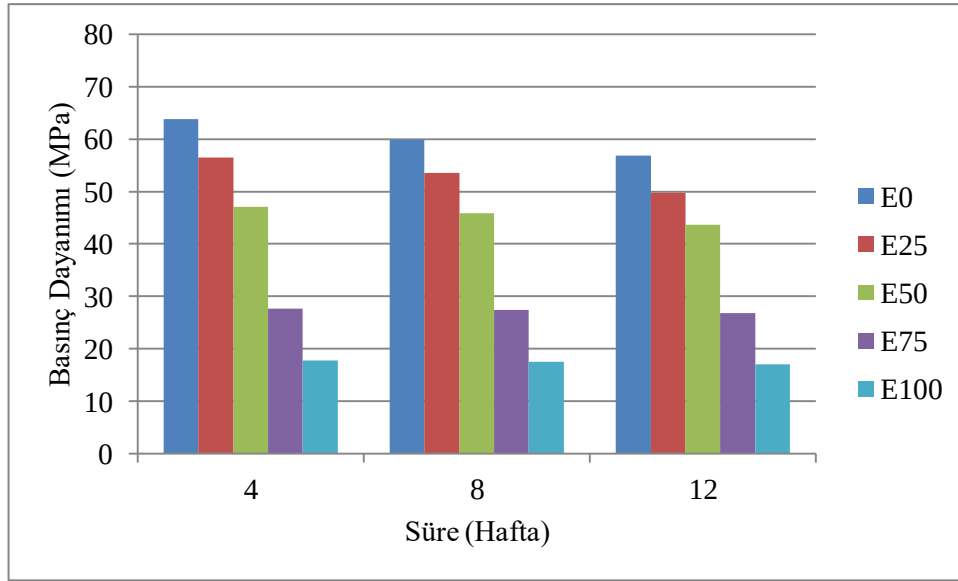
kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %21.6, %18.7, %13.0, %8.5 ve %7.4 oranında azalmıştır.

Çizelge 4. 15. Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri

Çözelti	Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)		
		Süre (Hafta)		
		4	8	12
%5 MgSO ₄	E0	65.32	64.62	60.55
	E25	55.35	55.34	52.73
	E50	46.92	46.93	45.56
	E75	27.83	27.87	27.32
	E100	17.85	17.65	17.80
%5 Na ₂ SO ₄	E0	63.81	59.85	56.78
	E25	56.52	53.56	49.82
	E50	47.05	45.88	43.64
	E75	27.62	27.42	26.85
	E100	17.76	17.53	17.02



Şekil 4. 36. %5 MgSO₄ çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri



Şekil 4. 37. %5 Na₂SO₄ çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri

%5 MgSO₄ ve %5 Na₂SO₄ çözeltileri geopolimer beton numunelerin basınç dayanımlarında azalmaya neden olmuştur. Geopolimer beton karışımında artan YFC oranıyla birlikte, numunelerin basınç dayanımındaki azalmalarda bir artış olduğu görülmüştür. Sülfat saldırısı betondaki Ca bileşenleri ile etkileşerek etrenjit ve alçıtaşı oluşturur (Sata vd., 2012). Bu bağlamda YFC, EFC' ye oranla çok daha fazla CaO içerdiğinden dolayı sülfat saldırılarından daha fazla etkilendiği düşünülmektedir.

Kalsiyum ve sülfatın birleşmesi sonucu oluşan genleşen ürünlerden dolayı yüksek kalsiyum içeren malzemeler kullanılan geopolimerlerde çatlaklar ve gözenekli yapılar oluşmaktadır. Daha önceki çalışmalarda geopolimerik malzemelerin sülfata karşı mükemmel dirençlerinin nedeni, kaynak malzemelerindeki düşük Ca içeriğine ve daha kararlı çapraz bağlı alüminosilikat polimer yapılarına bağlanmıştır (Ren vd., 2017).

Singh vd., (2013) yaptıkları çalışmada %10 Na₂SO₄ çözeltisinde 90 gün bekletilen geopolimer betonun basınç dayanımını 27.21 MPa olarak ölçmüşlerdir. Ganesan vd., (2015) %3 sodyum sülfat çözeltisinde 180 gün bekletilen UK esaslı geopolimer betona, %0.75 ve %1 oranlarında çelik lif ilave edilmesinin, numunelerdeki dayanım kayıplarını azalttığını belirtmişlerdir. Yusuf (2015); palmye yağı yakıt külü ve öğütülmüş çelik cürufunu, sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktif ederek 50x50x50 mm'lik geopolimer harç numuneleri üretmiştir. Deney için

alkali aktivatör oranı ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) 2.5 olan katkısız yakıt küllü harç ve %20 cüruf katkılı harç, alkali aktivatör oranı 1 olan %20 cüruf katkılı harç olmak üzere 3 grup numune üretilmiştir. Harç karışımları hazırlandıktan sonra kalıplara yerleştirilmiş ve numunelerin nem kaybetmesini engellemek için kalıplar vinil poşete konulmuştur. Numuneler 12 saat 25 °C sıcaklıkta laboratuvarında bekledikten sonra kalıptan çıkarılmıştır. Ardından numuneler 60 °C sıcaklıkta 24 saat fırında kür edilmiştir. Numuneler 28 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra 6 ay süresince 50 g/dm³ MgSO_4 ve 50 g/dm³ Na_2SO_4 çözeltilerine bırakılmıştır. MgSO_4 ve Na_2SO_4 çözeltileri karşılaştırıldığında, MgSO_4 çözeltisi harçlarda daha az basınç dayanım kaybına neden olmuştur. Sonuç olarak palmiye yağı yakıt külü esaslı geopolimer betona %20 oranında cüruf ilave edilmesi sülfat direncini arttırmış, alkali aktivatör oranının 1'den 2.5'e yükseltilmesi ile de harç numunelerinin dayanım kayıplarında çok az değişim olmuştur. Karakoç vd., (2016) yaptıkları çalışmada silis modülü 1.35 ve Na_2O içeriği %9.13 olan ferrokrom cürufu esaslı geopolimer beton üretmişlerdir. Üretilen numuneler %3, %5 ve %7 konsantrasyonundaki magnezyum sülfat çözeltilerine 24 hafta süresince maruz bırakılmıştır. Numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde, artan sülfat konsantrasyonu ile birlikte numunelerin basınç dayanımlarındaki kayıplar da artmıştır. Kırma kum kullanılan geopolimer betonlardaki dayanım kayıplarının, dere kumu kullanılan geopolimer betonlardaki dayanım kayıplarına oranla daha düşük olduğu görülmüştür. Khan vd., (2017) yaptıkları çalışmada NaOH ile aktive edilen YFC ve YFC + PÇ'li geopolimer betonların sülfat direncini araştırmışlardır. Bu nedenle sıvı/bağlayıcı oranı 0.35 olan 4 grup (%100 YFC, %25 YFC + %75 PÇ, %50 YFC + %50 PÇ, % 70 YFC + %30 PÇ) numune üretilmiştir. Üretilen numuneler 50 mm'lik küp numuneler olup 24 saat kalıpta bekledikten sonra 28 gün boyunca 23 °C ve %50 bağıl nemde kür edilmiştir. Kür süresini tamamlayan numuneler 6 ay süresince %3.1 Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilmiş ve deney süresince çözelti her ay yenilenmiştir. Numunelerin basınç dayanımlarındaki azalmalar incelendiğinde, çözeltide 3 ay bekleyen numunelerin basınç dayanımları; %100 YFC için 40.35 MPa'dan 33.01 MPa'a, %25 YFC + %75 PÇ için 30.43 MPa'dan 14.11 MPa'a, %50 YFC + %50 PÇ için 37.55 MPa'dan 15.72 MPa'a, %70 YFC + %30 PÇ için 38.61 MPa'dan 29.63 MPa'a düşmüştür. Çözeltide 6 ay bekleyen numunelerin basınç dayanımları ise %100 YFC için 21.96 MPa , %25 YFC + %75 PÇ için 12.93 MPa, %50 YFC + %50 PÇ için 15.51 MPa, %70 YFC + %30 PÇ için 23.91 MPa'a kadar düşmüştür. Parthiban ve Mohan

(2017); yaptıkları çalışmada geri dönüşüm beton agregasının geopolimer betona etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla NaOH ve Na₂SiO₃ ile aktif edilen cüruf esaslı geopolimer betona iri agrega olarak %0'dan %100'e 25'şer oranında artırılarak doğal agrega yerine geri dönüşüm beton agregası katılarak geopolimer beton üretilmiştir. Üretilen numuneler 28 gün boyunca ortam sıcaklığında kür edildikten sonra %5 MgSO₄ ve %5 Na₂SO₄ çözeltilerinde 90 gün süresince bekletilmiştir. Deney sonuçları göstermiştir ki hem Na₂SO₄ çözeltisi hem de MgSO₄ çözeltisine maruz kalan numunelerde geri dönüşüm beton agregası miktarı arttıkça numunelerin basınç dayanımlarındaki kayıplar artmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında MgSO₄ çözeltisi Na₂SO₄ çözeltisine göre numuneleri olumsuz olarak daha fazla etkilemiştir. Sodyum sülfat ile etkileşime giren sodyum hidroksit, geopolimer betondan süzülerek geopolimer basınç dayanımını olumsuz olarak etkilemektedir (Albitar vd., 2017). Ren vd., (2017) metakaolin esaslı geopolimerleri %5, %10, %15 ve %20 konsantrasyonlu Na₂SO₄ çözeltilerinde 90 gün süresince bekletmişlerdir. Sodyum sülfat çözeltilerinin konsantrasyonu arttıkça numunelerin basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. Mineral katkıların sülfat saldırılarına karşı geopolimerin basınç dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir.

4.6.2. Sülfat etkisindeki numunelerin UPV ölçümleri

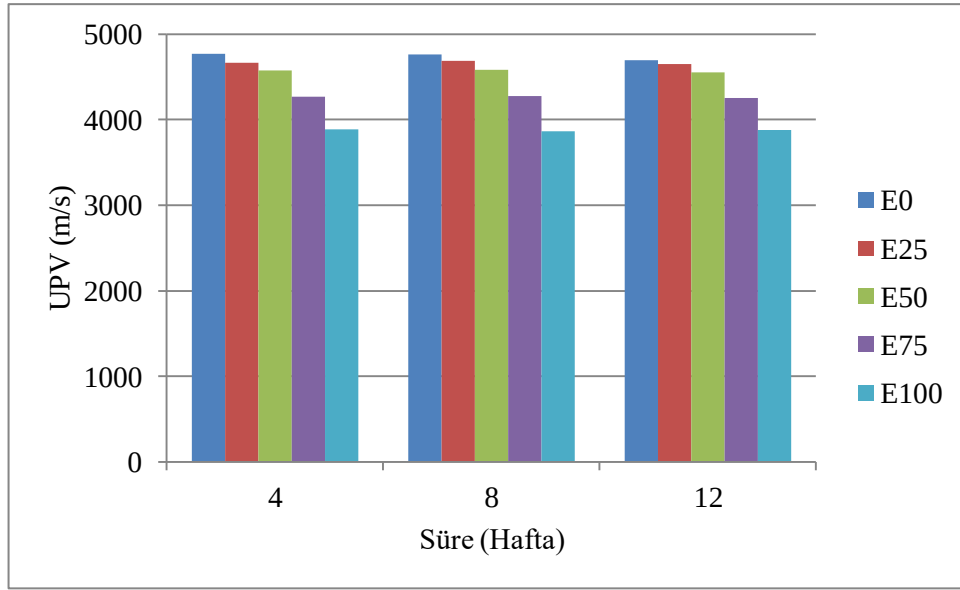
Sülfat çözeltilerine yerleştirilen numunelerin 4, 8 ve 12 haftalık periyotlarda UPV ölçümleri yapılmıştır. Numunelerin UPV ölçümleri Çizelge 4.16'da verilmiş ve Şekil 4.38-39'da grafik halinde gösterilmiştir. Numuneler için yapılan ölçümler değerlendirilirken her grup kendi içerisinde değerlendirilmiştir. Sülfat çözeltisine 12 hafta maruz kalan geopolimer beton numunelerin UPV değerleri ile aynı yaştaki kontrol numunelerin UPV değerleri karşılaştırıldığında;

- %5 MgSO₄ çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların UPV değerleri sırasıyla %1.60, %1.56, %0.65, %0.42 ve %0.89 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların UPV değerleri sırasıyla %1.47, %1.39, %0.89, %1.00 ve %1.61 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların UPV değerleri sırasıyla %3.13, %2.33, %1.94, %1.55 ve %1.77 oranında azalmıştır.

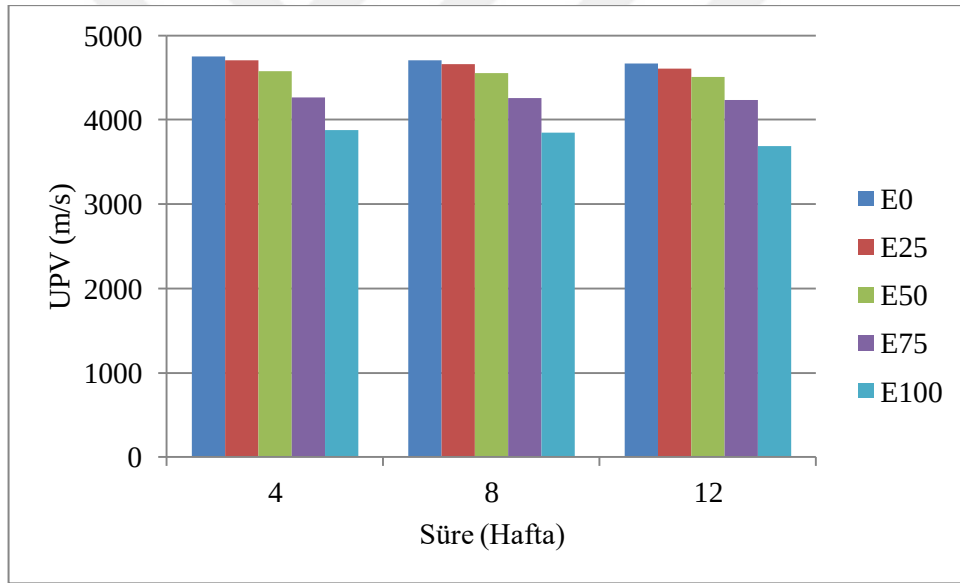
- %5 Na₂SO₄ çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların UPV değerleri sırasıyla %1.53, %0.80 %0.59, %0.58 ve %1.17 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların UPV değerleri sırasıyla %2.63, %1.85, %1.43, %1.37 ve %1.96 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde E0, E25, E50, E75 ve E100 kodlu geopolimer betonların UPV değerleri sırasıyla %3.67, %3.21, %2.82, %1.94 ve %6.71 oranında azalmıştır.

Çizelge 4. 16. Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin UPV ölçümleri

Çözelti	Karışım	UPV Değeri (m/s)		
		Süre (Hafta)		
		4	8	12
%5 MgSO ₄	E0	4769	4761	4693
	E25	4667	4685	4651
	E50	4576	4580	4549
	E75	4270	4272	4253
	E100	3886	3861	3880
%5 Na ₂ SO ₄	E0	4752	4705	4666
	E25	4703	4663	4609
	E50	4579	4555	4508
	E75	4263	4256	4236
	E100	3875	3827	3685



Şekil 4. 38. %5 $MgSO_4$ çözeltisindeki numunelerin UPV değerleri



Şekil 4. 39. %5 Na_2SO_4 çözeltisindeki numunelerin UPV değerleri

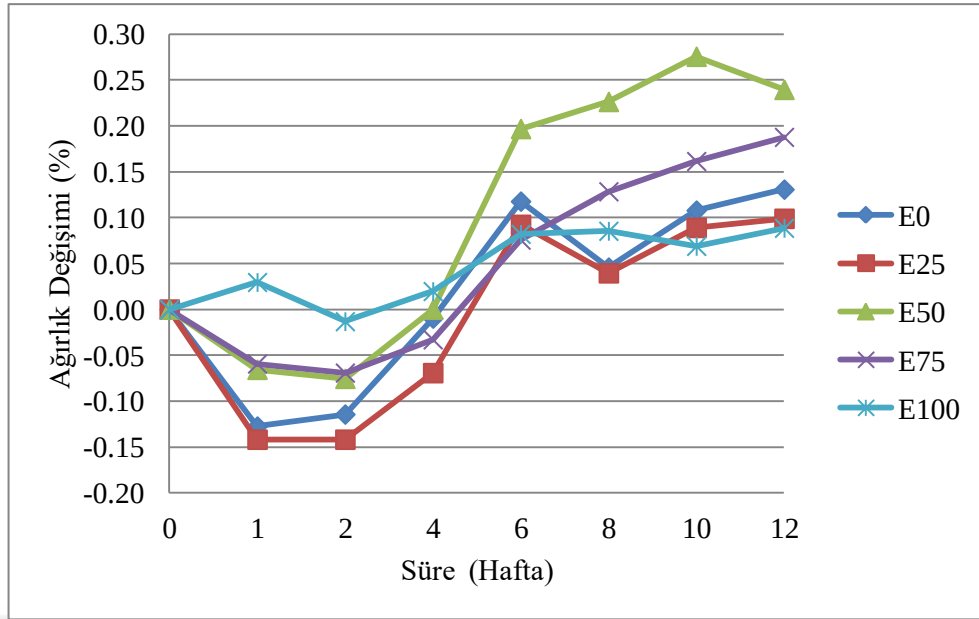
Sülfat etkisine maruz kalan geopolimer beton numunelerin UPV değerleri incelendiğinde, UPV değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. Sülfat etkisine maruz kalan numunelerin basınç dayanımlarında olduğu gibi, UPV değerlerinde de en fazla etkiyi %5 konsantrasyonlu Na_2SO_4 çözeltisi yapmıştır.

4.6.3. Sülfat etkisindeki numunelerin ağırlık değişimleri

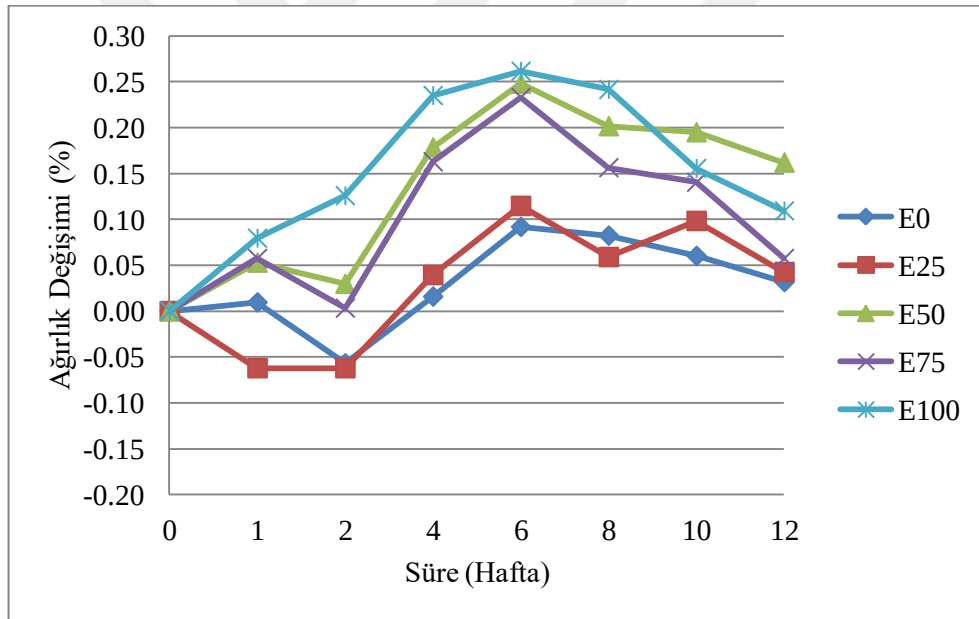
Kür sürelerini tamamlayan numuneler, 12 hafta boyunca sülfat çözeltisinde bekletilirken bu süreçte numunelerin ağırlık değişimleri incelenmiştir. Sülfat çözeltilerine bırakılan numunelerin ağırlık değişimleri Çizelge 4.17’de verilmiştir. Şekil 4.40-41’den de görüldüğü üzere sülfat etkisine 12 hafta maruz kalan geopolimer beton numunelerinde ağırlık artışı olmuştur.

Çizelge 4. 17. Sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri

Çözelti	Karışım	Ağırlık Değişimi (%)						
		Süre (Hafta)						
		1	2	4	6	8	10	12
%5 MgSO ₄	E0	-0.13	-0.11	-0.01	0.12	0.05	0.11	0.13
	E25	-0.14	-0.14	-0.07	0.09	0.04	0.09	0.10
	E50	-0.07	-0.08	0.00	0.20	0.23	0.28	0.24
	E75	-0.06	-0.07	-0.03	0.08	0.13	0.16	0.19
	E100	0.03	-0.01	0.02	0.08	0.09	0.07	0.09
%5 Na ₂ SO ₄	E0	0.01	-0.06	0.02	0.09	0.08	0.06	0.03
	E25	-0.06	-0.06	0.04	0.11	0.06	0.10	0.04
	E50	0.05	0.03	0.18	0.25	0.20	0.19	0.16
	E75	0.06	0.00	0.16	0.23	0.16	0.14	0.06
	E100	0.08	0.13	0.23	0.26	0.24	0.16	0.11



Şekil 4. 40. %5 $MgSO_4$ çözeltisindeki numunelerin ağırlık değişimleri



Şekil 4. 41. %5 Na_2SO_4 çözeltisindeki numunelerin ağırlık değişimleri

Hem %5 $MgSO_4$ hem de %5 Na_2SO_4 çözeltileri, geopolimer beton numunelerinde ağırlık artışına neden olmuştur. Sülfat etkisine maruz kalan geopolimer beton numunelerindeki ağırlık değişimlerinin düzenli olmamasının nedeni, çözeltiden çıkarılan numunelerin yüzeylerinde biriken sülfat tortularının ölçümden ölçüme farklılık göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Mingyu vd., (2009) yaptıkları çalışmada NaOH ve CaO ile aktif ettikleri UK'lı geopolimere, zeolit ya da bentonit ekleyerek sülfat direncini incelemişlerdir. Numune boyutları

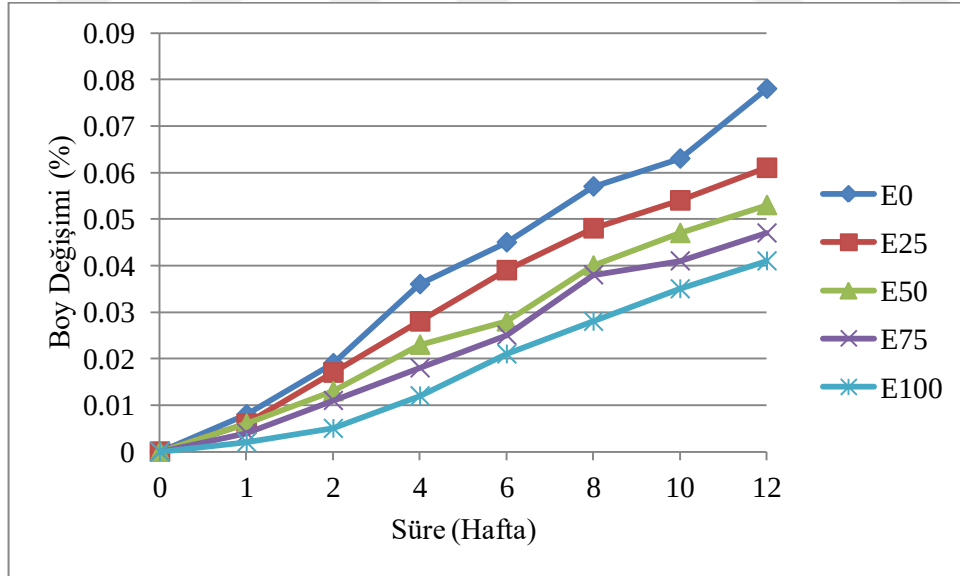
10x10x40 mm olup numuneler 28 gün boyunca 20 °C ve %90'nın üzerinde bağıl nemde kür edildikten sonra %10 MgSO₄ çözeltisinde 60 gün süresince bekletilmiştir. Deney sonucunda en az ağırlık kaybı %1.4 ile ilave içermeyen geopolimerde görülürken, zeolit ilaveli geopolimerde bu değer %5.1 olarak belirlenmiştir. En fazla ağırlık kaybı bentonit ilaveli geopolimerde görülmüştür. Singh vd., (2013) yaptıkları çalışmada %10 Na₂SO₄ çözeltisinde 90 gün bekletilen geopolimer betonun ağırlık değişiminin yaklaşık olarak %2.6 olduğunu belirtmişlerdir. Ganesan vd., (2015) %3 sodyum sülfat çözeltisine 180 gün maruz kalan UK esaslı geopolimer betona %0.50 oranında çelik lif ilave edilmesinin, geopolimer betondaki ağırlık kaybını azalttığını belirtmişlerdir. Yusuf (2015), MgSO₄ ve Na₂SO₄ çözeltilerine maruz kalan geopolimer harç numuneleri karşılaştırıldığında, MgSO₄ çözeltisinin harçlarda daha az ağırlık kaybına neden olduğunu belirtmiştir. Karakoç vd. (2016), farklı konsantrasyonlardaki MgSO₄ çözeltilerine maruz kalan dere agregası kullanılarak üretilen geopolimer betonlardaki ağırlık artışının %0.62 ile %1.86 arasında olduğunu, kırma kum kullanılarak üretilen geopolimer betonlardaki ağırlık artışının ise %0.84 ile %2.11 arasında olduğunu belirtmişlerdir. Wei vd., (2017) %5 magnezyum sülfat çözeltisinde 28 gün bekletilen vanadyum artığı esaslı geopolimerlerdeki vanadyum artığının öğütülme süresi arttıkça, numunelerdeki ağırlık kaybının azaldığını belirtmişlerdir. Parthiban ve Mohan (2017), hem Na₂SO₄ çözeltisi hem de MgSO₄ çözeltisine maruz kalan numunelerde geri dönüşüm beton agregası miktarı arttıkça, numunelerin ağırlık kayıplarında artış olduğunu belirtmişlerdir. Albitar vd., (2017) 9 ay süresince %5 Na₂SO₄ ve %5 Na₂SO₄+MgSO₄ çözeltilerinde bekletilen F sınıfı UK esaslı geopolimer betonun ağırlık artışının %0.7 ile %1.9 arasında olduğunu belirtmişlerdir.

4.6.4. Sülfat etkisindeki numunelerin boy değişimleri

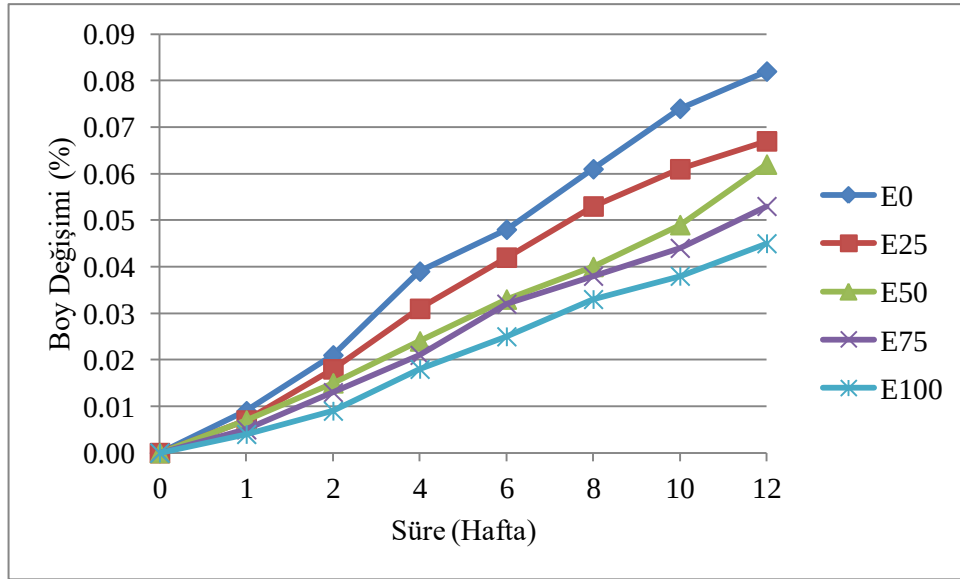
Kür sürelerini tamamlayan numuneler, 12 hafta boyunca sülfat çözeltisinde bekletilirken bu süreçte numunelerin boy değişimleri incelenmiştir. Sülfat çözeltilerine bırakılan numunelerin boy değişimleri Çizelge 4.18'de verilmiştir ve Şekil 4.42-43'te gösterilmiştir.

Çizelge 4. 18. Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin boy değişimleri

Çözelti	Karışım	Boy Değişimi (%)						
		Süre (Hafta)						
		1	2	4	6	8	10	12
%5 MgSO ₄	E0	0.008	0.019	0.036	0.045	0.057	0.063	0.078
	E25	0.006	0.017	0.028	0.039	0.048	0.054	0.061
	E50	0.006	0.013	0.023	0.028	0.040	0.047	0.053
	E75	0.004	0.011	0.018	0.025	0.038	0.041	0.047
	E100	0.002	0.005	0.012	0.021	0.028	0.035	0.041
%5 Na ₂ SO ₄	E0	0.009	0.021	0.039	0.048	0.061	0.074	0.082
	E25	0.007	0.018	0.031	0.042	0.053	0.061	0.067
	E50	0.007	0.015	0.024	0.033	0.040	0.049	0.062
	E75	0.005	0.013	0.021	0.032	0.038	0.044	0.053
	E100	0.004	0.009	0.018	0.025	0.033	0.038	0.045



Şekil 4. 42. %5 MgSO₄ çözeltisindeki numunelerin boy değişimleri



Şekil 4. 43. %5 Na₂SO₄ çözeltisindeki numunelerin boy değişimleri

Sata vd., (2012) yaptıkları çalışmada sülfatın etkisini incelemek için 25x25x285 mm'lik geopolimer harç çubukları üretmişler ve bu numuneleri %5 Na₂SO₄ çözeltisine yerleştirmişlerdir. 360 gün sodyum sülfat çözeltisinde bekleyen numunelerin boy değişimleri incelendiğinde, geopolimer harçlarda en az genleşme görülürken, en fazla genleşme katkısız PÇ'li harçlarda görülmüştür. Karakoç vd. (2016), farklı konsantrasyonlardaki MgSO₄ çözeltilerine maruz kalan dere agregası kullanılarak üretilen geopolimer betonlardaki genleşme miktarlarının, kırma kum kullanılarak üretilen geopolimer betonlardaki genleşme miktarlarına göre daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Yukarıda verilen literatür çalışmalarından görüldüğü üzere sülfat etkisine maruz kalan numunelerde genleşme olmaktadır. Bu çalışmada da sülfat etkisiyle, geopolimer beton numunelerinde genleşme olduğu görülmüştür.

4.6.5. Sülfat etkisindeki numunelerin görsel incelemeleri

Sülfat çözeltilerine bırakılan numuneler görsel olarak incelendiğinde numunelerin yüzeyinde herhangi bir çatlak vb. bozulma görülmemiştir. 12 hafta süresince sülfat çözeltilerine maruz kalan numuneler Şekil 4.44-45'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 44. %5 $MgSO_4$ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin görünümleri



Şekil 4. 45. %5 Na_2SO_4 çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin görünümleri

Mingyu vd., (2009) %10 $MgSO_4$ çözeltisine maruz kalan bentonit ilaveli geopolimerin parçalara ayrıldığını, zeolit içeren geopolimerin bozulmadığını, yüzeyleri düz ve herhangi bir çatlak bulunmadığını, ilave içermeyen geopolimer de ise çatlaklar olduğunu gözlemlemişlerdir. Sata vd., (2012) geopolimer harçlara göre katkısız PÇ harçlarda daha fazla bozulma olmasının sebebini, kalsiyum hidroksit ve kalsiyum monosülfoaluminatların sülfatla reaksiyona girmesinden dolayı dayanım kaybı, genleşme ve çatlaklara yol açan etrenjit ve alçıtaşına formlarına dönüşmesinden dolayı kaynaklandığını belirtmişlerdir. Magnezyum sülfat çözeltilerine maruz kalan harçlarda katyon değişiminden dolayı yüzeyde beyaz $CaSO_4$ tortuları görülmüştür. Geopolimere ilave edilen cüruf miktarı ve alkali aktivatör oranı arttıkça tortu miktarı azalmıştır. Sodyum sülfat çözeltisi harç numunelerinde bulunan aktif mineral elementlerinin harçlardan yıkanıp uzaklaşmasına neden olmuştur, dolayısıyla harçların içyapısının bozulmasına yol açmıştır (Yusuf, 2015). Karakoç vd., (2016) farklı konsantrasyonlardaki $MgSO_4$ çözeltilerine 24 hafta boyunca maruz kalan ferrokrom cürufu esaslı geopolimer betonların yüzeylerinde kabarma, çatlak vb. bir bozulma olmadığını belirtmişlerdir. Khan vd., (2017) 6 ay süresince %3.1 Na_2SO_4 çözeltisine maruz kalan %100 YFC, %25 YFC + %75 PÇ, %50 YFC + %50 PÇ, % 70 YFC + %30 PÇ içeren geopolimer beton numunelerinden %70 YFC + % 30 PÇ içeren numunede diğer ikili bağlayıcı

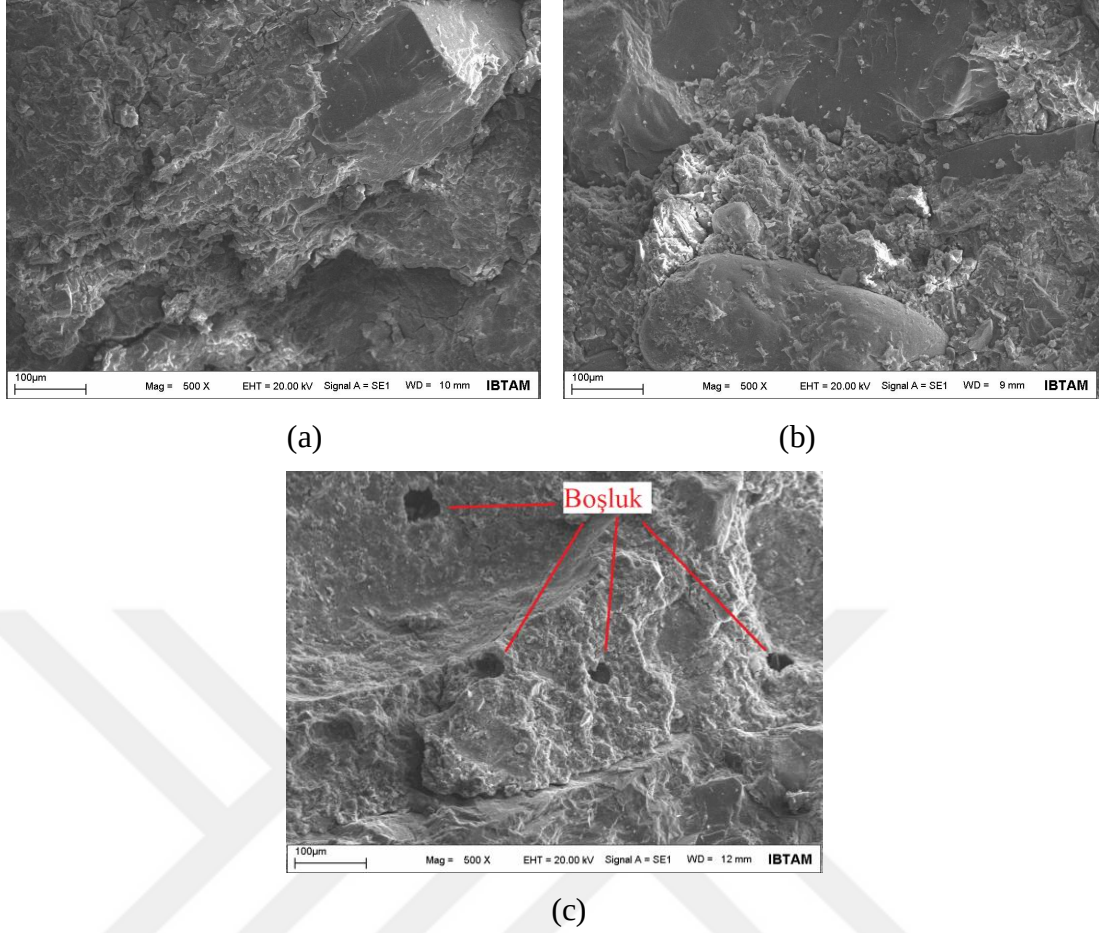
içeren numunelere göre daha az çatlak ve görsel olarak daha az bozulma meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Bakharev (2005b) yaptığı çalışmada F sınıfı UK kullanarak üç farklı şekilde alkali ile aktif ederek (Na_2SiO_3 , NaOH ve NaOH+KOH) geopolimer beton üretmiştir. Üretilen geopolimer betonlar 5 ay boyunca %5 MgSO_4 , %5 Na_2SO_4 ve %5 $\text{Na}_2\text{SO}_4+\text{MgSO}_4$ çözeltilerine maruz bırakılıp numunelerin basınç dayanımları, ağırlık değişimleri ve içyapıları incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre farklı sülfat ortamlarına karşı en iyi direncin sodyum hidroksitle aktif hale getirilen ve yüksek sıcaklıkta kür edilen geopolimer betonlarda görüldüğü gözlemlenmiştir.

Rashidian-Dezfouli ve Rangaraju (2017) cam tozu lifi, UK ve cam tozu kullanılarak üretilen geopolimerlerin sodyum sülfat çözeltisine karşı direncini çalışmışlardır. Bağlayıcı malzemesi olarak üç malzemede ayrı ayrı kullanılmıştır ve cam tozu lifi için $M_s = 0$, UK için $M_s = 1$ ve cam tozu için $M_s = 1$ olacak şekilde numune karışımları hazırlanmıştır. Numunelerin çözeltiliye yerleştirilmeden önceki basınç dayanımları cam tozu lifi için 79 MPa, UK için 58 MPa ve cam tozu için 37 MPa olarak belirlenmiştir. Kür sürelerini tamamlayan numuneler %5 Na_2SO_4 çözeltisine 120 gün süresince bırakılmıştır ve bu sürede numunelerin ağırlık değişimleri ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Deney süresi sonunda basınç dayanımları cam tozu lifi için 70 MPa, UK için 58 MPa ve cam tozu için ise 18 MPa olarak ölçülmüştür. Numunelerin 120 gün sonundaki ağırlık değişimleri ise cam tozu lifi için %0.4 oranında, UK için %2.2 oranında artış gösterirken, cam tozu için ise %2.0 oranında azalmıştır. Cam tozu lifi ve UK esaslı geopolimerlerde sodyum sülfat çözeltisinden etkilendiklerine dair görsel olarak herhangi bir iz görülmezken, cam tozu esaslı geopolimerlerde ise çatlakların oluştuğu ciddi bozulmalar meydana gelmiştir.

4.7. İçyapı Analizi

Bu kısımda numunelerin içyapı analizleri için SEM görüntüleri değerlendirilmiştir. Şekil 4.46'da suda kür edilen 16 haftalık E0, E50 ve E100 kodlu geopolimer betonların SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.46'dan da görüldüğü üzere E0 kodlu numunenin içyapısı daha yoğun bir görünüme sahipken, karışımdaki EFC oranı arttıkça bu yoğunluk azalmaktadır.



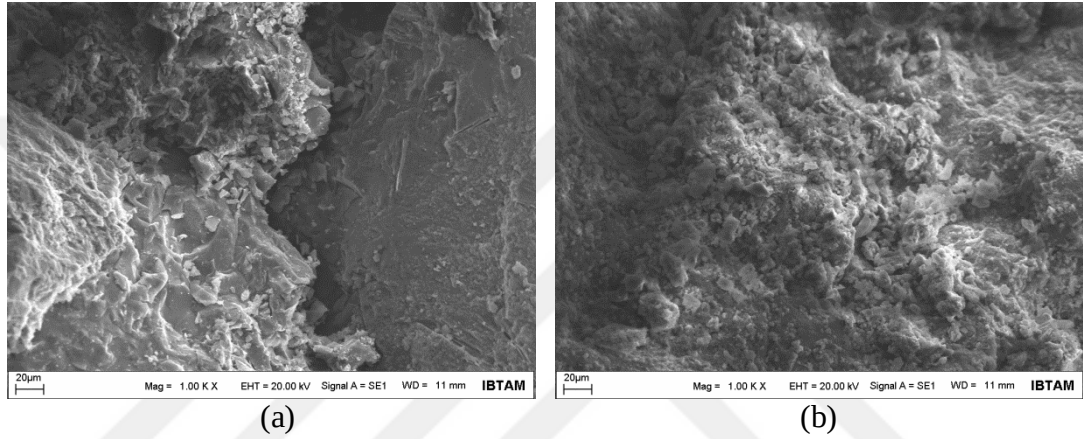
Şekil 4. 46. Suda kür edilen geopolimer betonların SEM görüntüleri; (a) E0, (b) E50, (c) E100

Sata vd., (2012) iri taban külünün, ince taban külüne göre daha az hidrasyon ürünü oluşturduğu ve daha az geopolimerizasyon işlemi gerçekleştirdiğini belirtmişlerdir. Bunun nedenini ise iri taban külünün daha küçük yüzey alanına sahip olmasına bağlamışlardır. Şekil 4.46'dan da görüldüğü üzere geopolimer beton karışımlarında YFC oranı arttıkça, geopolimerizasyon işleminin yoğunlaşması ve boşlukların azalması nedeniyle E0 kodlu geopolimer betonda en yüksek basınç dayanımı elde edildiği düşünülmektedir. Aynı zamanda, YFC'nin EFC'ye göre geopolimer jeli oluşturacak elementleri daha fazla içermesi nedeniyle, YFC kullanılan geopolimerlerde daha yoğun bir yapı elde edilmiştir.

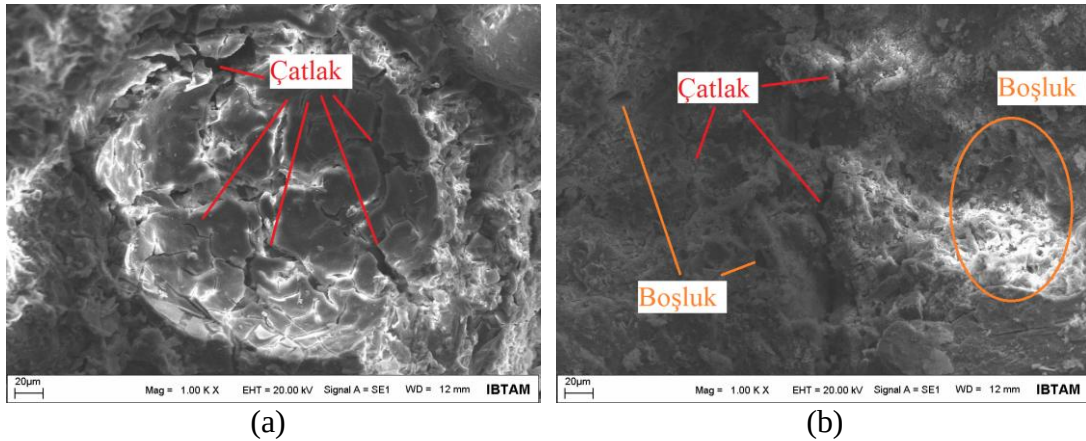
4.7.1. Asit etkisindeki numunelerin içyapı analizleri

%5 konsantrasyonlu H_3PO_4 , HCl , HF ve H_2SO_4 çözeltilerinde 12 hafta bekletilen geopolimer beton numunelerin SEM görüntüleri Şekil 4.47-50'de

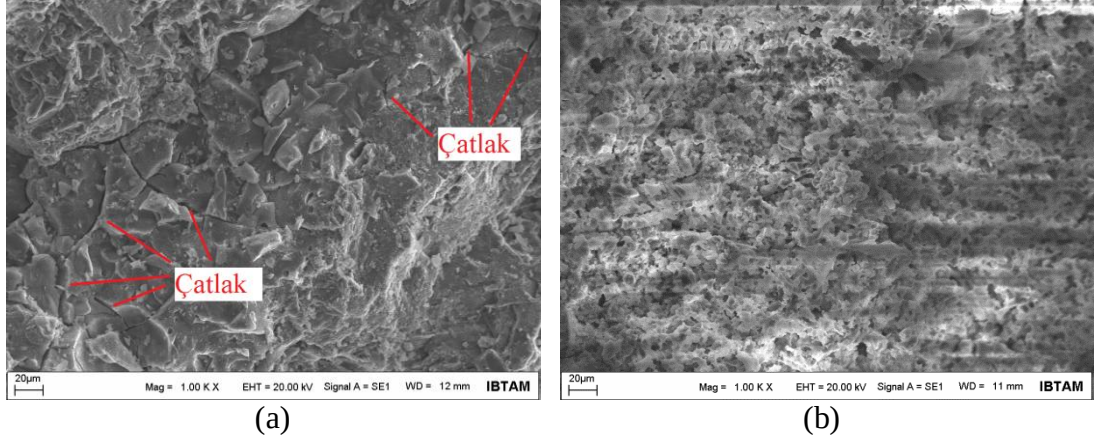
verilmiştir. Şekil 4.47’de %5 H_3PO_4 çözeltisindeki numunelerde geopolimer jel yapısının bozulduğu görülmektedir. Şekil 4.48’de %5 HCl çözeltisindeki hem E0 kodlu hem de E100 kodlu geopolimer beton numunelerde çatlaklar ve boşlukların var olduğu görülmektedir. Şekil 4.49’da %5 HF çözeltisindeki E0 kodlu geopolimer betonda büyük çatlaklar oluştuğu görülmektedir. E100 kodlu geopolimer de ise geopolimer jel yapısının bozulduğu ve numunenin içyapısında boşlukların meydana geldiği görülmektedir. Numunelerin içyapılarında çatlaklar bulunmakta ve bu çatlaklar nedeniyle numunelerin dayanıklılıkları azalmaktadır.



Şekil 4. 47. %5 H_3PO_4 çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin SEM görüntüleri; (a) E0, (b) E100

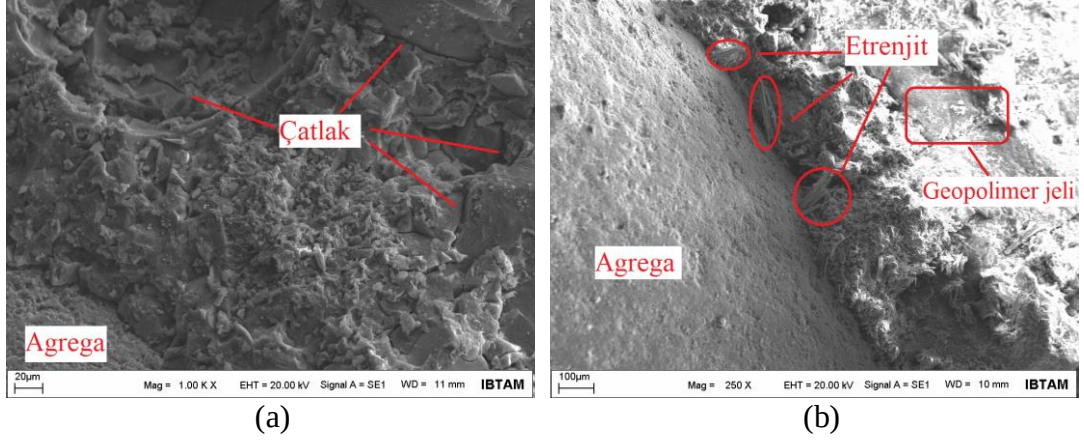


Şekil 4. 48. %5 HCl çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin SEM görüntüleri; (a) E0, (b) E100



Şekil 4. 49. %5 HF çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin SEM görüntüleri; (a) E0, (b) E100

Şekil 4.50’de %5 H_2SO_4 çözeltisindeki numunelerin SEM görüntülerinde hem E0 kodlu geopolimer betonda hem de E100 kodlu geopolimer betonda çatlaklar olduğu görülmüştür. Sülfürik asit saldırısı sonucunda numunelerin içyapılarında etrenjit oluşumuna rastlanmıştır. Kalsiyum hidratasyon ürünleri asit saldırılarına karşı daha hassaslardır ve eğer bol miktarda bulunursa harçların bozulmasına neden olmaktadır. Bozulma sonrasındaki yüksek SiO_2/Al_2O_3 oranı ve düşük Na_2O/Al_2O_3 oranının nedeni, sülfürik asit çözeltisindeki geopolimer yapılarından Na ve Al’nin süzülmesinden kaynaklanmaktadır (Sata vd., 2012). Güçlü bir asit saldırısı, geopolimerin doğrudan alüminosilikat yapısına saldırıya ve alüminatların yok olmasına neden olabilir. Bu saldırı Si-O-Al bağlarının bozulmasına, geopolimer içersindeki Si-OH ve Al-OH sayısının artmasına ve çözeltideki dimerlerin ve silisik asit iyonlarının artmasına neden olacaktır. Bu nedenle, bu süreç geopolimer malzemelerde kütle kaybına yol açmaktadır. Polimerdeki Si-O-Si ve Si-O-Al bağlarının kırılmasından dolayı, agresif ortamdaki alüminosilikat jelinin parçalanması sonucunda çatlakların oluşması muhtemeldir (Bakharev, 2005a).



Şekil 4. 50. %5 H_2SO_4 çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin SEM görüntüleri; (a) E0, (b) E100

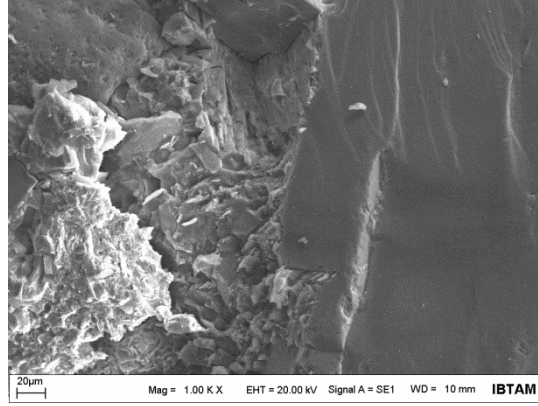
Bakharev (2005a), %5 H_2SO_4 çözeltisine 2 ay süresince maruz kalan UK esaslı geopolimerlerin çok gözenekli ve kırılgan hale geldiğini belirtmiştir. SEM gözlemlerinde sülfürik asit çözeltisine maruz kalan numunelerin matrislerinde yeni kristallerin oluştuğunu tespit etmiştir. Sülfürik aside maruz kalan geopolimerlerde Si/Al oranında artış olduğunu belirtmiştir. Sata vd., (2012) PÇ’li harçlarda düşük kalsiyum hidratasyon ürünlerinin, yüksek kalsiyum hidratasyon ürünlerine göre asit etkisine karşı daha dayanıklı olduğunu belirtmişlerdir.

Deb vd., (2016) UK esaslı geopolimer harcın %3 H_2SO_4 çözeltisine maruz kaldıktan sonra içyapısında gözeneklerin arttığını belirtmişlerdir. Nano silika içeren numunelerde, nano silika içermeyen numunelere göre daha az bozulma olduğu görülmüştür. Djobo vd., (2016) sülfürik asit saldırısı sonucunda geopolimer ağındaki Si-O-Al bağının bozulması nedeniyle 80 °C’de kür edilen geopolimer harcın iç yapısında mikro çatlaklar ve gözenekler oluştuğunu belirtmişlerdir. Mehta ve Siddique (2017), genellikle asit maruziyetine bağlı olarak dayanım kaybını, sülfürik asit ile kalsiyum arasındaki reaksiyona bağlamışlardır. Geopolimerik bağlayıcıların asit saldırısından daha az etkilenmesini, güçlü Al-O ve Si-O bağlarıyla ilişkilendirmişlerdir.

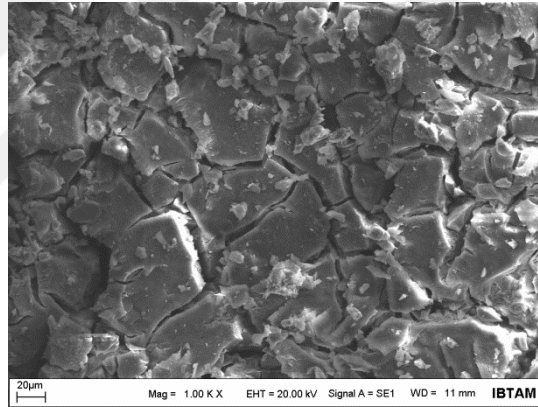
4.7.2. Tuz etkisindeki numunelerin içyapı analizleri

%5 konsantrasyonlu NaCl ve $MgCl_2$ çözeltisinde 12 hafta bekletilen geopolimer beton numunelerin SEM görüntüleri Şekil 4.51-52’de verilmiştir. %5 NaCl çözeltisindeki geopolimer betonların içyapısında çatlak, boşluk vb. oluşumlar

görülmemiştir. Ancak %5 $MgCl_2$ çözeltisindeki numunelerin içyapısında çatlaklar bulunmaktadır.



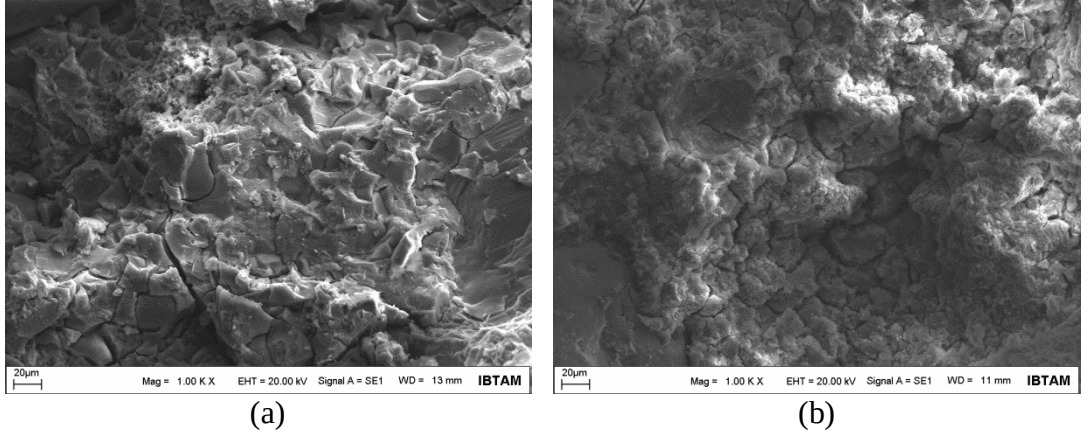
Şekil 4. 51. %5 NaCl çözeltisinde 12 hafta bekletilen E0 kodlu geopolimer betonun SEM görüntüsü



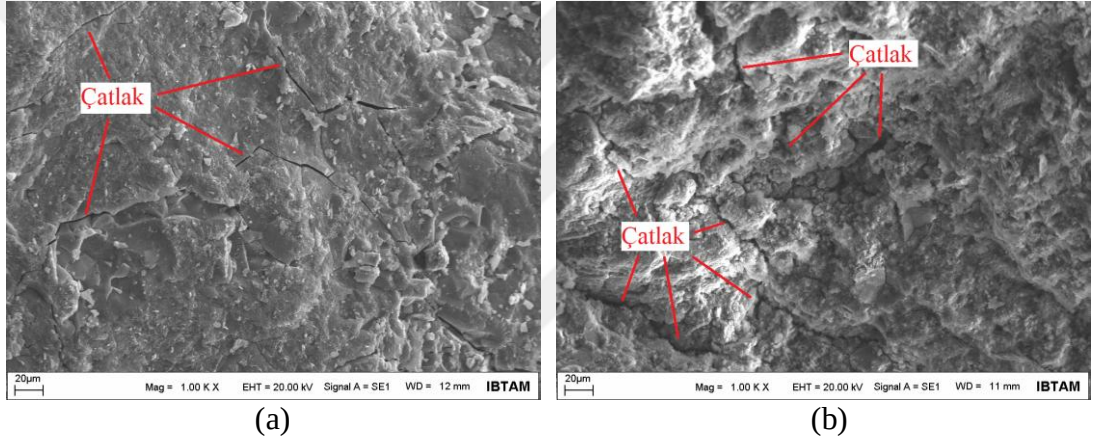
Şekil 4. 52. %5 $MgCl_2$ çözeltisinde 12 hafta bekletilen E0 kodlu geopolimer betonun SEM görüntüsü

4.7.3. Sülfat etkisindeki numunelerin içyapı analizleri

%5 konsantrasyonlu $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 çözeltilerinde 12 hafta bekletilen geopolimer beton numunelerin SEM görüntüleri Şekil 4.53-54’de verilmiştir. Hem %5 $MgSO_4$ hem de %5 Na_2SO_4 çözeltilerine maruz kalan geopolimer betonların SEM görüntülerinden görüldüğü üzere, sülfat etkisiyle numunelerin içyapılarında çatlakların olduğu gözlemlenmiştir. Bu çatlaklar geopolimer jelinin yapısını bozarak, dayanıklılıklarında kayıplara neden olmaktadır.



Şekil 4. 53. %5 $MgSO_4$ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin SEM görüntüleri; (a) E0, (b) E100



Şekil 4. 54. %5 Na_2SO_4 çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin SEM görüntüleri; (a) E0, (b) E100

Çözeltideki sülfat ve klorür iyonları geopolimer numunenin içerisine girdiğinde, geopolimer numunenin içyapısında çatlak ve yüksek oranda gözeneklilik oluşumuna neden olan genişleyen ürünler ve kristaller oluştururlar (Ren vd., 2017).

Bakharev (2005b), magnezyum sülfat çözeltisine maruz kalan NaOH ve KOH ile aktif edilen UK esaslı geopolimerin SEM incelemesinde derin dikey çatlaklar oluştuğunu belirtmiştir. Bu çatlakların da geopolimerin dayanımında azalmaya neden olduğunu belirtmiştir. Çözeltideki sülfat ve klorür iyonları geopolimer numunenin içerisine girdiğinde, geopolimer numunenin içyapısında çatlak ve yüksek oranda gözeneklilik oluşumuna neden olan genişleyen ürünler ve kristaller oluştuğunu belirtmiştir. Ismail vd., (2013b) sülfat atağı ilerledikçe, genellikle C-(A)-S-H yapısının kireçsizleştiğini ve bu nedenle Ca/Si molar oranının azaldığını

belirtmişlerdir. MgSO_4 çözeltisine maruz kalan geopolimerin Ca/Si oranının yaklaşık olarak 0.2 olduğunu, Na_2SO_4 çözeltisine maruz kalan geopolimerin Ca/Si oranının ise yaklaşık olarak 0.5 olduğunu belirtmişlerdir.

Singh ve Siddique (2014) yaptıkları çalışmada 180 gün %10 MgSO_4 çözeltisine maruz kalan betonların SEM görüntülerinde alçıtaşı ve monosülfat yapılarının olmadığını belirtmişlerdir. Tüm SEM görüntülerinde yoğun ve eşit şekilde yayılmış kalsiyum silikat hidrat jellerinin var olduğunu belirtmişlerdir.



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada asit, tuz ve sülfat etkilerine maruz kalan EFC ve YFC kullanılarak üretilen geopolimer betonların basınç dayanımları, UPV'leri, ağırlık ve boy değişimleri belirlenmiş ve görsel değişimleri ile 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, kür sürelerini tamamlayan numunelerin 12 hafta sonundaki basınç dayanımları incelendiğinde en düşük basınç dayanımı 18.38 MPa ile E100 karışımında, en yüksek basınç dayanımı ise 72.45 MPa ile E0 karışımında elde edilmiştir ve karışımdaki YFC oranı arttıkça basınç dayanımı da artmıştır.
2. Üretilen numunelere en fazla etkiyi asit çözeltileri yaparken en az etkiyi tuz çözeltileri yapmıştır. Basınç dayanımları açısından en fazla etkiyi sırasıyla H_2SO_4 , HF, HCl, H_3PO_4 , Na_2SO_4 , $MgSO_4$, $MgCl_2$ ve NaCl çözeltileri yapmıştır. Çözeltilere maruz kalan numunelerin 12 hafta sonundaki basınç dayanımlarındaki azalma oranları; H_2SO_4 çözeltisi için %72 ile %100 arasında, HF çözeltisi için %65 ile %100 arasında, HCl çözeltisi için %24 ile %69 arasında, H_3PO_4 çözeltisi için %14 ile %44 arasında, Na_2SO_4 çözeltisi için %7.4 ile %21.6 arasında, $MgSO_4$ çözeltisi için %3.2 ile %16.4 arasında, $MgCl_2$ çözeltisi için %3.59 ile %4.67 arasında, NaCl çözeltisi için %2.67 ile %3.59 arasındadır.
3. Çözeltilere maruz kalan geopolimer betonların UPV değerlerindeki azalma oranlarına göre en fazla etkiyi sırasıyla H_2SO_4 , HCl, H_3PO_4 , Na_2SO_4 , $MgSO_4$, $MgCl_2$ ve NaCl çözeltileri yapmıştır. HF çözeltisindeki numunelerin UPV ölçümleri yapılamadığı için bu sıralamaya dahil edilememiştir.
4. Asit çözeltilerine maruz kalan numunelerin hepsinde ağırlık kaybı olmuştur. H_3PO_4 çözeltisindeki numunelerde, diğer asit çözeltilerindeki numunelere göre daha az ağırlık kaybı olmuştur. Tuz çözeltilerine maruz kalan numunelerde; NaCl çözeltisindeki numunelerde ağırlık artışı olurken, $MgCl_2$ çözeltisindeki numunelerde ise ağırlık kaybı olmuştur. Sülfat çözeltilerine maruz kalan numunelerde ağırlık artışı meydana gelmiştir.

5. Asit çözeltilerine maruz kalan numunelerin boy değişimleri incelendiğinde; genel olarak HCl ve H₃PO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerde büzülme, HF ve H₂SO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerde genleşme görülmüştür. Tuz çözeltisine maruz kalan numunelerin boy değişimleri incelendiğinde; NaCl ve MgCl₂ çözeltilerinde bekletilen numunelerde büzülme olmuştur. Sülfat çözeltisine maruz kalan numunelerin boy değişimleri incelendiğinde; MgSO₄ ve Na₂SO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerde genleşme meydana gelmiştir.
6. Tuz ve sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerde görsel anlamda herhangi bir bozulma görülmemiştir. Asit çözeltilerinde ise, H₃PO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin yüzeylerinde bozulmalar oluşmuştur, HF ve H₂SO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin yüzeylerinde çatlaklar ve bozulmalar meydana gelmiştir. HCl çözeltisindeki numunelerde çatlak oluşmazken numunelerin rengi asit etkisiyle koyulaşmıştır. Asit çözeltilerine maruz kalan geopolimer beton numunelerinde EFC miktarı arttıkça numunelerin yüzeylerinde meydana gelen yumuşamaların ve bozulmaların azaldığı görülmüştür ve bu nedenle asit etkilerine karşı görsel olarak EFC'nin YFC'ye göre daha dirençli olduğu düşünülmektedir.
7. Geopolimer betonların SEM görüntüleri incelendiğinde; asit ve sülfat etkisiyle numunelerin içyapılarında çatlakların oluştuğu ve geopolimer jellerinde bozulmalar olduğu görülmüştür. %5 H₂SO₄ etkisine maruz kalan geopolimer betonların içyapılarında, iğne şeklinde olan etrenjit oluşumu belirgin bir şekilde görülmektedir. Tuz etkisine maruz kalan geopolimer numunelerde; %5 NaCl çözeltisindeki numunelerin içyapısında bozulma olmamıştır, %5 MgCl₂ çözeltisindeki numunelerin içyapılarında ise çatlaklar meydana gelmiştir.

Bu çalışmada uygulanan yöntemler ve elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında, geopolimer betonların kimyasal etkilere karşı dayanıklılığını araştırmak ve durabilitesini arttırabilmek için farklı yöntemler önerilebilir. Silis modülü, s/b oranı, Na₂O içeriği, alkali türü ve miktarları, mineral ve kimyasal katkı maddeleri ve kür koşulları değiştirilerek üretilen geopolimer betonların dayanıklılıkları karşılaştırılabilir. Kimyasal çözeltilerin farklı konsantrasyonlarında geopolimer numunelerin nasıl etkilendiği araştırılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abdul Aleem, M.I., Arumairaj, P.D. (2012). Geopolymer concrete – a review. *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, Volume: **1**, Issue: 2, 118-122.
- Acharya, P.K., Patro, S.K. (2015). Effect of lime and ferrochrome ash (FA) as partial replacement of cement on strength, ultrasonic pulse velocity and permeability of concrete. *Construction and Building Materials*, **94**, 448-457.
- Acharya, P.K., Patro, S.K. (2016). Acid resistance, sulphate resistance and strength properties of concrete containing ferrochrome ash (FA) and lime. *Construction and Building Materials*, **120**, 241-250.
- Açıkgöz A. (2015). *Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü betonların hidratasyon sıcaklığının araştırılması*. Yüksek lisans tezi, Niğde Üniversitesi, Niğde.
- Adesanya, D.A., Raheem, A.A. (2010). A study of the permeability and acid attack of corn cob ash blended cements. *Construction and Building Materials*, **24**, 403-409.
- Al-Akhras, N.M. (2006). Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, **36**, 1727-1734.
- Albitar, M., Mohamed Ali, M.S., Visintin, P., Drechsler, M. (2017). Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes. *Construction and Building Materials*, **136**, 374-385.
- Almusallam, A.A., Khan, F.M., Dulaijan, S.U., Al-Amoudi, O.S.B. (2003). Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability. *Cement & Concrete Composites*, **25**, 473-481.
- Al-Otaibi, S. (2008). Durability of concrete incorporating GGBS activated by water-glass. *Construction and Building Materials*, **22**, 2059-2067.
- Ariffin, M.A.M., Bhutta, M.A.R., Hussin, M.W., Tahir, M.M., Aziah, N. (2013). Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, **43**, 80-86.
- ASTM C267 (2001). *Standard test methods for chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacings and polymer concretes*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C39/C39M (1999). *Standart test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

- ASTM C597 (2002). *Standart test method for pulse velocity through concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Aydin, S., Ersundu, E., Yücel, O. (2007). Ferroalloy production and consumption in Türkiye (pp:51-59). *Infacon XI International Ferroalloys Congress*, February 18-21, Taj Place, New Delhi, India.
- Bakharev, T. (2005a). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research*, **35**, 658-670.
- Bakharev, T. (2005b). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*, **35**, 1233-1246.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H. (2002). *Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, 282 s.
- Bernal, S.A., Mejía de Gutiérrez, R., Pedraza, A.L., Provis, J.L. (2011). Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes. *Cement and Concrete Research*, **41**, 1-8.
- Bilim, C., Karahan, O., Atiş, C.D., İlkentapar, S. (2013). Influence of admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars subjected to different curing conditions. *Materials and Design*, **44**, 540-547.
- Bondar, D. (2013). Geo-polymer concrete as a new type of sustainable construction materials. *Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, August 18-21, Kyoto Research Park, Kyoto, Japan.
- Bulatović, V., Melešev, M., Radeka, M., Radonjanin, V., Lukić, I. (2017). Evaluation of sulfate resistance of concrete with recycled and natural aggregates. *Construction and Building Materials*, **152**, 614-631.
- Chang, Z.T., Song X.J., Munn, R., Marosszeky, M. (2005). Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulphuric acid attack. *Cement and Concrete Research*, **35**, 1486-1494.
- Chen, X., Zhu, G., Zhou, M., Wang, J., Chen, Q. (2018). Effect of organic polymers on the properties of slag-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, **167**, 216-224.
- Chi, M. (2012). Effects of dosage of alkali-activated solution and curing conditions on the properties and durability of alkali-activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, **35**, 240-245.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, **37**, 1633-1656.

- De Silva, P., Sagoe-Crenstil, K., Sirivivatnanon, V. (2007). Kinetics of geopolymerization: Role of Al_2O_3 and SiO_2 . *Cement and Concrete Research*, **37**, 512-518.
- De Vargas, A.S., Dal Molin, D.C.C., Vilela, A.C.F., da Silva, F.J., Pavão, B., Veit, H. (2011). The effects of $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers. *Cement & Concrete Composites*, **33**, 653-660.
- Deb, P.S., Sarker, P.K., Barbhuiya, S. (2016). Sorptivity and acid resistance of ambient-cured geopolymer mortars containing nano-silica. *Cement and Concrete Composites*, **72**, 235-245.
- Dehwah, H.A.F. (2007). Effect of sulfate concentration and associated cation type on concrete deterioration and morphological changes in cement hydrates. *Construction and Building Materials*, **21**, 29-39.
- Djobo, J.N.Y., Elimbi, A., Tchakouté, H.K., Kumar, S. (2016). Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, **124**, 606-614.
- Dursun Ç. (2013). *Farklı tip biyopolimerlerin çimento harcı mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi*. Yüksek lisans tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa.
- Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., van Deventer, J.S.J. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. *Cement and Concrete Research*, **37**, 1590-1597.
- Erdoğan, T.S., Erdoğan, T.Y. (2007). Puzolanik mineral katkılar ve tarihi geçmişleri (s: 263-275). 2. *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, 12-13 Nisan, Ankara.
- Erdoğan, T.Y. (2003). *Beton*. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara, 741 s.
- Ganesan, N., Abraham, R., Raj, S.D. (2015). Durability characteristics of steel fibre reinforced geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, **93**, 471-476.
- Ghrici, M., Kenai, S., Said-Mansour, M. (2007). Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement & Concrete Composites*, **29**, 542-549.
- Goyal, S., Kumar, M., Sidhu, D.S., Bhattacharjee, B. (2009). Resistance of mineral admixture concrete to acid attack. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol: 7, No: 2, 273-283.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., Rangan, B.V. (2004). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal*, **101**(6), 467-472.

- 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.
- Irassar, E.F., Di Maio, A., Batic, O.R. (1996). Sulfate attack on concrete with mineral admixtures. *Cement and Concrete Research*, **26**(1), 113-123.
- Ismail, I., Bernal, S.A., Provis, J.L., Hamdan, S., van Deventer, J.S.J. (2013b). Microstructural changes in alkali activated fly ash/slag geopolymers with sulfate exposure. *Materials and Structures*, **46**, 361-373.
- Ismail, I., Bernal, S.A., Provis, J.L., San Nicolas, R., Brice, D.G., Kilcullen, A.R., Hamdan, S., van Deventer, J.S.J. (2013a). Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes. *Construction and Building Materials*, **48**, 1187-1201.
- Jang, J.G., Lee, N.K., Lee, H.K. (2014). Fresh and hardened properties of alkali-activated fly ash/slag pastes with superplasticizers. *Construction and Building Materials*, **50**, 169-176.
- Juenger, M.C.G., Winnefeld, F., Provis, J.L., Ideker, J.H. (2011). Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, **41**, 1232-1243.
- Kantarcı F. (2013). *Elazığ ferrokrom cürufundan alkali aktivasyon metoduyla üretilen geopolimer çimentolu betonların yangın dayanımının araştırılması*. Yüksek lisans tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Karakoç, M.B., Türkmen, İ., Maraş, M.M., Kantarcı, F., Demirboğa, R., Toprak, M.U. (2014). Mechanical properties and setting time of ferrochrome slag based geopolymer paste and mortar. *Construction and Building Materials*, **72**, 283-292.
- Karakoç, M.B., Türkmen, İ., Maraş, M.M., Kantarcı, F., Demirboğa, R. (2016). Sulfate resistance of ferrochrome slag based geopolymer concrete. *Ceramics International*, **42**, 1254-1260.
- Khan, M.S.H., Kayali, O., Troitzsch, U. (2017). Effect of NaOH activation on sulphate resistance of GGBFS and binary blend pastes. *Cement and Concrete Composites*, **81**, 49-58.
- Kwasny, J., Aiken, T.A., Soutsos, M.N., McIntosh, J.A., Cleland, D.J. (2018). Sulfate and acid resistance of lithomarge-based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, **166**, 537-553.
- Lee, N.K., Lee, H.K. (2016). Influence of the slag content on the chloride and sulfuric acid resistances of alkali-activated fly ash/slag paste. *Cement and Concrete Composites*, **72**, 168-179.

- Li, Z., Ding, Z., Zhang, Y. (2004). Development of sustainable cementitious materials (pp: 55-76). *Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, May 20-21, Beijing, China.
- Lloyd, N.A., Rangan, B.V. (2010). Geopolymer concrete with fly ash. *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Università Politecnica delle Marche, June 28-30, Ancona, Italy.
- Mahmut O. (2015). *Geopolimer harç üretiminde Elazığ ferrokrom cürufu kullanımının incelenmesi*. Yüksek lisans tezi, Düzce Üniversitesi, Düzce.
- Mehta, A., Siddique, R. (2017). Sulfuric acid resistance of fly ash based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, **146**, 136-143.
- Mingyu, H., Xiaomin, Z., Fumei, L. (2009). Alkali-activated fly ash-based geopolymers with zeolite or bentonite as additives. *Cement & Concrete Composites*, **31**, 762-768.
- Monteny, J., De Belie, N., Vincke, E., Verstraete, W., Taerwe, L. (2001). Chemical and microbiological tests to simulate sulfuric acid corrosion of polymer-modified concrete. *Cement and Concrete Research*, **31**, 1359-1365.
- Muhammad, B., Ismail, M. (2012). Performance of natural rubber latex modified concrete in acidic and sulfated environments. *Construction and Building Materials*, **31**, 129-134.
- Mutlugeldi C. (2015). *Elektrik ark fırını cürufunun karayolu esnek üstyapı bitümlü temel tabakasında agrega olarak değerlendirilmesi*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Nadoushan, M.J., Ramezaniapour, A.A. (2016). The effect of type and concentration of activators on flowability and compressive strength of natural pozzolan and slag-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, **111**, 337-347.
- Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., Shekarchi, M. (2012). An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Construction and Building Materials*, **35**, 1023-1033.
- Nguyen, A.D., Škvára, F. (2016). The influence of ambient pH on fly ash-based geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, **72**, 275-283.
- 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.

- Nuaklong, P., Sata, V., Chindaprasirt, P. (2018). Properties of metakaolin-high calcium fly ash geopolymer concrete containing recycled aggregate from crushed concrete specimens. *Construction and Building Materials*, **161**, 365-373.
- Onuaguluchi, O., Eren, Ö. (2012). Recycling of copper tailings as an additive in cement mortars. *Construction and Building Materials*, **37**, 723-727.
- Panda, C.R., Mishra, K.K., Panda, K.C., Nayak, B.D., Nayak, B.B. (2013). Environmental and technical assessment of ferrochrome slag as concrete aggregate material. *Construction and Building Materials*, **49**, 262-271.
- Parthiban, K., Mohan, K.S.R. (2017). Influence of recycled concrete aggregates on the engineering and durability properties of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, **133**, 65-72.
- Peiwei, G., Min, D., Naiqian, F. (2001). The influence of superplasticizer and superfine mineral powder on the flexibility, strength and durability of HPC. *Cement and Concrete Research*, **31**, 703-706.
- Ramyar, K., İnan, G. (2007). Sodium sulfate attack on plain and blended cements. *Building and Environment*, **42**, 1368-1372.
- Rashad, A.M., Zeedan, S.R., Hassan, A.A. (2016). Influence of the activator concentration of sodium silicate on the thermal properties of alkali-activated slag pastes. *Construction and Building Materials*, **102**, 811-820.
- Rashidian-Dezfouli, H., Rangaraju, P.R. (2017). A comparative study on the durability of geopolymers produced with ground glass fiber, fly ash, and glass-powder in sodium sulfate solution. *Construction and Building Materials*, **153**, 996-1009.
- Ren, D., Yan, C., Duan, P., Zhang, Z., Li, L., Yan, Z. (2017). Durability performances of wollastonite, tremolite and basalt fiber-reinforced metakaolin geopolymer composites under sulfate and chloride attack. *Construction and Building Materials*, **134**, 56-66.
- Reuter, M., Xiao, Y., Boin, U. (2004). Recycling and environmental issues of metallurgical slags and salt fluxes (pp:349-356). *VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts*, The South African Institute of Mining and Metallurgy, January 25-28, Cape Town, South Africa.
- Rostami, M., Behfarnia, K. (2017). The effect of silica fume on durability of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, **134**, 262-268.
- Roy, D.M., Arjunan, P., Silsbee, M.R. (2001). Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete. *Cement and Concrete Research*, **31**, 1809-1813.

- Sata, V., Sathonsaowaphak, A., Chindaprasirt, P. (2012). Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack. *Cement & Concrete Composites*, **34**, 700-708.
- Sathia, R., Babu, K.G., Santhanam, M. (2008). Durability study of low calcium fly ash geopolymer concrete (pp:1153-1159). *The 3rd ACF International Conference-ACF/VCA 2008*, November 11-13, Vietnam.
- Shi, C., Jiménez, A.F., Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, **41**, 750-763.
- Shoaei M. (2013). *Hafif betonda tuz etkisi (MgCl₂, NaCl)*. Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Siad, H., Lachemi, M., Sahmaran, M., Hossain, K.M.A. (2016). Effect of glass powder on sulfuric acid resistance of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, **113**, 163-173.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., Bhattacharyya, S.K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials*, **85**, 78-90.
- Singh, M., Siddique, R. (2014). Compressive strength, drying shrinkage and chemical resistance of concrete incorporating coal bottom ash as partial or total replacement of sand. *Construction and Building Materials*, **68**, 39-48.
- Singh, N., Vyas, S., Pathak, R.P., Sharma, P., Mahure, N.V., Gupta, S.L. (2013). Effect of aggressive chemical environment on durability of green geopolymer concrete. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, **3**(4), 277-284.
- Suhendro, B. (2014). Toward green concrete for better sustainable environment. *Procedia Engineering*, **95**, 305-320.
- Suleiman A.R. (2014). Physical sulphate attack on concrete. Yüksek lisans tezi, Western University, London.
- Şimşek, O. (2010). *Beton Bileşenleri ve Beton Deneyleri*. Seçkin Yayıncılık A.Ş., Ankara, 384 s.
- Taşgın Y. (2014). *Mermer, ferrokrom cürufu ve cam atıklarının asfalt beton kaplamalarında filler olarak kullanılabilirliğinin araştırılması*. Yüksek lisans tezi, Tunceli Üniversitesi, Tunceli.
- Thokchom, S., Ghosh, P., Ghosh, S. (2009). Effect of Na₂O content on durability of geopolymer mortars in sulphuric acid. *International Journal of Chemical and Biological Engineering*, **2**:1, 20-25.

- Thomas, B.S., Gupta, R.C., Mehra, P., Kumar, S. (2015). Performance of high strength rubberized concrete in aggressive environment. *Construction and Building Materials*, **83**, 320-326.
- Tokyay, M., Erdoğan, K. (2009). *Cürufklar ve cürufllu çimentolar*. TÇMB / AR-GE Enstitüsü, Ankara, 48 s.
- Topçu, İ.B., Canbaz, M. (2008). Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu harçlarda donma çözülme. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt: **21**, Sayı: 2, 1-16.
- Tosun, K., Felekoğlu, B., Baradan, B., Altun, İ.A. (2009). Portland kalkerli çimento bölüm II – sülfat dayanıklılığı, *İMO teknik dergi*, 310, 4737-4757.
- 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.
- Ustabaş İ. (2008). *Sülfat etkisine maruz mineral katkı beton ve harçların performansının incelenmesi*. Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Van Deventer, J.S.J., Provis, J.L., Duxson, P. (2012). Technical and commercial progress in the adoption of geopolymers. *Minerals Engineering*, **29**, 89-104.
- Vapur, H., Top, S., Teymen, A., Türkmenoğlu, M. (2013). Elazığ ferrokrom tesisi cürufklarının agrega özelliklerinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **28**(1), 77-88.
- Wang, D., Zhou, X., Meng, Y., Chen, Z. (2017). Durability of concrete containing fly ash and silica fume against combined freezing-thawing and sulfate attack. *Construction and Building Materials*, **147**, 398-406.

- Wei, B., Zhang, Y., Bao, S. (2017). Preparation of geopolymers from vanadium tailings by mechanical activation. *Construction and Building Materials*, **145**, 236-242.
- Yalçın, H., Gürü, M. (2006). *Çimento ve Beton*. Palme Yayıncılık, Ankara, 406 s.
- Yıldırım A.N. (2007). *Pomza ve uçucu kül kullanılarak imal edilen hafif betonların agresif su ortamlarında mekanik özelliklerinin araştırılması*. Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Yıldız K. (2009). *Pomza ve zeolit katkılı yüksek dayanımlı betonların asit ve tuz etkilerine karşı dayanıklılığının araştırılması*. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Yılmaz A. (2002). *Antalya Ferrokrom İşletmesi'nin elektrik-ark fırını cürufklarının ve baca tozu atıklarının asfalt betonunda kullanılabilirliğinin araştırılması*. Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya.
- Yılmaz, A., Süttaş, İ. (2008). Ferrokrom cürufunun yol temel malzemesi olarak kullanımı. *İMO Teknik Dergi*, **294**, 4455-4470.
- Yuan, X.H., Chen, W., Lu, Z.A., Chen, H. (2014). Shrinkage compensation of alkali-activated slag concrete and microstructural analysis. *Construction and Building Materials*, **66**, 422-428.
- Yusuf, M.O. (2015). Performance of slag blended alkaline activated palm oil fuel ash mortar in sulfate environments. *Construction and Building Materials*, **98**, 417-424.
- Zhang, S., Liu, L., Tan, K., Zhang, L., Tang, K. (2015). Influence of burning temperature and cooling methods on strength of high carbon ferrochrome slag lightweight aggregate. *Construction and Building Materials*, **93**, 1180-1187.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Ahmet ÖZCAN

Doğum Yeri ve Tarihi: Malatya - 01.04.1994

Adres: Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Evliya Çelebi Yerleşkesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Tavşanlı Yolu 10. km 43100 Merkez / KÜTAHYA

E-Posta: ahmet.ozcan1@dpu.edu.tr

Lisans: Fırat Üniversitesi

Mesleki Deneyim ve Ödüller: Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi (2018, devam ediyor)