

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK FIRIN CÜRUF BAĞLAYICILI GEOPOLİMER BETONUN
SÜLFAT DAYANIKLILIĞINA CAM TOZUNUN ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
EŞREF AZİM

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

AĞUSTOS 2024

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK FIRIN CÜRUF BAĞLAYICILI GEOPOLİMER BETONUN
SÜLFAT DAYANIKLILIĞINA CAM TOZUNUN ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EŞREF AZİM

36203621086

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

AĞUSTOS 2024

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

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

Çalışmalarımnda ayrıca yardımcı olan Sayın İnşaat Mühendisi Ömer Safa GÜR ve İnşaat Mühendisi Sayın Erkay KUTLUSOY'a,

Hayatımın her evresinde olduğu gibi bu çalışmam süresince de benden her türlü desteklerini esirgemeyen ve aldığım her kararda yanımda olan aileme; bu çalışmayı ithafen yazdığım annem Majan AZEMİ, babam Mohammed Azim AZEMİ eşim Malalay AZİM ve kız kardeşim Hemşire Aay Jan AZEMİ'e teşekkür ederim.

EŞREF AZİM

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum " Yüksek Fırın Cüruf Bağlayıcılı Geopolimer Betonun Sülfat Dayanıklılığına Cam Tozunun Etkisi" başlıklı çalışmanın tamamen tarafımdan yazıldığını ve bilimsel ahlak ve geleneklere uygun olarak yürütüldüğünü onaylarım. Tez çalışmamda yer alan tüm bilgiler, kaynak gösterme kurallarına uygun olarak hem metin içinde hem de kaynak bölümünde belirtilen referanslardan derlenmiştir. Bu açıklamayı onurumla doğruluyorum.

EŞREF AZİM



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1.GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	2
2.1 Geopolimer	2
2.1.1 Geopolimerleşme	3
2.1.2 Kaynak malzemeler.....	3
2.1.3 Sınıflandırma.....	4
2.1.4 Alkali çözeltiler.....	4
2.1.5 Geopolimer betonun özellikleri.....	4
2.1.5.1 Kütleme	5
2.1.5.2 Alkali çözelti türü	5
2.1.6. Üretim süreci.....	5
2.1.7 Geopolimer betonun uygulamaları.....	5
2.1.8 Geopolimer betonun ekonomik faydaları.....	6
2.1.9 Lif takviyeli beton	6
2.1.10 Nano-silika bazlı beton.....	7
2.2 Yüksek Fırın Cürufu	7
2.2.1. Cüruf özellikleri	9
2.2.1.1. Soğutma süreci	9
2.2.1.2 Bazililik oranı	10
2.2.1.3 Ötektik nokta	10
2.2.1.4 YFC'nin mikroyapısı	10
2.2.1.5 Enerji verimliliği	12
2.2.1.6 Viskozite.....	12

2.2.1.7 Erime noktası.....	13
2.2.1.8 Isı değişimi	13
2.2.2 Cüruf bileşimi ve son Kullanımı	13
2.2.2.1 Beton ve çimentolu ürünler	13
2.3 Cam Tozu.....	15
2.3.1. Camın fiziksel yapısı ve özellikleri.....	17
2.3.2. Camın kimyasal yapısı ve özellikleri	18
2.3.3. Camın mekanik yapısı ve özellikleri.....	19
2.4 Beton üzerinde klasik sülfat saldırısı ve etkileri	19
2.4.1 Sülfat saldırısı.....	21
3. MATERYAL ve YÖNTEM	26
3.1 Materyal.....	26
3.1.1 Yüksek fırın cürufu	26
3.1.2 Agregas	27
3.1.3 Cam tozu	27
3.1.4 Aktivatör.....	28
3.1.5 Sülfatlar	28
3.1.6 Aletler.....	29
3.1.6.1 Çelik kalıplar	29
3.1.6.2 Beton karışım mikseri.....	30
3.1.6.3 Hassas terazi	30
3.1.6.4.Etöv.....	31
3.1.6.5 Basınç dayanım cihazı	31
3.1.6.6 Eğilme dayanım cihazı	32
3.1.6.7 pH metre	32
3.2 Yöntem.....	33
3.2.1 Geopolimer beton karışım seçeneklerinin belirlenmesi	33
3.2.2 Geopolimer beton üretimi, numunelerin yerine konması ve kür edilmesi.....	34
3.2.3 Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler.....	35
3.2.4.1 Basınç dayanımı	35
3.2.4.2.Eğilme dayanımı.....	35
3.2.4.3 Kılcal geçirimsizlik deneyi	36
3.2.4.4. Ağırlık değişimi.....	37

3.2.4.5 Sülfat etkisi	37
4.1 Sertleşmiş Beton Deneyleri İle İlgili Bulgular Ve Tartışma.....	38
4.1.1 Kontrol numuneleri basınç dayanımları	38
4.1.2 Geopolimer beton kontrol numunelerinin eğilme dayanımı	40
4.1.3 Geopolimer beton kontrol numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısı.....	41
4.1.4 Kontrol numunelerin görsel incelemeleri.....	42
4.2 Sülfat Etkisine Maruz Kalan Geopolimer Beton Numuneleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma	44
4.2.1 Sülfat etkisindeki numunelerin basınç dayanımları	44
4.2.2 Sülfat etkisindeki numunelerin eğilme dayanımları.....	47
4.2.3 Sülfat etkisindeki numunelerin kılcal geçirimliliği	49
4.2.4 Sülfat etkisindeki numunelerin ağırlık değişimleri	55
4.2.5 Sülfat çözeltilerinin pH değerlerindeki değişim.....	57
4.2.6. Sülfat etkisindeki numunelerin görsel incelemeleri	59
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	62
KAYNAKLAR.....	64
ÖZGEÇMİŞ	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1: Potansiyel cüruf yan ürünleri ve kullanımları.....	9
Çizelge 2.2: Camlardaki oksit oranları (% ağırlıkça)	18
Çizelge 3.1: Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi.....	26
Çizelge 3.2: Cam tozunun kimyasal bileşimi.....	27
Çizelge 3.3: Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri	28
Çizelge 3.4: Geopolimer beton kodları	33
Çizelge 3.5: Karışımda kullanılan malzeme miktarları.....	33
Çizelge 4.1: Kontrol numuneleri basınç ve eğilme dayanımı	38
Çizelge 4.2: Geopolimer beton kontrol numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısı değerleri	41
Çizelge 4.3: Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri, MPa	45
Çizelge 4.4: Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin eğilme dayanım değerleri, MPa	48
Çizelge 4.5: %3 Na ₂ SO ₄ çözeltilisinde bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısı değerleri.....	50
Çizelge 4.6: %3 MgSO ₄ çözeltilisinde bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısı değerleri.....	51
Çizelge 4.7: Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri.....	55
Çizelge 4.8: %3 Na ₂ SO ₄ ve %3 MgSO ₄ çözeltilerinin pH değerleri değişimi	57

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Yüksek fırın cürufunun üretim süreci (Engin, 2015).....	8
Şekil 2.2: Melilit, gehlenit ve akermanitin birleşimidir. Kırmızı eğri sıvı ilişkisini, mavi eğri ise katılar içindir (Mendybaev vd. 2006).	11
Şekil 2.3: Cam tozu.....	17
Şekil 2.4: Sülfat etkisine maruz kalmış yapı elemanları.....	20
Şekil 2.5: Klasik sülfat etkisinin şematik olarak gruplandırılması	21
Şekil 3.1: Yüksek fırın cürufu.....	26
Şekil 3.4: Cam tozu.....	28
Şekil 3.5: Deneylerde kullanılan sülfatlar	29
Şekil 3.6: Çelik kalıplar	29
Şekil 3.7: Beton mikseri.....	30
Şekil 3.8: Hassas terazi	30
Şekil 3.9: Etüv cihazı	31
Şekil 3.10: Basınç dayanım cihazı	31
Şekil 3.11: Eğilme dayanımı cihazı	32
Şekil 3.12: pH metre	32
Şekil 3.13: Kalıplara yerleştirilmiş geopolimer beton numuneler	34
Şekil 3.14: Kılcal geçirimlilik düzeneğindeki numuneler	36
Şekil 3.15: Sülfat çözeltilerinin içinde bekletilen numuneler	37
Şekil 4.1: 28 günlük geopolimer beton numunelerin basınç dayanım değerleri.....	38
Şekil 4.2: Geopolimer beton numunelerin eğilme dayanımları	40
Şekil 4.3: Geopolimer beton kontrol numunelerin zamana bağlı kılcal geçirimlilik katsayı değerleri.....	42
Şekil 4.4: Küp şeklindeki kontrol numunelerin 12 hafta sonundaki görünüşleri	43
Şekil 4.5: %3 Na ₂ SO ₄ çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri	45
Şekil 4.6: %3 MgSO ₄ çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri	46
Şekil 4.7: %3 MgSO ₄ çözeltisindeki numunelerin eğilme dayanım değerleri.....	48
Şekil 4.8: %3 Na ₂ SO ₄ çözeltisindeki numunelerin eğilme dayanım değerleri	49
Şekil 4.9 : %3 MgSO ₄ çözeltisinde 4 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.....	51
Şekil 4.10 : %3 MgSO ₄ çözeltisinde 8 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.....	52

Şekil 4.11 : %3 MgSO_4 çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimsilik katsayısındaki değişim.....	52
Şekil 4.12 : %3 Na_2SO_4 çözeltisinde 4 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimsilik katsayısındaki değişim.....	53
Şekil 4.13 : %3 Na_2SO_4 çözeltisinde 8 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimsilik katsayısındaki değişim.....	53
Şekil 4.14 : %3 Na_2SO_4 çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimsilik katsayısındaki değişim.....	54
Şekil 4.15: %3 MgSO_4 çözeltisinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri.....	55
Şekil 4.16: %3 Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri	56
Şekil 4.17: %3 Na_2SO_4 ve %3 MgSO_4 çözeltilerinin pH değerleri değişimi	58
Şekil 4.18: %3 MgSO_4 çözeltisinde 12 hafta bekletilen küp ve prizma numunelerin görünüşleri	60
Şekil 4.19: %3 Na_2SO_4 çözeltisinde 12 hafta bekletilen küp ve prizma numunelerin görünüşleri	60

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Ca(OH)₂	: Kalsiyum Hidroksit
Ca₂SiO₄	: Kalsiyum Silikat
CaO	: Kalsiyum Oksit
CO₂	: Karbondioksit
ÇC	: Çelik Cürufu
ÇDKN	: Çok Duyarlı Karbon Nanotüp
DK	: Dip Külü
Fe₂O₃	: Demir Oksit
FESEM	: Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
H₂O	: Su
K₂O	: Potasyum Oksit
KOH	: Potasyum Hidroksit
Mg(OH)₂	: Magnezyum Hidroksit
MgCl₂	: Magnezyum Klorür
MgO	: Magnezyum Oksit
MK	: Metakaolin
Na₂O	: Sodyum Oksit
Na₂SiO₃	: Sodyum Silikat
NaOH	: Sodyum Hidroksit
NMR	: Nükleer Manyetik Rezonans
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SiO₂	: Silisyum Dioksit
SO₂	: Kükürt Dioksit
TiO₂	: Titanyum Dioksit
UK	: Uçucu Kül
XRD	: X Işını Kırınımı Yöntemi
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
YKUK	: Yüksek Kalsiyumlu Uçucu Kül

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU BAĞLAYICILI GEOPOLİMER BETONUN

SÜLFAT DAYANIKLILIĞINA CAM TOZUNUN ETKİSİ

EŞREF AZİM

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

72 + xi sayfa

2024

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

Bu çalışmada, geopolimer betonların sülfat etkilerine karşı gösterdiği dayanıklılık üzerine bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamında, bağlayıcı olarak YFC (YFC) ve cam tozu kullanılarak geopolimer beton üretilmiştir. Altı farklı grup oluşturulmuş ve YFC'nin yerine ağırlıkça %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında cam tozu eklenmiştir. Geopolimer beton numuneleri, 28 günlük kür süresini tamamladıktan sonra %3 konsantrasyonundaki magnezyum sülfat ve sodyum sülfat çözeltilerine 12 hafta süreyle maruz bırakılmıştır. Çalışma kapsamında, numunelerin basınç dayanımları, eğilme dayanımları, kılcal geçirimsizlik, ağırlık ve pH değerleri değişimleri izlenmiş ve görsel değişimler incelenmiştir. Deney sonuçları, kontrol numunelerinin 28 gün laboratuvar ortamında kür edilmiş sonuçlarıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bulgulara göre, geopolimer betonların basınç ve eğilme dayanımları açısından en yüksek değerler, cam tozu oranı %0 olan C0 grubundaki numunelerde elde edilmiştir. Cam tozu oranının artmasıyla birlikte basınç ve eğilme dayanımı değerlerinde bir azalma gözlenmiştir. Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin basınç ve eğilme dayanım değerleri azalmış, kılcal geçirimsizlik katsayıları ise artmıştır. Görsel olarak incelendiğinde, sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerde herhangi bir bozulma gözlenmemiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer beton, YFC, cam tozu, sülfat direnci

ABSTRACT

Master of Science Thesis

BLAST-FURNACE SLAG-BASED GEOPOLYMER CONCRETES: THE EFFECT OF GLASS POWDER ON SULFATE RESISTANCE

EŞREF AZİM

Inonu University

Graduate School of Nature and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

72 + xi pages

2024

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

In this study, research has been conducted on the durability of geopolymers against sulfate effects. Within the scope of the research, geopolymer concretes were produced using blast furnace slag (YFS) and glass powder as binders. Six different groups were created, and glass powder was added in weights of 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 50% instead of YFS. Geopolymer concrete samples were exposed to 3% concentrations of magnesium sulfate and sodium sulfate solutions for 12 weeks after completing the 28-day curing period. During the study, changes in compressive strengths, flexural strengths, capillary permeability, weight, and pH values of the samples were monitored, and visual changes were examined. The experimental results were evaluated by comparing them with the results of the control samples cured for 28 days in a laboratory environment. According to the findings, the highest compressive and flexural strengths of geopolymers were obtained in the C0 group with a 0% glass powder ratio. An decrease in compressive and flexural strength values was observed as the glass powder ratio increased. Samples immersed in sulfate solutions showed a decrease in compressive and flexural strength values, while capillary permeability coefficients increased. Visual examination revealed no deterioration in samples immersed in sulfate solutions..

Keywords: Geopolymer concrete, blast furnace slag, glass powder, sulfate resistance

1.GİRİŞ

Metal çıkarma teknolojilerinin çoğu, endüstriyel süreç sırasında oluşan atık maddelerle çevreyi kirletmektedir (Dippenaar 2005). Bu atık maddeler depolama, taşıma ve çevre kirliliği açısından önemli sorunlara neden olmaktadır (Öztürk ve Gültekin 2015). Son yıllarda sanayileşme ve kentleşmenin hızla artması, önemli oranda büyük miktarda atık malzeme üretilmesi ve mevcut depolama sahalarının hızla dolması nedenlerinden dolayı yeni sahaların araştırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır (Francis 2005).

Çevre korumanın kritik bir konusu, halk sağlığını tehdit eden ve çeşitli atık maddelerin artmasıdır (Kuo vd. 2007). Atık depolama ve artan miktarlardaki çevresel sorunlar nedeniyle, bu malzemelerin olası artan geri dönüşümü veya yeni yan ürünlerin geliştirilmesi, endüstriler için temel teşvik haline gelmiştir (Francis 2005). Endüstrinin diğer ilgi alanı ise ürün çıktısı, kalite ve enerji tasarrufu açısından işleme verimliliğini artırmaktır.

Bu çalışmanın amacı, geopolimer betonların sülfat etkisine karşı dayanıklılığını belirlemek için cam tozu ve YFC (Yüksek Fırın Cürufu) kullanarak geopolimer beton üretmektir. Bağlayıcı olarak YFC ve cam tozu, alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, agrega olarak ince ve iri agrega kullanılmıştır. Geopolimer beton karışımlarında, silis modülü 1,5, NaOH çözeltisinin molaritesi 12 M ve su/bağlayıcı (s/b) oranı 0,6 olarak ayarlanmıştır. Üretilen numuneler, 50x50x50 mm ve 40x40x160 mm boyutlarında çelik kalıplara yerleştirilmiş ve 24 saat süreyle bekletilmiştir. Ardından, numuneler kalıplardan çıkarılarak 28 gün boyunca laboratuvar ortamında kür edilmiştir. Kür süresi tamamlanan numuneler, %3 konsantrasyonlu magnezyum sülfat ve sodyum sülfat çözeltilerinde 12 hafta süreyle bekletilmiştir. Bu süreçte, 4, 8 ve 12 haftalık periyotlarda numunelerin ağırlık değişimleri belirlenmiş ve görsel değişimleri incelenmiştir. Ayrıca, 28 gün laboratuvar ortamında kür edilen kontrol numunelerin basınç dayanımları, eğilme dayanımları ve kılcal geçirgenlik katsayıları da 4, 8 ve 12 haftalık periyotlarda ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, sülfat etkisine maruz kalan geopolimer beton performansını değerlendirmek için kontrol numunelerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

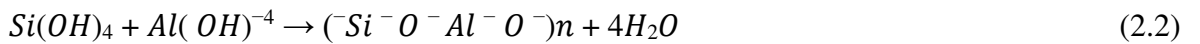
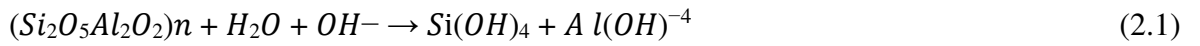
2.1 Geopolimer

Davidovits, alkali sıvı ile Silisyum/Alüminyum (Si/Al) arasındaki kimyasal süreci inceleyen bir araştırmacıdır. Uçucu kül, cüruf, YFC, kireçtaşı, pirinç kabuğu, metakaolin, doğal puzolan türü malzemeler gibi tamamlayıcı çimentolu malzemelerin mineral ve metal kaynaklarıyla birleştirildiğinde bağlayıcı üretilebileceğini öne sürmüştür. (Bondar, 2013). Söz konusu kimyasal reaksiyonun bir polimerizasyon süreci olması nedeniyle “Geopolimer” terimi ile adlandırmıştır (Davidovits, 1999).

Stabil bir geopolimer geliştirmek için bu tamamlayıcı çimentolu malzemelerin oldukça amorf olması, yeterli camsı içeriğe ve düşük su ihtiyacına sahip olması gerektiği öne sürülmüştür. Bu çimentolu veya alümino silikat malzemeler, sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3), potasyum hidroksit (KOH) ve potasyum silikat ($\text{K}_2\text{O}_3\text{Si}$) malzemesi gibi Alkali aktivatörlerle etkinleştirilmektedir. (Duxson vd., 2007).

Polimerizasyon işlemi büyük ölçüde alkali sıvının türüne bağlıdır. Alkali sıvı, sodyum veya potasyum silikat içerdiğinde reaksiyonu, yalnızca alkalın hidroksitlere kıyasla çok daha yüksek bir hızda gerçekleşir (Palomo, vd 1999).

Tipik bir geopolimerin sentez süreci, Denklem 2.1 ve 2.2’de görülen reaksiyonla gerçekleşir. Polimerizasyon, reaktif alümino silikatların (yüksek alkali koşullar altında), SiO_4 ve AlO_4 tetrahedral birimlerini serbest bırakmak üzere çözelti içinde çözünmesiyle meydana gelir. Bu tetrahedral birimler, oksijen atomunu paylaşarak polimerik öncüye bağlayarak polimerik Si-O-Al-O bağları oluşturur. Geopolimer malzemenin şematik oluşumu aşağıdaki denklemlerde verilmiştir. (Komnitsas, 2011) (Singh, vd.2015)



Denklem 2.2 kimyasal reaksiyon sırasında suyun açığa çıktığını ortaya koymaktadır. Bu su, karışımın işlenebilirliğini kolaylaştırır ve ana kimyasal reaksiyonda rol oynamaz. Bu, kalsiyum hidroksit ve kalsiyum silikat hidrat üretimiyle sonuçlanan normal bir Portland çimento karışımının hidrasyon işleminde suyun kimyasal reaksiyonundan farklıdır (Komnitsas, 2011).

2.1.1 Geopolimerleşme

Geopolimerleşme, alüminosilikat kaynak malzemesine bir alkali aktivatörün eklenmesiyle gerçekleşir. Silika ve reaktif alümina içeren malzemelerin alkali aktivasyonu için erken bir model, 1950'lerde Glukhovsky tarafından önerilmiştir. Bu model, üç ana aşamadan oluşur: yok etme-koagülasyon, koagülasyon-kondensasyon ve kondensasyon-kristalleşme.

İlk aşama (yok etme-koagülasyon), katı partiküllerin bir alkali çözelti varlığında silikat ve alüminat molekülleri üretmek üzere çözünmesini içerir. Çözünme, çözeltinin alkalinitesinin, Si ve Al'yi kaynak malzemeden çekmeye çalışarak stabilize etmeye çalışması nedeniyle meydana gelir. Çözünmenin hızı, aktivatörün pH'sine ve olası diğer bileşenlerin varlığına bağlıdır. Bu çözünme, küçük moleküllerin bir araya yapışmasına veya koagülasyonun başlangıcına neden olur.

İkinci aşama (koagülasyon-kondensasyon), küçük moleküllerin daha büyük moleküller haline gelerek jel formunda çökmesi anlamına gelir. Reaksiyon ilerledikçe, sistem sürekli olarak yeniden düzenlenir ve yeniden yapılandırılır ve Al-bağlı Jel 1'den Si-bağlı Jel 2'ye dönüşür. Reaksiyon hızı, çözeltinin alkalinitesinin artmasıyla birlikte artar.

Son aşama (kondensasyon-kristalleşme), polimerizasyon ve sertleşmenin gerçekleştiği, nihai ürünün oluştuğu aşamadır.

2.1.2 Kaynak malzemeler

Araştırmalar, uçucu kül, kalsine kil, YFC, doğal pozolanlar ve volkanik kül, çerçevesi alüminosilikatlar, sentetik camımsı öncüler, çelik cürufu, fosfor cürufu, ferronikel cürufu, bakır cürufu, kızıl çamur, alt külü ve belediye katı atıkları yakma külü, atık cam ve pirinç kabuğu külünden yapılan geopolimerlerin kabul edilebilir özelliklere sahip olduğunu bulmuştur. Hidroksitlerle aktive edilmesi, uçucu kül, doğal pozolanlar ve sentetik camımsı öncülerden oluşan geopolimerlerin istenilen özelliklere sahip olmasını sağlayabilir. Çözünür silikatlar, aynı malzemelerin yanı sıra cüruf ve kalsine kil gibi uygun geopolimer özellikleri verebilir (Provis ve van Deventer 2014).

Geopolimer üretimi için kaynak malzeme genellikle alüminosilikat; bu da alüminyum, silikon ve oksijen içeren bir mineraldir. Bir kaynak malzemesinin geopolimer üretimi için uygun olup olmadığını belirleyen özellikler arasında incelik, kristallilik, kompozisyon ve reaktivite bulunur.

Bir malzemenin inceliği, bireysel taneciklerin ne kadar küçük olduğuna işaret eder. İnce bir malzeme, artmış yüzey alanı nedeniyle kaba bir malzemeden daha kolay çözünür. Somna ve diğerlerinin yaptığı bir çalışma, uçucu külün artan inceliğinin özellikle 7-14 gün arasında dayanıklılık gelişiminde artış gösterdiğini ortaya koymuştur (Somna et al. 2011).

Bir malzemenin kristalliliği, parçaları ayırmak için gereken enerjiyi belirler. Amorf veya düzensiz bir yapıya sahip bir parçacık, çok düzenli, kristal bir yapıya sahip bir parçacıktan daha az enerji gerektirir.

Bir malzemenin kompozisyonu, malzemede bulunan elementlerin göreceli miktarlarına işaret eder. Geopolimerleşme için gereken başlıca elementler Si ve Al olsa da, kullanılan kaynak malzemelerin çoğunda kirlilikler bulunabilir. Bu kirliliklerin türü ve miktarı, belirli metallerin diğerlerinden daha reaktif olması nedeniyle geopolimerleşme sürecini değiştirebilir.

Bir malzemenin reaktivitesi, incelik, kristallilik ve kompozisyon tarafından belirlenir. Daha reaktif bir malzeme, değişime daha yatkın olacak ve geopolimerleşme sürecinin gerçekleşmesine izin verecektir.

Alkali aktivatörle aktive edilmiş malzemelerin çoğu araştırması, uçucu kül, YFC ve metakaolin üzerinde yoğunlaşmıştır. Uçucu kül ve metakaolin, en yaygın kullanılan düşük kalsiyumlu alüminosilikat malzemelerdir.

2.1.3 Sınıflandırma

Si/Al oranına bağlı olarak üç biçimde sınıflandırılabilir (Bondar, 2013)

- a) Tekrarlanan birim olarak (-Si-O-Al-O-)'ya sahip poli (sialit)
- b) Poli (sialit-silokso) tekrar eden birim olarak (-Si-O-Al-O-Si-O)'ya sahip veya
- c) Tekrarlayan birim olarak (-Si-O-Al-O-Si-O-O-)'ye sahip poli (sialite-disilixio)

2.1.4 Alkali çözeltiler

Sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit, alkali bir çözelti üretmek için sodyum silikat veya potasyum silikat ile birleştirilir (Davidovits, 1999) (Barbosa, vd. 2000) (Swanepoel & Strydom, 2002). Silikat içeren çözeltilerdeki reaksiyonlar, alkali hidroksitlere kıyasla çok daha yüksektir ve kaynak malzeme ile çözelti arasındaki reaksiyonu artırır (Palomo vd., 1999). NaOH çözeltisi ayrıca malzemelerin daha yüksek oranda çözünmesine neden olur. (Xu ve Van Deventer, 2000)

2.1.5 Geopolimer betonun özellikleri

Geopolimer betonun priz süresi, karışım oranları ayarlanarak hızlı veya yavaş priz alacak şekilde zamanlanabilir. Gerekli dayanıma çok kısa sürede ulaşabilmektedir (Bondar, 2013; Van Jaarsveld, vd. 1997). Kür sıcaklığı, kaynak malzeme ve alkalın aktivatörün tipi, geopolimer betonun priz süresinde önemli bir rol oynamaktadır (Cheng ve Chiu, 2003). Kaynak malzeme olarak granül YFC içeren geopolimer jelin prizlenme süresinin 60°C sıcaklıkta 15 ila 45 dakika arasında olduğu sonucuna varılmıştır. Uçucu kül bazlı geopolimer betonun ilk prizlenme süresi yüksek sıcaklıklarda daha hızlıdır ve son priz ilk prizden 15 – 25 dakika sonra gerçekleşir (Bondar, 2013). Uçucu kül bazlı geopolimer betonun çökme mekanizmasını anlamak için (Laskar and Bhattacharjee, 2011) deneyler yapılmıştır. 25 mm'den aktivatör kuvveti 1-20 M olan akma kadar değişen çökmeler gösterilmiştir. NaOH çözeltisinin molar mukavemetinin ve silikatın hidroksit çözeltisine oranının geopolimer betonun akma gerilmesi ve viskozitesini etkilediği gözlenmiştir. Geopolimer beton hızla sertleşir ve 28 günde 100 MPa civarında dayanım kazanabilir.

Düşük gözenekliliklerinden dolayı geleneksel betona göre üstün mekanik özellikler elde edilmiştir (Komnitsas, 2011; Temuujin, vd. 2011). Bu, kürlenme ve alkali çözelti türüne bağlıdır:

2.1.5.1 Kürlenme

Palomo vd (1999) geopolimer betonun mekanik dayanımının kürlenme sıcaklıklarından ve alkali sıvısının türünden etkilendiği sonucuna varmıştır. Daha yüksek kürlenme sıcaklığı ve daha uzun kürlenme süresi sonucunda daha yüksek basınç dayanımı elde edilebilir. Ancak çok fazla kürün bitmiş beton üzerinde olumsuz etki oluşturabileceği rapor edilmiştir (Van Jaarsveld, vd. 2002). Kür sıcaklığının 60°C'nin üzerinde olması ve 48 saatten uzun sürenin betonun basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olmayabilir. Geopolimer betonun hızlı polimerizasyon süreci nedeniyle, 24 saat fırında kürlendikten sonra basınç dayanımında fazla dalgalanma olmaz. Uzatılmış hidratasyon sürecinin bir sonucu olarak mukavemetin arttığı OPC betonunda durum böyle değildir. (Djwantoro Hardjito, vd. 2004)(Bondar, 2013)

2.1.5.2 Alkali çözelti türü

Madheswaran, vd. (2013) tarafından yapılan bir çalışmada NaOH'nin farklı molaritelerinin, (3M, 5M ve 7M) NaOH molaritelerine sahip geopolimer karışımları hazırladıkları geopolimer betonun mukavemeti üzerinde de etkiye sahip olduğu görülmüştür. Karışımların basınç dayanımları 15 MPa ile 52 MPa arasında değişmiş olup, NaOH molar konsantrasyonu arttıkça geopolimer betonun dayanımının da arttığı sonucuna varılmıştır. Benzer şekilde sodyum silikatlar içeren alkali çözeltilerdeki reaksiyon hızı, hidroksit içeren alkali çözeltilerle karşılaştırıldığında daha yüksek olduğu (Palomo vd., 1999) ancak alkali hidroksitlerin, özellikle de NaOH çözeltisinin, mekanik dayanımların artmasına neden olduğu rapor edilmiştir (Nagalia vd., 2016). Ayrıca yüksek kürlenme sıcaklıklarının geopolimer beton üzerindeki etkisini de incelemiştir. Betonun kür amacıyla yüksek sıcaklıklara maruz bırakılması durumunda çatlama oluşabileceği sonucuna varmışlardır (Van Jaarsveld vd., 2002). Alkali çözeltideki silikat iyonlarının varlığına bağlı olarak mekanik dayanım ve elastiklik modülünde önemli bir iyileşme vardır (Fernández-Jiménez, vd.2006).

2.1.6. Üretim süreci

Geçmiş araştırmalara göre geopolimer betonun üretimi, karışımın homojenliğini sağlamak için agregaların ve uçucu kül veya cüruf gibi bağlayıcı malzemelerin kuru bir karışımını içerir. NaOH veya KOH ve Na₂SiO₃ veya KSiO₃ içeren aktivatör çözeltisi karışıma eklenir ve daha sonra tekrar karıştırılır. İstenilen kıvamı elde etmek için daha sonra su eklenir. (Hardjito, vd. 2008; Hardjito, vd. 2004; Nagalia vd., 2016; Swanepoel ve Strydom, 2002)

2.1.7 Geopolimer betonun uygulamaları

Geopolimer beton üzerinde yapılan bir araştırma, yüksek erken dayanım sağladığından (Aleem & Arumairaj, 2012) prefabrik inşaatlarda etkili bir şekilde kullanılabileceğini, dolayısıyla mevcut bir yapının rehabilite edilmesinde ihtiyaç duyulan prekast yapıların

inşası için çok uygun olduğunu göstermiştir (Lloyd & Arumairaj, 2012 Rangan, 2010). Geopolimer beton, baraj inşaatı, atık su boru hattı gibi kütle betonlarında, geopolimer-fiber kompozitler kullanılarak yapılan yapısal güçlendirmelerde, ön gerilimli beton yapılarda kullanılabilir (Aleem ve Arumairaj, 2012; Bondar, 2009). Ayrıca belirtildiği gibi demiryolu traverslerinde de kullanılabilir (Palomo vd., 1999). Mevcut teknolojinin geopolimer beton yapı elemanları oluşturmak için kullanılabileceği bulunmuştur. Ürünlerin özellikleri sınırlı kuruma büzülmesi göstermiştir. (Lleyda, 2004) (Balaguru, 1998; Hardjito ve Rangan, 2005). Betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde geopolimer kompozitlerin kullanılabileceğini bildirmişlerdir. Geopolimer kullanımının bir sonucu olarak yangına dayanıklılık, organik polimerlerle karşılaştırıldığında çok daha yüksektir. 375 mm'den 1800 mm'ye kadar farklı çaplarda geopolimer betonla güçlendirilmiş kanalizasyon boruları normal portland çimento betonu ile aynı tesislerde üretilmiştir. Sonuçlar, geopolimer betonun OPC'den çok daha iyi performans gösterdiğini ve gelecekteki çalışmalar için dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur. (Gourley & Johnson, 2005; Lloyd & Rangan, 2010). Ticari ölçekte, bu tür ürünlerin spesifikasyon gereksinimlerini karşılayan, geopolimer betonla güçlendirilmiş menfezler üretilmiştir (Cheema, vd. 2009). Prekast köprü tabliyesi yapmak için geopolimer beton kullanılmıştır. Kompozit köprü yapısı, geopolimer köprü tabliyesi ile kompozit görevi gören fiberglas kirişlerden yapılmıştır. Köprü bugüne kadar hala hizmet vermektedir (Aldred & Day, 2012).

2.1.8 Geopolimer betonun ekonomik faydaları

Geopolimer beton inşaat sektörüne ekonomik faydalar sunmaktadır. Uçucu külün fiyatı sıradan portland çimentosuna göre çok daha ucuzdur. Alkali sıvıların fiyatı da dâhil edildiğinde geopolimer betonun OPC'den %10-30 daha ucuz olduğu tahmin edilmektedir. (Lloyd ve Rangan, 2010) Geopolimer beton aynı zamanda asit ve sülfat ataklarına karşı iyi bir direnç sağladığı ve kuruma büzülmesini minimum düzeyde tuttuğu için onarım maliyeti riski de düşüktür (Lloyd ve Rangan, 2010).

2.1.9 Lif takviyeli beton

Çimentolu malzemelerin kırılğan davranışı ve çekme kuvvetlerine karşı zayıf direnci, betona takviye malzemelerinin eklenmesine yol açmaktadır (Neville ve Brooks, 2004). Betonun çekme dayanımını arttırmak için genellikle çelik donatılar kullanılır. Lifler, çekme kuvvetlerini iletecek şekilde hareket ederek benzer şekilde çalışırlar. Fiber takviyeli polimer (FRP) malzemeler, düşük fiyatları ve geliştirilmiş çatlama ve büzülme dirençleri nedeniyle inşaat sektöründe popülerlik kazanmıştır (Karahana, Tanyildizi ve Atis, 2009; Reed vd., 2014). Avantajlarına rağmen FRP, yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında zehirli dumanlar yayabilir (Lee, 2002). Buna karşı koymak için bazalt elyafları başka bir alternatiftir. Bazalt kayaları bazalt lifleri üretmek için erime sürecinden geçer. Bu kayalar çok küçük parçacıklara bölünerek lif oluşumuna neden olur. Bu lifler üretim sürecinde herhangi bir katkı maddesine ihtiyaç duymaz ve bu sayede ekstra maliyet tasarrufu sağlanır (Sim, vd. 2005). Bazalt ayrıca şu değerleri sağlar:

- Bazalt lifleri, cam liflerine göre daha iyi çekme mukavemeti sağlar.

- Karbon fiberlerle karşılaştırıldığında daha fazla kopma gerilimine sahiptir.
- Azaltılmış zehirli dumanlar ile kimyasal saldırılara ve yangına karşı dayanıklılığın artırılmasını sağlar (Berozashvili, 2001)

2.1.10 Nano-silika bazlı beton

Nano-silikanın küçük parçacık boyutu geniş bir yüzey alanı sağlayarak çimentonun hidrasyon ve puzolanik reaksiyon hızını artırır (Belkowitz, 2009). Bu, OPC betonunun performansının artmasına neden olur. Kuru taneler ve koloidal süspansiyon, nano silikanın mevcut olduğu iki ana formdur. Kuru nano silika taneciklerinin, karışım suyu veya diğer katkı maddeleri içinde tamamen dağılması için bir karıştırma prosedürü gereklidir. Kolloidal nano-silika süspansiyon halinde üretilir ve kullanıma hazırdır (Said vd, 2012).

2.2 Yüksek Fırın Cürufu

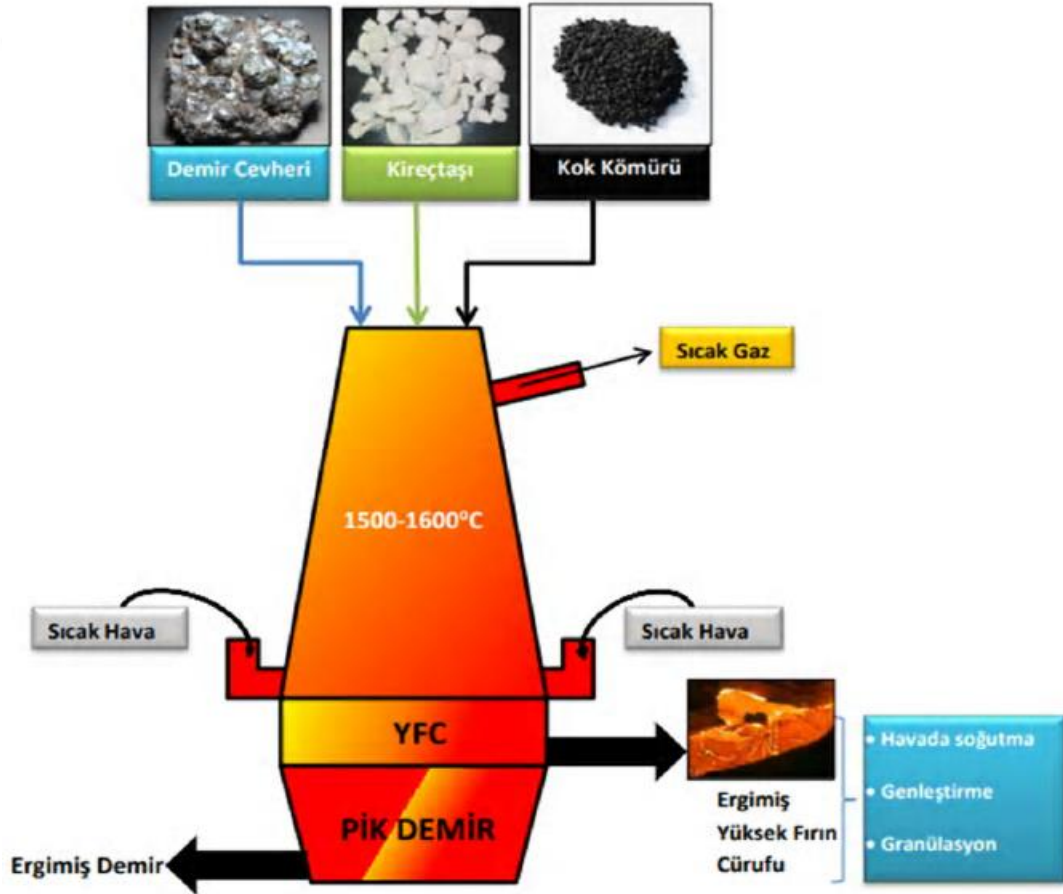
Demir ve çelik üretim süreçleri önemli miktarda kirlilik ve sera gazı emisyonu üretmektedir. Demir cevherinin farklı safsızlıkları vardır ve bunların bazıları, alüminyum gibi, ana yapısal bileşenlerdir; nikel, çinko ve bakır gibi bazıları ise eser element fraksiyonunun bir parçasıdır (Kan vd. 2015). Bu endüstrinin hedefi, atık malzemeleri kullanarak doğal kaynakları korumak ve mümkün olduğunca malzeme özellikleri ve karakteristiklerinin uygun olduğu yerlerde enerji tasarrufu sağlamaktır (Motz ve Geiseler 2001). Demir yapımı ayrıca farklı bir endüstride potansiyel olarak geri dönüştürülebilecek atık malzemeler de üretir (Motz & Geiseler 2001).

Demir üretim endüstrisinde, cevher yüksek sıcaklıktaki fırına yerleştirilir ve indirgeyici olarak kok ve yakıt yardımıyla bu sürecin son ürünü olarak erimiş metale indirgenir. Çelik üretim fırını ayrıca nihai çelik ürününün üretimi için de kullanılır (Dippenaar 2005). Cüruf, demir ve çelik üretim prosesinin bir yan ürünüdür (Dippenaar 2005; Brodnax & Rochelle 2011). Demir ve çelik üretimi sırasında çok büyük miktarlarda cüruf üretilir. Farklı cürufaların özellikleri değişiklik gösterir ve kok cevheri ve külüne göre belirlenir. Çelik üretim cürufunun miktarı demir üretim cürufundan daha azdır (Dippenar, 2005). Cüruf daha önce kullanılmamış yenilenebilir bir malzeme olarak düşünülebilir ve bu atığın özellikleri endüstrinin başka bir bölümünde kullanımını mümkün kılar (Dimitrova 1995; Dippenaar 2005), bu da çevre kirliliğinin, enerji kullanımının ve üretiminin azaltılmasına yardımcı olur (Öztürk ve Gültekin 2015). YFC'nin olası yeniden kullanım cüruf özelliklerine ve erimiş cürufun ısıl işlemine bağlıdır. Bu nedenle üretkenliği ve performansı optimize etmek için cürufun faz kimyası bilgisini geliştirmek gereklidir (Jak ve Hayes 2004). Yeni analitik ekipmanların geliştirilmesi ve yeni analizlerin uygulanması deneysel yöntemlerin geliştirilmesine yardımcı olacaktır (Jak ve Hayes 2004).

Erimiş cüruf prosesin ana bileşenidir ve maksimum performansı elde etmek için termofiziksel özelliklerini anlamak önemlidir. Cüruf bileşiminin mikro yapıyı ve termofiziksel özelliklerini etkilediği bilinmektedir (Kang ve diğ. 2014). YFC büyük ölçüde ana bileşenler olarak Al_2O_3 , SiO_2 , CaO ve MgO 'dan oluşur ve TiO , FeO ve MnO_2 gibi diğer bileşikler de küçük miktarlarda bulunur (Francis 2005; Öztürk ve Gültekin 2015).

YFC, ilk demir yapımında en büyük miktarlarda üretilir (Gan & Lai 2014). 1 ton pik demir üretilirken 300 kg YFC elde edilmektedir (Fredericci ve diğ. 2000). Dünya çapında YFC, yılda 175-225 milyon ton olarak tahmin edilen önemli miktarlarda ortaya çıkmaktadır (Savastano vd. 2001; Francis 2005).

Yüksek sıcaklık fırınının işlevi, nihai ürünler pik demir ve cüruf olacak şekilde demir cevherinden gang ve metalik olmayan yabancı maddeleri ayırmaktır (Dippenaar 2005). Pik demir ve erimiş cüruf yüksek sıcaklık fırının merkezinde birikir ve yoğunluğu demirden düşük olduğu için cüruf pik demirin üzerinde konumlanır (Ito ve diğ. 2014). YFC, üretim süreci sırasında pik demirden ayrışır (Crossin 2015). Şekil 2.1'de YFC'nun üretim süreci görülmektedir. Yüksek viskoziteye sahip olması ve fırının düşük sıcaklık bölgelerinde bu viskozitenin artması nedeniyle yüksek sıcaklık fırınından cürufu boşaltmak zordur (Ito ve diğ. 2014).



Şekil 2.1: Yüksek fırın cürufunun üretim süreci (Engin, 2015)

Cüruf fırından çıkarıldığında yüksek bir sıcaklığa sahiptir ve farklı soğutma yöntemleri onun bileşimini etkileyecektir (Dippenaar, 2005). Cürufun, onu çeşitli uygulamalarda değerli kılan yüksek mukavemet ve sertlik gibi belirli özellikleri vardır (Fredericci vd., 2000). Yüksek sıcaklıktaki cürufun uygun bir soğutma işlemiyle uygun şekilde işlenmesi,

cürufun özelliklerini ve endüstrinin diğer bölümlerindeki geri dönüşüm uygulamalarını geliştirir (Liapis ve Papayianni 2015).

YFC'nin beton ve çimento gibi yapı malzemesi üretiminde kullanımının çeşitli faydaları vardır (Öztürk ve Gültekin 2015). Nihai ürün ayrıca kırılabilir ve yol inşaatında temel malzeme olarak kullanılabilir (Barati vd. 2011). Ayrıca demir cürufu yüksek miktarda kalsiyum silikat içerir ve çimentolu malzeme olarak kullanılabilir (Barati vd. 2011). YFC aynı zamanda cam ve seramik üretiminde de kullanılabilir (Francis 2005). Cüruftan üretilen cam-seramiklerin kimyasal ve mekanik özellikleri, yüksek kaliteli bir ürün olmasını sağlar (Wang vd. 2010). Ancak cürufun uygun olmayan şekilde soğutulması fiziksel özelliklerin zayıflamasına neden olur ve bu da cürufun çimentolu malzeme ve beton gibi diğer endüstrilerde yeniden kullanımını kısıtlar (Barati vd., 2011; Liapis ve Papayianni 2015). Kimyasal özellikler ve katılaşmanın soğuma hızı cürufun mineralojisini ve hidrolik özelliklerini etkiler (Kriskova vd. 2013). Tablo 1'de yan ürün olarak en önemli cüruf türü ve bu malzemelerin son kullanımı gösterilmektedir. YFC'ler hızlı soğutma ve yavaş soğutma cürufu olmak üzere iki tip cüruf olarak ayrılabilir ve her biri diğer uygun uygulamalarda farklı olası yeniden kullanım seçenekleri sunar (Ulusal Cüruf Birliği 2013; US Geological Survey 2014).

Çizelge 2.1: Potansiyel cüruf yan ürünleri ve kullanımları

Cüruf Yan Ürünleri	Cüruf Kullanımları
Kristalin Faz (Yavaş Soğutma)	Yol temeli, hazır beton, klinker imalatı, Asfalt beton agregası, dolgu, demiryolu balastı, sıcak karışım asfalt, beton kaplama, beton temel, erozyonu önlemek eğim,
Amorf Faz (Hızlı Soğutma)	Beton, çimento katkı maddesi, Portland ile karıştırılabilir Harmanlanmış Tip 1S çimentosu yapmak için çimento klinkeri, yüksek yangın dayanımlı beton taban, hafif dolgu uygulamaları topraklar,

2.2.1. Cüruf özellikleri

2.2.1.1. Soğutma süreci

Kimyasal içerik ve soğuma hızı, cürufun mineralojisini ve hidrolik özelliklerini etkiler (Kriskova vd. 2013). Fırından alınan cürufun sıcaklığı yaklaşık 1480°C olduğunda ve hızlı veya yavaş soğutma gibi farklı soğutma yöntemlerine tabi tutulduğunda cürufun özellikleri etkilenir (Dippenaar 2005). Erimiş cürufun iki ayrı nihai katı hali vardır. Bunlardan ilki, erimiş cürufun yavaş yavaş soğumasından kaynaklanan kristalin fazdır (Bisio 1997; Jak ve Hayes 2004; Dippenaar 2005; Kuo vd. 2007; Kriskova vd. 2013). İkincisi ise söndürme

veya hızlı soğumanın neden olduğu camsı, amorf veya camsı fazdır (Bisio 1997; Jak ve Hayes 2004; Dippenaar 2005; Kuo vd. 2007; Kriskova vd. 2013). Camsı veya amorf fazın hazırlanmasında ıslak söndürme ve kuru söndürme olmak üzere iki söndürme yöntemi vardır (Barati ve diğ. 2011). Islak söndürmede cürufu hızlı bir şekilde soğutmak için su kullanılır (Barati ve diğ. 2011; Kriskova ve diğ. 2013). Çok büyük miktarda suya, yani her 1 ton erimiş cüruf için yaklaşık 1-1,5 ton suya ihtiyaç vardır (Barati vd., 2011; Kriskova vd., 2013). Suyula söndürme tekniği granül YFC üretir (Crossin 2015). Cüruf, söndürme amaçlı su kullanılarak cüruf ocağına döküldüğünde H_2S ve SO_2 üretilip suya ve atmosfere salındığı için çevre kirliliğine neden olur (Bisio 1997; Barati ve diğ. 2011). Kuru söndürme yöntemi, erimiş cürufun ısı enerjisini sıcak hava, buhar veya kimyasal enerji biçiminde geri kazanmanın bir yolu olarak kullanılır (Barati vd., 2011). Su, ortalama sıcaklığı daha hızlı düşürdüğü için havaya göre soğutmada daha verimlidir (Kriskova ve diğ. 2013). Soğutulan malzemenin boyutu ve kalınlığı da genel soğutma hızı üzerinde etkiye sahiptir (Kriskova ve diğ. 2013). Uygunsuz soğutma, fiziksel özelliklerin zayıflamasına ve cürufun yeniden kullanımının kısıtlanmasına neden olur (Liapis ve Papayianni 2015). Söndürülmüş cüruf demiryolu balastı olarak, betonda ve Portland çimentosunda kullanılabilir (Dippenaar 2005). Bitüm üretimi gibi daha düşük değerli uygulamalar için havayla soğutma tekniği uygulanmaktadır (Crossin 2015). Cürufun yüksek sıcaklıkta uygun şekilde işlenmesi ve uygun soğutma işlemi cürufun özelliklerini ve uygulamalarının değerini artırır (Liapis ve Papayianni 2015).

2.2.1.2 Baziklik oranı

Baziklik olarak adlandırılan CaO 'nun SiO_2 'ye oranı, cüruf karakterizasyonu için kritik öneme sahiptir (Kuo vd. 2007), çünkü bu oran kristalleşmeyi etkiler (Kuo vd. 2007). CaO/SiO_2 oranı $>0,99$ ise kristal fazlar ortaya çıkacak ve kristalleşme soğutma işlemiyle ilişkili olmayacaktır. Baziklik oranı $<0,674$ ise suyla söndürme amorf fazları güçlendirecektir (Kuo ve diğ. 2007).

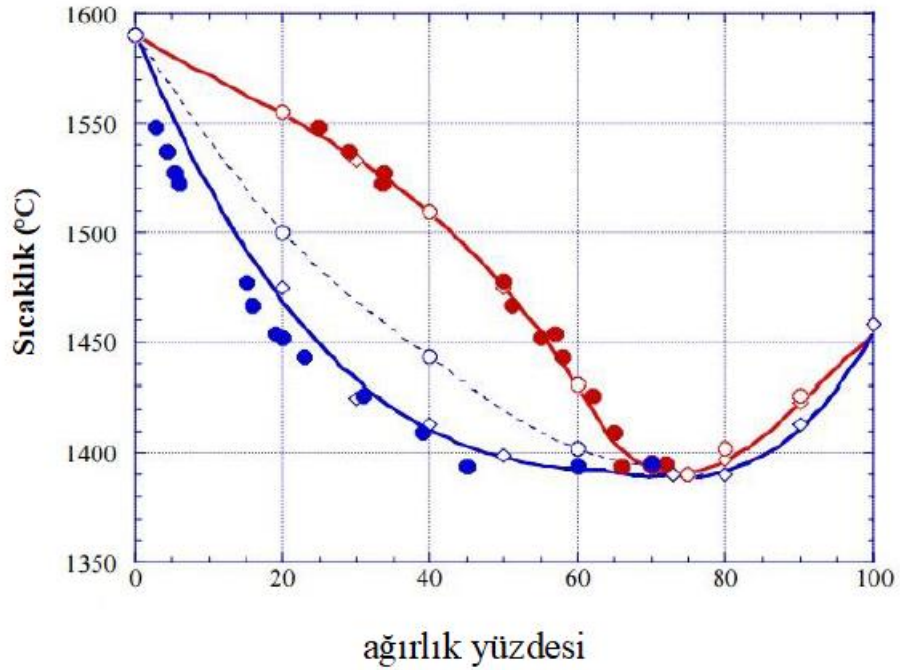
2.2.1.3 Ötektik nokta

Hızlı soğuma sırasında sıvılar ve katılar arasında bir denge oluşur (Jak ve Hayes 2004). Ötektik nokta, tüm sıvıların katı faza geçtiği sıcaklıktır. Isıtma sırasında bileşim değişebilir çünkü bazı bileşenler buharlaşma veya kirlitici elementlerle reaksiyon nedeniyle kaybolabilir (Jak ve Hayes 2004). Ayrışma, erime noktasının altındaki sıcaklıklarda sıvı ve katının fiziksel olarak ayrılmasına izin veren bir işlemdir. Bu ayrışma, katı fazın ortaya çıkması nedeniyle cürufun akışkanlığını etkileyecek ve viskoziteyi artıracaktır.

2.2.1.4 YFC'nin mikroyapısı

Isıl işlemiden sonra YFC için mervinit, melilit, larnit, gehlenit ve akermanit gibi farklı kristalin fazlar vardır (Fredericci vd. 2000). Mervinit ($Ca_3 Mg (SiO_4)_2$), YFC'nin yarı kararlı bir fazıdır ve $1000^\circ C$ 'de oluşur (Fredericci vd. 2000). Daha fazla ısıtıldığında mervinit geri dönülemez bir şekilde termodinamik olarak kararlı faza kaybolur (Fredericci vd., 2000). Başka bir kristal faz olan melilit, YFC'nin tüm temel bileşenlerini ve ağırlıkça %10 Al_2O_3 'ü içerir (Fredericci vd., 2000). Larnit (Ca_2SiO_4), melilit serisi olarak bilinen

åkermanit ($2\text{CaO}.\text{MgO}.2\text{SiO}_2$) ve gehlenit ($2\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2$) oluşturmak için gerekenden daha fazla SiO_2 ve CaO içeren bir cüruftur (Fredericci vd., 2000). Melilit, gehlenit ve akermanit arasında katı bir çözeltidir (Fredericci vd., 2000). Fazla CaO ve SiO_2 , kalsiyum silikat oluşturmak için yeterlidir (Fredericci vd. 2000). Cüruf atlasında YFC mikroyapılarının farklı fazları kimyasal bileşimlerine göre kaynak olarak gösterilmekte, dolayısıyla araştırmalarda elde edilen görüntüyü Cüruf atlası ile karşılaştırarak YFC numunelerinin mikroyapısını tanımak mümkün olmaktadır (Eisenhuttenleute 1995). Örneğin diyopsit fazı ($\text{CaMg}(\text{Si}, \text{Al}, \text{Fe})_2\text{O}_6$) 1120°C 'de oluşur (Wang vd. 2010). Şekil 2.2'de Cüruf atlası'na göre (Eisenhuttenleute 1995) $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ve $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO}$ 'dan oluşan iki sistemdeki YFC'nin farklı karakteristik bileşimlerini göstermektedir. Melilit, akermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) ve gehlenitin ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) katı bir çözeltisidir (Mendybaev vd. 2006). Sıcaklık-bileşim ilişkisi vardır (Mendybaev vd. 2006). Melilit, akermanit ve gehlenitten oluşur ve kesintili katı çözelti üretir (Mendybaev vd., 2006). Her numune farklı sıcaklıklarda farklı davranışlar gösterir ve bu da numunenin kimyasal içeriği ile ilgilidir (Mendybaev ve diğ. 2006). Şekil 2.2'ye göre Al_2O_3 miktarı arttığında gehlenit fazı elde edilecek, MgO miktarı arttığında ise akermanit fazı elde edilecektir (Mendybaev vd. 2006). Çelik üretim süreci için pik demiri hazırlamak önemlidir.



Şekil 2.2: Melilit, gehlenit ve akermanitin birleşimidir. Üst çizgi kırmızı eğri sıvı ilişkisini, en alt çizgi mavi eğri ise katılar içindir (Mendybaev ve diğ. 2006).

2.2.1.5 Enerji verimliliği

Yüksek fırından alınan erimiş cürufu önemli miktarda enerji mevcuttur ve bu, enerji tüketiminden tasarruf etmek için kullanılabilir (Bisio 1997; Barati vd. 2011). YFC, değerli bir enerji potansiyeli olan 1450-1650°C gibi yüksek bir sıcaklığa sahiptir; ancak soğutma genellikle enerji geri kazanılmadan yapıldığından önemli miktarda enerji (yaklaşık 220 TWh/yıl) israf edilmektedir (Bisio 1997; Barati vd. 2011). Geri kazanılan enerjiyi kullanmanın mantıklı ve en iyi yolu, onu aynı oranda kullanmak ve uzun mesafelerde naklieden kaçınmaktır (Bisio 1997). Isı, elektrik üretimi veya yakıt olarak kullanmak üzere cüruftan enerjinin geri kazanılmasına yönelik birçok girişimde bulunulmuştur, ancak bunların hiçbiri henüz ticarileştirilmemiştir (Barati vd. 2011). Bunun nedeni, bu endüstrinin enerjiyi geri kazanmaktan ziyade cürufu söndürmeye ve camsı aşamalara sahip olmaya odaklanmasıdır (Barati vd. 2011). YFC'nin tamamı diğer ürün veya prosesler için hammadde olarak satılmaktadır (Bisio 1997). Cürufun değerini korumak için hızlı soğutma hayati öneme sahiptir (Bisio 1997). Eğer amaç enerjinin geri kazanılması ise, cüruf camsı fazları üretecek kadar hızlı soğutulmaz (Barati vd. 2011).

2.2.1.6 Viskozite

Viskozite cürufun proses sırasındaki hareketini ve akışkanlığını gösteren önemli bir özelliktir (Togobitskaya ve diğ. 2004). Farklı sıcaklıklardaki viskozite, YFC'nin yüzey gerilimini ve akışkanlığını belirler (Togobitskaya ve diğ. 2004); erimiş cürufun viskozitesi kimyasal bileşime ve sıcaklığa göre değişir (Saito ve diğ. 2003; Gan ve Lai 2014). Viskozite, erimiş cürufun ağ yapısını anlamak ve çeşitli sıcaklıklardaki farklı olayları simüle etmek için önemli bir fiziksel özelliktir ve viskozitenin cürufun taşınması üzerinde ek bir etkisi vardır (Saito vd. 2003; Gan ve Lai 2014).

Cüruf bileşimi ile viskozite arasındaki ilişkinin araştırılması hayati önem taşımaktadır (Kim vd., 2004). Cüruf soğutulursa katı fazlar ortaya çıkacak ve viskozite artacaktır (Kim vd. 2004). Sıcaklık sıvıdan katıya düşürüldüğünde fazların bileşimi sürekli olarak değişecektir. Erimiş cürufun kristalleşmesi aynı zamanda viskoziteyle de ilgilidir (Zheng vd. 2014). Kim vd., (2004), Al_2O_3 miktarının sabitlenmesi durumunda MgO'nun cürufun viskozitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını belirtmiştir. Ancak MgO'nun %12,5'e kadar arttırılması cürufun hareketliliğini arttıracaktır (Logachev vd. 2013). Logachev ve diğ. (2013), MgO içeriğinin %12,5'e yükselmesi ve bazlığın 0,94 ile 1 arasında olması halinde, yüksek Al_2O_3 içeriğiyle bile cüruf hareketliliğinin artırılacağı sonucuna varmışlardır.

Erimiş cürufun viskozitesi sıcaklık düştükçe artar ve bu durum endüstride zorluklara neden olur (Nakamoto vd. 2004). Bu nedenle, en iyi çalışmayı elde etmek ve enerji tasarrufu sağlamak için düşük sıcaklıklarda erimiş cürufun akışkanlığının korunması veya arttırılması araştırılmalıdır (Nakamoto ve diğ. 2004). CaO/SiO₂ oranı yüksekse viskozite düşüktür (Nakamoto ve diğ. 2004). Düşük viskoziteli ve düşük sıcaklıkta yeterli bir cüruf sistemine sahip olmak için, farklı kimyasal bileşimlere sahip çok çeşitli cürufların reaksiyonunun incelenmesi gerekmektedir (Nakamoto vd. 2004). Örneğin Nakamoto vd., (2004) göre YFC'nin viskozitesi, özel bileşimiyle, 1673°C'nin altındaki sıcaklıklarda artar.

Bu sıcaklık, YFC'nin sıvı halde olduğu, 1673°C'nin altındaki sıcaklıklarda ise sıvı ve katıların bir arada bulunduğu zamandır (Nakamoto vd. 2004). Yönetilebilir bir akışkanlığa sahip olmak için erimiş YFC'nin viskozitesi 0,6 Pa.s'den az olmalıdır (Nakamoto vd. 2004). Cürufun 1673°C'deki viskozitesi, 0,77 Pa.s'dir. Bu cürufun o sıcaklıkta uygun bir akışkanlığa sahip olmadığını göstermektedir. Daha yüksek verim, daha düşük maliyet elde etmek ve cürufun dinamiği ve yapısına dair içgörü elde etmek için yüksek sıcaklıklarda cürufun fiziksel özelliklerini anlamak önemlidir (Gan ve Lai 2014).

2.2.1.7 Erime noktası

Erime noktası, YFC'nin kimyasal içerikle ilgili kritik özelliklerinden biridir. Cürufun iletkenliği viskoziteye bağlıdır, yani cürufun mikro yapısına bağlıdır (Kang vd. 2014). Köprü oluşturmayan oksijen iyonlarının miktarı arttığı için erimiş cürufun erime noktasında termal iletkenlik azalır (Kang vd. 2014). Geçmişte çeşitli deneylerde Al_2O_3 , MgO ve baziklik (CaO/SiO₂ oranı) gibi bazı kimyasal bileşimlerin etkileri araştırılmıştır. Liang vd., (2011), Al_2O_3 'ün YFC'nin erime noktasını hızla azaltabileceği sonucuna varmıştır. Lee vd. (2004), FeO içeriğinin artmasıyla cürufun erime noktasını düşüren başka bir bileşenin FeO olduğunu bulmuşlardır. Ek olarak, %7'nin altındaki MgO, YFC bileşiminde bir ağ değiştirici olarak görev yaparken, %7'nin üzerindeki MgO miktarları YFC erime noktasında bir artışa neden olur (Lee vd. 2004; Kim vd. 2004). Baziklik oranının artmasıyla YFC'nin erime noktası ve sıvı sıcaklığı da artar (Lee vd. 2004; Dai ve Zahang 2012). Yüksek miktardaki SiO₂ erime noktasını düşürür ve cürufta kristal oluşumunu geciktirir, mukavemeti ve su geçirgenliğini artırır. SiO₂ ayrıca cüruftaki kalsiyumun sızmasını da kontrol eder (Kuo vd. 2007; Nazari ve Riahi 2011). Kim vd., (2004) göre bazikliği 1,45 ve %14 Al_2O_3 olan YFC'nin sıvı sıcaklığı, MgO miktarının artmasıyla azalmaktadır. MgO miktarının %3,5'ten %10'a artırılması, Al_2O_3 içeriği %14 olduğunda cürufun erime noktasını artırır.

2.2.1.8 Isı değişimi

Isı değişiminin çoğu, metalin kalitesini, fırının verimliliğini ve çalışma parametrelerini etkileyen (YF) ocağında meydana gelir (Formoso vd., 1999). YF'de meydana gelen tüm işlemler, alçalan malzeme ile yükselen sıcak gazlar arasındaki ısı alışverişi ile ilgilidir. Fırın verimliliğini artırmak için, pik demiri ve cürufu ısıtmak için daha fazla ısı gücüne ihtiyaç vardır. Isı ve enerji değişimi bir YF'nin yuvarlanma yolunda meydana gelir. Yuvarlanma yolu, YF'nin iç hacminin %1'ine sahip olmasına rağmen, demir üretim endüstrisinde ısı ve enerji alışverişinde önemli bir işleve sahiptir (Formoso vd., 1999). Kanaldan gelen radyasyon, ocağın sıvı banyosundaki pik demirin ve cürufun ısıtılmasında birincil role sahiptir. Böylece kanal, sıvı ürünlerdeki erimeden kaynaklanan ısıyı değiştirir.

2.2.2 Cüruf bileşimi ve son kullanımı

2.2.2.1 Beton ve çimentolu ürünler

Beton endüstrisi muazzam bir çevresel ayak izine sahiptir. Beton bir yapı malzemesi olarak kullanılmakta ve ticari ölçekte her yıl 10 milyar ton beton üretmekte (Meyer 2009), bu da

Üretim için çok büyük miktarlarda hammadde ve enerji gerektirmektedir. Dolayısıyla beton endüstrisi ne evre dostudur ne de sürdürülebilir (Meyer 2009). Yaygın kullanımının nedenleri uygun tasarım ve üretimde mkemmek mekanik ve dayanıklılık özellikleridir. Beton kalıplanabilir, değişken yangın direncine sahiptir ve mevcut ve uygun fiyatlı bir malzemedir. Ancak bu endüstrinin çevreye etkisi kaçınılmazdır. Bu endüstri için gerekli olan doğal kaynaklar çok büyük olup, proses sırasında büyük miktarda su ve enerji kullanılmaktadır. Son olarak, imento ve beton ürünlerinin kullanımdan sonra imha edilmesi ve bertaraf edilmesi başka çevresel sorunlara neden olmaktadır (Meyer 2009).

Bu sorun ve zorlukların çoğu, beton imalatının önemli bir parçası olan Portland çimentosuna duyulan ihtiyaçtan kaynaklanmaktadır. Portland çimentosuna olan talep azalırsa çevresel tahribat da azalacaktır. Portland imentosu üretimi sırasında CO₂ emisyonları artar, ancak çimentolu malzemeler Portland imentosunun iyi bir alternatifidir ve bu malzemelerin bazıları uçucu kül veya öğütülmüş granül YFC gibi endüstriyel süreçlerden kaynaklanan atıklardır. 1 ton Portland imentosu üretmek için atmosfere bir ton daha CO₂ salınır ve dünya çapında tüm CO₂'nin %7'si bu endüstri tarafından üretilir. YFC, hızla soğutulmuş erimiş YFC'den oluşan camsı granüle malzemedir. Cüruf düzenli olarak yaklaşık %50'ye kadar ve bazen %70-80'e kadar çimentonun yerine ikame edilir. Cüruf, betonun kimyasal stabilitesini ve mukavemetini arttırır ve ayrıca hidrasyon ısısını azaltır (Meyer 2009). Beton sektörünün amacı, Portland imentosunu mümkün olduğunca diğer çimentolu malzemelerle, özellikle de diğer endüstrilerin atık malzemeleriyle değiştirmektir.

Beton karışımlarında hâlihazırda kullanılan tamamlayıcı çimentolu malzemeler arasında uçucu kül, silis dumanı, elik cürufu ve YFC yer almaktadır. YFC kullanımı kısıtlanmadığında sera gazı emisyonları yaklaşık %47,5 oranında azalır. Ancak YFC'nin beton karışımında kullanımı kısıtlı olduğundan sera gazı emisyonlarında %47,5'lik bir azalmanın sağlanması mümkün değildir (Crossin 2015). Bu kısıtlamanın nedeni YFC'nin hidrasyon hızının yavaş olması ve YFC'nin erken yaştaki basınç dayanımının düşük olması ile ilgilidir. Kireçtaşının eklenmesi, YFC'nin erken mukavemeti sorununu çözecektir ve YFC'nin sonraki mukavemet, gözeneklerin imentolama malzemeleriyle arındırılmasıyla artırılacaktır (Menendez ve diğ. 2003). CO₂, CaCO₃'n CaO'ya kalsinasyonu, mineral üretimi ve taşınması için kullanılan fosil yakıtların yanmasından gelir (Crossin 2015).

Beton, inşaat malzemesi olarak çok büyük miktarlarda kullanılıyor ve istatistikler, her insanın her yıl dünyada üretilen 3-3,8 ton betonu kullandığını gösteriyor. Sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik potansiyel bir strateji, beton retiminde Portland imentosu yerine mümkün olduğunca fazla YFC kullanmaktır. Beton retiminde YFC kullanılarak Sera Gazı (GHG) emisyonu %22-40 oranında azaltılabilir (Crossin 2015). Ancak YFC'nin işlenmesi ve taşınmasından kaynaklanan emisyonların hesaplanması önemlidir. Ancak YFC atık bir malzeme olduğundan katkısı hariç tutulmuştur (Crossin 2015). YFC, imento ve beton uygulamalarında, özellikle de yüksek performanslı betonda halihazırda yüksek oranda kullanılmaktadır. YFC'nin kullanılmasının temel nedeni şekli ve mikroagregat etkisidir. Ayrıca ğtme metodolojisi YFC'nin karakterizasyonunu etkileyecektir (Wan vd. 2004). İnce ğtme yüzey alanını arttırır ve bu da mekanik

aktivasyonu artıracaktır. Mekanik reaktivite arttığında beton ve çimentonun dayanımı da artacaktır (Kumar vd., 2008).

Cürufun stabilitesi ve kimyasal dayanıklılığı, kaldırımların yanı sıra inşaat malzemelerinde de kullanıldığı için önemlidir (Kuo vd. 2007); ve YFC, beton üretiminde Portland çimentosunun %35-65'inin yerini alabilir (Nazari ve Riahi 2011). Portland çimentosunu YFC ile değiştirirsek CO₂ emisyonu azalacak ve bu ikame miktarının CO₂ emisyonu üzerinde etkisi olacaktır. Üstelik cürufun öğütülmesi sırasında Portland çimentosu üretimi için gereken enerjinin yalnızca %25'i kullanıldığından enerji tasarrufu sağlanır. Beton imalat sürecinde Portland çimentosu yerine yüksek miktarda SiO₂ içeren YFC kullanıldığında betonun mukavemeti ve su geçirgenliği artacaktır (Nazari ve Riahi 2011).

YFC'nin ağırlıkça yaklaşık %45'e kadar kullanılması betonun çekme mukavemetinin artırılması açısından faydalıdır. Bu miktarın fazlası CaO miktarı azaldığı için uygun değildir ancak beton yapıda bulunması gerekmektedir (Nazari ve Riahi 2011).

2.3 Cam Tozu

Cam, ambalaj, sofa eşyaları, pencereler ve birçok başka uygulamada kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan cam türü sodalime camdır. Sodalime cam, esas olarak silika kumu, sodalı kül ve kalkerden yapılmıştır. Cam, yeni cam ürünlerine sonsuz bir şekilde geri dönüştürülebileceği benzersiz bir özelliكتedir, ancak tüm camlar yeni ambalajlar için geri dönüştürülemez. Camın yaklaşık %80'i geri dönüşüme tabi tutulmak yerine depolama alanlarına gömülür (Meierhoff 2014). Camı geri dönüştüren şirketler, camın içinde bulunan minerallere bağlı olan rengi belirleyen belirli renklerde camlara ihtiyaç duyarlar, bu da camın erime noktasını belirler. Renk sıralaması mümkündür, ancak sıralama işlemi cam parçalarının minimum boyutuyla sınırlıdır; çünkü bu parçalar kolayca kırılır ve toplama, ayırıştırma ve cam sıralama merkezlerine dağıtım sırasında zarar görebilirler. Camın sıralama yerlerine taşınması, geri dönüştürülmüş camın maliyetinin başlıca katkıda bulunan unsurdur.

Geçtiğimiz birkaç on yılda, kaynakların korunması ve atıkların uygun yönetim yoluyla geri dönüştürülmesi konusunda büyük değişiklikler meydana gelmiştir. Geri dönüştürülmüş malzemelerin inşaatta kullanılması, mevcut büyük miktarlarda atık malzeme ve yaygın inşaat alanları nedeniyle en ilginç seçeneklerden biridir (Shi ve Zheng, 2007). Geri dönüştürülmüş atık malzemelerin inşaat işleri için kullanılması anlayışı, uçucu kül, cüruf, silis dumanı, kauçuk lastikler, genişletilmiş polistiren, seramik ve plastik gibi malzemeleri içeren sürekli ve başarılı bir geçmişe sahiptir. Betonun bir bileşeni olarak zorluklarla karşılaşmaya devam eden bir diğer atık malzeme ise camdır (Federico ve Chidiac, 2009). Cam, insanın günlük yaşamında yaygın olarak kullanılan malzemelerden biri olduğundan, her yıl çeşitli şekillerde büyük miktarlarda cam üretilmektedir; en yaygın olanı soda-kireç silika camıdır. Bu büyük ölçekli üretim, önemli miktarda camın geri dönüşüm ihtiyacının artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle inşaat sektöründe cam atıklarının beton bileşiminde kullanılabilmesi için çeşitli araştırmalar yapılmaktadır.

Atık cam, geopolimer öncüsü olarak kullanılmadan önce ezilip öğütülmesi gerekir. 2.5 mm'den daha büyük cam parçaları levha şeklinde ve düz kenarlı olabilir, ancak ezme ve öğütme ile daha yuvarlak hale gelirler. Daha küçük parçalar genellikle altıgen şekilli ve pürüzsüz, düz bir yüzey dokusuna sahiptir (Christiansen 2013; Polley vd. 1998).

Cam yüksek miktarda silika içerir ve hem geopolimer öncüleri hem de aktivatörlerinde önemli bir bileşendir. Atık cam veya cam kütlesi, geopolimerler için düşünülen en yeni öncü seçeneklerden biridir. Christiansen, Cyr vd., Puertas ve Torres-Carrasco, ve Redden ve Neithalath gibi araştırmacılar tarafından atık camın geopolimerlerde kullanımı üzerine çalışmalar yapılmıştır; ayrıca Asya'da LCD camının geopolimer öncüsü olarak kullanımıyla ilgili çalışmalar da vardır.

Malzemenin yeterince ince olması koşuluyla cam iyi bir puzolanik malzeme olarak kabul edilebilir, dolayısıyla camın betonda faydalı bir şekilde kullanılması beklenmektedir. Betondaki genleşme aralığının tahmin edilmesinde cam parçacıklarının boyutu önemli bir rol oynar. Betondaki genleşme kaba cam parçacıkları için en kötüsüdür; ancak daha ince cam boyutlarında ihmal edilebilir genleşme meydana gelir. Cam boyutunun önemli bir etkisi, dayanıklılık sorunlarını teşvik eden, kırma işlemi sırasında cam yapısının iç mikro çatlamalarıdır (Mackechnie ve Munn, 2012). Ayrıca, atık camla ilişkili, betonda etkin kullanımına engel olabilecek ve ele alınması gereken birkaç risk daha vardır (Sullivan ve Horwitz-Bennett, 2012).

Son birkaç on yılda, atık camın betonda kullanımıyla ilgili konulara dikkat çeken önemli araştırma çalışmaları yapılmıştır (Meyer ve Baxter, 1996, 1998; Pollery ve Cramer, 1998; Bazant vd., 2000; Dyer ve Dhir, 2001; Byars vd., 2004; Dhir vd., 2004; Shi vd., 2004; Shayan ve Xu, 2004, 2005; Mackechnie ve Munn, 2012). Bunlar kaba camın betonun işlenebilirlik, hava içeriği, mukavemet gibi özellikleri ve özellikle alkali-silika reaksiyonu üzerindeki zararlı etkilerini içerir.

(Christiansen 2013), farklı alumina içeriklerine sahip iki tür atık cam kullanılarak yapılan geopolimerlerin basınç dayanımını, mikroyapısını ve bileşimini araştırmıştır.(Cyr vd. 2012), camın inceliği, sentez sıcaklığı ve aktivatörün doğası ve konsantrasyonuna bağlı olarak sodalı cam geopolimerlerinin basınç dayanımını ve dayanıklılığını değerlenmiştir. (Redden ve Neithalath 2014), camın başlıca kaynak malzemesi olarak kullanıldığı alkali aktivasyon bağlayıcıların dayanım gelişimini, mikroyapısını ve reaksiyon ürünlerini, ve hidrolitik stabilitesini araştırmıştır. Kullanılan cam tozu, endüstriyel ve karayolu güvenlik cam boncuk üretiminin bir yan ürünüdür.

Daha ince cam ve daha yüksek alumina içerikleri, cam esaslı geopolimerlerin daha yüksek basınç dayanımlarına yol açtı. Kullanılan aktivatörün molalitesi de önemli bir faktördü; optimal dayanımlar, 5M ila 10M NaOH veya KOH ile aktive edildiğinde elde edilmiştir. Cam esaslı geopolimerler sürekli olarak nemle temas halinde olduğunda bazı basınç dayanımı kayıpları gözlemlenmiştir; düşük sıcaklıkta iyileşme ve düşük alumina içeriği daha fazla dayanım kaybına yol açmıştır (Christiansen 2013; Cyr vd. 2012; Redden ve Neithalath 2014).

Puertas ve Torres-Carrasco, cam atığının NaOH/Na₂CO₃ içinde çözüldüğü ve YFC için bir aktivatör olarak kullanılmasının etkilerini değerlendirmiştir. Atık camdan çözünen silikonun, cürufu aktive ederken su camındaki silikonla benzer etkilere sahip olduğu ve test edilen hamur özelliklerindeki farklılıkların SiO₂/Na₂O oranlarındaki farklılıktan kaynaklandığı bulunmuştur.

Agrega ikamesi olarak cam hâlihazırda birçok araştırmanın odak noktası olmasına rağmen, çimentonun camla kısmi ikamesi üzerine sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Sonuç olarak, dünya çapında agregaya yerine cam kullanılmıştır, ancak cam tozunun çimento ikamesi olarak etkinliğine ilişkin mevcut kanıt eksikliği nedeniyle, çimentonun camla kısmi ikamesi nadirdir. Bu nedenle betona çimento yerine cam eklenmesinin araştırılmasına büyük ilgi vardır. Çimento yerine camın betona eklenmesinin, nispeten büyük miktarlardaki silikon ve kalsiyum nedeniyle, ince öğütüldüğünde çimento gibi özellikler sağlaması nedeniyle genel davranışını geliştirmesi beklenmektedir. Cam tozu Şekil 2.3’de görülmektedir.



Şekil 2.3: Cam tozu

2.3.1. Camın fiziksel yapısı ve özellikleri

Camların yoğunluk değerleri, 2,20 g/cm³ ile 8,00 g/cm³ arasında değişmektedir ve bu değişkenlik camın kullanım amacına bağlı olarak belirlenen teknik özellikleri elde etmek amacıyla kullanılan hammadde miktarlarındaki oranlardan kaynaklanmaktadır.

Yoğunluğu artırmak istendiğinde, genellikle karışıma ZnO, BaO ve PbO oksitleri gibi belirli oksitler eklenir. Bu oksitlerin ilavesi, camın yoğunluğunu etkili bir şekilde artırmaktadır. Mohr sertlik cetveline göre, normal bir camın sertliği 5 ile 6 arasında değişmektedir, bu da apatit ile feldspat arasında bir sertlik seviyesini ifade etmektedir. Bu

sertlik seviyesi, camın çizilmemesi anlamına gelir ve dolayısıyla cam, uzun süre boyunca saydamlığını ve parlaklığını korur.

Camın aşınma direnci, içeriğinde bulunan hammaddeye bağlıdır. Aşınma direncini artıran oksitler arasında SiO_2 ve B_2O_3 bulunurken, aşınma direncini azaltan oksitler ise Na_2O , CaO ve PbO 'dur (Günay ve Yılmaz, 2010). Bu özellikler, camın dayanıklılığı ve kullanım amacına uygunluğu açısından önemli bir rol oynamaktadır.

2.3.2. Camın kimyasal yapısı ve özellikleri

Camlar genellikle normal şartlar altında su ve nötr sıvılara karşı hassasiyet göstermez ve bu tür ortamlardan etkilenmezler. Ancak, silika camları yüksek sıcaklıklarda suya karşı hassas olabilir. Örneğin, 25°C sıcaklıkta, amorf silikanın suda çözünme oranı %0,012'dir. Bu oran, sıcaklığın artmasıyla doğru orantılı olarak artar. Bu durumun sonucunda iyonize olmamış monomerik silisik asit (SiOH_4) meydana gelir.

Hidroflorik asit (HF), cam malzemeyi etkileyebilen bir sıvıdır. Genel olarak, cam malzemenin asitlere karşı dayanıklılığı yüksektir; ancak hidroflorik asit ve yüksek sıcaklıklardaki fosforik asit, özellikle silika camını etkileyebilir. Silika ile hidroflorik asit arasındaki etkileşim Denklem 2.3'de gösterilmektedir (Günay ve Yılmaz, 2010).



Hidroflorik asidin cam üzerindeki etkisi, camı parlatmak ve çeşitli amaçlar için aşındırmak amacıyla cam sanayinde kullanılmaktadır.

Su ve nemli ortama dayanıklı cam üretmek için cama kireçtaşı veya kalker eklemek gerekmektedir. Kireçtaşı veya kalker ilave edilen cam ürünleri, nemli ortamlara ve suya karşı dayanıklılık gösterir ve özelliklerini kaybetmeden kararlı bir davranış sergiler. Çizelge 2.2'de farklı türdeki camlar için oksitlerin ağırlıkça yüzde oranları verilmiştir (Günay ve Yılmaz, 2010). Bu oranlar, camın özelliklerini belirleyen oksitlerin miktarını göstererek, camın dayanıklılığı ve özel kullanım amaçlarına uygunluğu üzerinde etkilidir.

Çizelge 2.2: Camlardaki oksit oranları (% ağırlıkça)

Oksit	Pencere	Şişe	Lamba
SiO_2	73	74	72
Na_2O	14	13	16
K_2O	0	0,3	1
MgO	4	0,2	4
CaO	9	11	3
Al_2O_3	0,1	15	2
Fe_2O_3	0,1	0,04	0
SO_2	0	0,2	0

2.3.3. Camın mekanik yapısı ve özellikleri

Camlar, gevrek malzemeler olarak bilinir ve çekme ile basınç dayanımları arasında büyük farklar gösterir. Camların çekme dayanımı genellikle 0.05 GPa civarında olup, buna karşın basınç dayanımı 1.00 GPa'a kadar çıkabilir. Bu durum, basınç ve çekme dayanımları arasındaki oranın 20 misli olduğunu gösterir. Elastisite modülü ise 10 GPa ile 200 GPa arasında değişiklik gösterir.

Basınç ve çekme dayanımı ile elastisite modülündeki bu değişiklikler, camın bileşimindeki hammadde oranlarıyla doğrudan ilişkilidir. Bu değerler, özellikle SiO₂ miktarının artışıyla doğru orantılı olarak artar. Yani, camın içeriğindeki silika miktarının artması, genel dayanıklılığı ve elastik özellikleri olumlu yönde etkiler (Günay ve Yılmaz, 2010).

2.4 Beton üzerinde klasik sülfat saldırısı ve etkileri

Zemin mühendisliğinde, yapıların temelleri, yeraltı suları ve zeminin içindeki birçok bileşenin etkisi altında kalmaktadır. Bu su ve diğer malzemeler, yapı temellerine etki ederek beton malzemenin yapısını bozabilir ve ciddi zararlara neden olabilir.

Beton, çimento, agrega, su ve gerektiğinde katkı maddelerinin belirli oranlarda homojen olarak karıştırılmasıyla elde edilen bir kompozit yapı malzemesidir. Başlangıçta plastik kıvamda olan beton, zamanla çimentonun hidratasyonu sebebiyle katılaşır, istenilen kalıbın şeklini alarak sertleşir. Beton, en çok tercih edilen yapı malzemelerinden birisidir, ancak temel yapılarında ve genel olarak yapıda dış ve iç etkilere maruz kaldığı için önemli bir malzemedir.

Betonun zarar görmesine neden olan birçok etmen bulunmaktadır. Bu etmenlerden bazıları, betonun iç ve dış yapısının zarar görmesine yol açar. Sülfat etkisi, betonun zarar görmesine neden olan önemli etkilerden biridir. Sülfat, çimentonun bazı bileşenleriyle etkileşime girerek betonun zamanla bozulmasına neden olur. Ayrıca sülfat içeren iyonlar, sertleşmiş betondaki hidrat bileşenlerle kimyasal etkileşime girerek yeni ürünlerin oluşmasına sebep olabilir. Bu durum, betonun hızlı bozulmasına ve çatlakların oluşmasına yol açabilir (Baradan ve diğ., 2002; Akman, 1990). Şekil 2.4'de sülfat etkisinin görsel bir temsili bulunmaktadır.



Şekil 2.4: Sülfat etkisine maruz kalmış yapı elemanları

Sülfat etkisiyle oluşan ürünler, betonda genleşmeye neden olarak çatlaklara ve dağılmaya yol açar. Bu durum, agrega-çimento bütünlüğünü etkileyerek betonun dayanımının azalmasına sebep olur. Sülfat saldırısına maruz kalmış betonun klasik görünümü genellikle beyaz lekeler, çatlaklar ve dökülmelerle karakterizedir. Özellikle köşe ve kenarlardan başlayarak tüm kütleye yayılan bu etkiler, beton yüzeyinin tabaka tabaka büyük parçalar halinde parçalanması şeklinde ortaya çıkar. Sülfat saldırısının sonucunda, betonun kolayca ufalanabildiği ve yumuşadığı gözlemlenir.

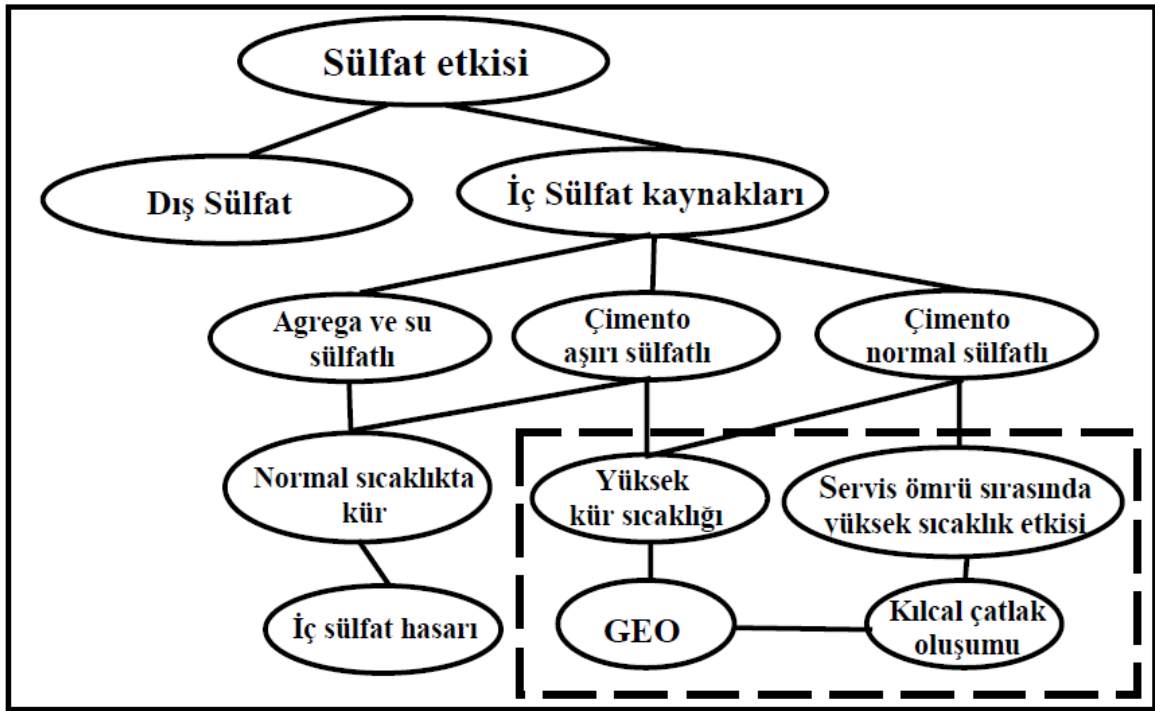
Betonun ana bileşeni olan çimento üretimi sırasında, trikalsiyum alümina (C_3A) bileşeninin ani prizini önlemek için çimentoya az miktarda alçı taşı (kalsiyum sülfat) eklenir. Ancak, çimento standartları genellikle çimento ağırlığının belirli bir oranında alçıtaşı miktarını sınırlar. Bu sınırlama, zamana bağlı genleşmenin ve betonun mukavemetinin etkilenmesini önlemeye yöneliktir.

Ancak, zemini oluşturan malzeme içinde bulunan tuzlar, su ile birlikte bulunduklarında çözünerek çimento harcı ile reaksiyona girerler. Bazı killere ise içeriklerinde alkali, magnezyum ve kalsiyum sülfatlar gibi kimyasal maddeler içerebilir; bu maddeler yeraltı suyu ile birleşip su ile çözünerek olumsuz etkilerin oluşmasına neden olabilirler. Bu tuzların betona zarar verme potansiyeli, su ile birleştiklerinde ortaya çıkar.

Zeminde oluşan tuz birikintileri arasında sodyum sülfat (Na_2SO_4) ve magnezyum sülfat ($MgSO_4$) bulunabilmektedir. Bu birikimler, nispeten kuru iklimlerde fazla buharlaşma sonucu, yeraltında bulunan tuz tabakalarındaki çözünebilir sülfatların yukarıya emilip tırmanması sonucu oluştuğu düşünülmektedir (Erdoğan, 2003; Ilıca, 2008). Doğal alçı taşı ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) tabakalarındaki sülfat içeriği oldukça yüksektir. Bu tabakaların çözünürlükleri düşük olduğundan etki daha kısıtlı ve yerel kalır; ancak uzun süre açıkta kalmaları durumunda, bu tabakalar sodyum sülfat ve magnezyum sülfat gibi daha kolay

eriyebilen tuzlara dönüşebilirler. Bu tuzlar suda çözüldükten sonra beton için zararlı çözeltilere dönüşebilirler.

Sülfat etkisine maruz kalan betonlarda etki, iç kaynaklı veya dış kaynaklı olmak üzere iki farklı etkileşim sistemi şeklinde meydana gelmektedir (Şekil 2.5). İç kaynaklı sülfat etkisi, agregalarda bulunan veya erken yaşlardaki yüksek sıcaklıklar nedeniyle çimento hamurunda oluşan alçının reaksiyona girmesi sonucu ortaya çıkar. Diğer yandan, dış kaynaklı sülfat etkisi, yeraltı suları, deniz suyu, atık sular gibi kaynaklardaki sülfatların betona nüfuz etmesi sonucu meydana gelir. İç kaynaklı sülfat etkisi betonu oluşturan kütlede her bölgesinde oluşabilirken, dış kaynaklı etki daha çok yüzeyde ve yüzeye yakın kısımlarda görülür.



Şekil 2.5: Klasik sülfat etkisinin şematik olarak gruplandırılması

2.4.1 Sülfat saldırısı

Sülfata saldırısı oldukça karmaşık bir süreçtir ve Portland çimentosu tarafından üretilen tüm hidrasyon ürünlerini içerebilir. Sülfat saldırısının neden olduğu hasar, betonun genelinde çatlama ve genişlemeyi, aynı zamanda çimento hamurunun yumuşamasını ve dağılmasını içerebilir (Mindess vd., 2003).

Dış sülfat saldırısının sorunu ilk kez 1908'de Amerika Birleşik Devletleri Sulama Bürosu tarafından tanımlanmıştır (Bellport, 1968). O zamandan beri, nedenlerin, mekanizmanın, sonuçların ve önlemlerinin belirlenmesi için birçok çaba harcanmıştır. Sülfat saldırısıyla ilgili neredeyse tüm araştırma raporları, Genel Kullanım Çimentosunun tek başına sülfat içeren ortamlarda etkisiz olduğunu belirtmiştir. Genel kullanım çimentosunun kimyasal bileşikleri, özellikle üç kalsiyum alüminat (C_3A) ve hidrasyon ürünü kalsiyum hidroksit

(CH), sülfat saldırısına duyarlı bileşikler olarak kabul edilmiştir. Sülfat iyonları sertleşmiş betona girer ve üç kalsiyum alüminatı veya monosülfatı etrenjit adı verilen genişleyici ve bozucu bir bileşik oluşturmak için reaksiyona girer (Mehta ve Monteiro, 2006; Mindess vd., 2003). Sülfat iyonları ayrıca CH ile reaksiyona girer ve sertleşmiş betonda alçı oluşur. Sertleşmiş betonda aşırı alçı oluşumu alçı korozyonuna neden olur (Mindess vd., 2003).

Sodyum sülfatın potansiyel dış kaynakları endüstriyel kimyasallar, gübreler, deniz suyu, kanalizasyon suyu, deniz kıyısı ve eski deniz tabanı toprakları olarak bulunmuştur. Benzer şekilde, çimento üretimi sırasında eklenen alçı, Ek Malzemelerde (SCM) bulunan sülfat ve bazı alçı kontamine agregaların iç kaynakları olarak bulunmuştur (Neville, 1996; Skalny vd., 2003).

2.4.2 Sülfat saldırı mekanizması

Sodyum sülfatın çimento hamuruna saldırma mekanizması olarak iki farklı mekanizma rapor edilmiştir - fiziksel ve kimyasal (Mehta ve Monteiro 2006, Mindess vd. 2003, Skalny vd. 2003).

2.4.2.1 Sülfat kristalleşmesine bağlı fiziksel saldırı

Geçirgen bir beton yapısı sülfat içeren sulu bir ortama maruz kaldığında, sülfat (tuz) çözeltileri, difüzyon, emicilik veya kılcal emme gibi çeşitli yollarla betona girer. Bu tuz çözeltileri, kılcal etki sayesinde yapıların içine yükselir. Bu çözeltiler buharlaşma önüne yaklaştıkça nemin giderek kaybı nedeniyle kristalleşmeye başlar. Sodyum sülfat ve magnezyum sülfat gibi bazı tuz türleri, çevrenin sıcaklığına bağlı olarak kristalleşme sırasında fazlarını değiştirir. Çevrenin sıcaklığı 32.4°C'nin üzerindeyse, anhidrat sodyum sülfat (Na_2SO_4) kristali oluşur. Çevrenin sıcaklığı 32.4°C'nin altındaysa, hidratlı sodyum sülfat ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) kristali oluşur. Sıcaklığın 32°C'nin üstünde ve altında dalgalanması durumunda, sodyum sülfat sürekli olarak fazını değiştirir. Benzer şekilde, magnezyum sülfat da anhidrat magnezyum sülfattan (MgSO_4) monohidrata ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ve monohidratıdan liyohidrata ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ve liyohidrattan heptahidrata magnezyum sülfata ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) dönüşür. Bu sülfatların kristalleşme sonucu hacimleri artar. Faz değişimi ve genleşme nedeniyle, bu sülfat kristalleri beton yüzeyine kristal büyüme basıncı uygular; bu da yüzeyde dökülme, dökülme ve çatlak oluşumuna neden olur. Eğer kılcal etki nedeniyle tuz çözeltisinin göç hızı buharlaşma hızından daha düşükse, kristalleşme yeraltı yüzeyinin altında meydana gelir.

2.4.2.2 Kimyasal bağlanma

Kimyasal saldırı, sertleşmiş betonda sülfat iyonlarının varlığından kaynaklanır. Sülfatta saldırı mekanizmasını daha iyi anlamak için, normal Portland çimentosunun hidrasyon mekanizmasını anlamak önemlidir. Portland çimentosu üç kalsiyum silikat, iki kalsiyum silikat, üç kalsiyum alüminyum ve dört kalsiyum alüminoferrat bileşiminden oluşur. Çimento su ile karıştırıldığında, iki kalsiyum silikat ve üç kalsiyum silikat su ile reaksiyona girer ve kalsiyum hidroksit ve kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) oluşturur.



Alçı, üç kalsiyum alüminyum ile reaksiyona girer ve stabil etrenjiti oluşturur.



Denklem 2.6' daki etrenjit, beton plastik aşamadayken çimentonun hidrasyonu sırasında oluşur. Hidrasyonun başlangıç aşamasında etrenjit oluşumu, C3A'nın erken hidrasyonunu geciktirerek anlık sertleşmeyi önlemeye yardımcı olan çimento hidratasyon reaksiyonunun tamamlayıcı bir parçasıdır. Hidrasyonun başlangıç aşamasında oluşan etrenjit, betonda genleşme çatlamasına neden olmaz çünkü beton hala plastik durumdadır ve hacim değişikliklerini karşılayabilir.

Eğer çimentoda kireç taşı (C_3A) ile uygun miktarda alçı varsa, çimentonun tamamıyla etrenjit oluşturacak şekilde tepkimeye girer, aksi takdirde fazla miktarda kireç taşı etrenjit ile tepkimeye girerek onu monosülfat'a dönüştürür.



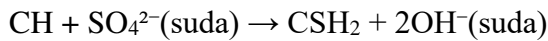
2.4.2.3 Dış sülfat kaynaklarına kimyasal saldırı

Eğer beton yapı, sülfat içeren bir ortamda ve geçirgen bir zeminde bulunuyorsa, sülfat iyonları difüzyon, emicilik veya kılcal emme yoluyla betona nüfuz edebilir ve hidrasyon ürünleri ile reaksiyona girerek etrenjit ve alçı oluşturabilir. Betonun sertleşmiş halinde etrenjit ve alçı oluşumu yaygındır.

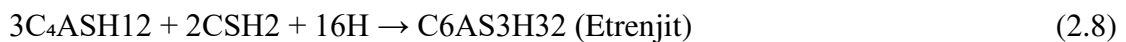
Sülfat saldırısının hızı çözeltilerin gücüyle artar. Ancak, tipik olarak yaklaşık olarak magnezyum sülfat için %0.5 veya sodyum sülfat için %1 konsantrasyon eşiği aşıldığında, saldırının yoğunluğundaki artış hızı azalır (Neville, 2006).

2.4.2.4 Sertleşmiş betonda etrenjit oluşumu

Etrenjit, sertleşmiş betonda bir veya birden fazla mekanizmanın birleşiminden oluşabilir. Sülfat iyonları beton yapılarına girdikçe, kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girer ve alçıtaşı (gypsum) (CSH_2) oluşturur.



Alçıtaşı, denklem 4'te oluşan monosülfat ile reaksiyona girer ve etrenjit oluşturur.



Alçıtaşı ayrıca kalsiyum alüminat hidratın reaksiyonu ile etrenjit oluşturur.



Etrenjit ayrıca sülfat iyonu, monosülfat, kalsiyum hidroksit ve suyun reaksiyonu ile de oluşur.



Denklem 8'de oluşan etrenjit, %55 daha fazla katı hacim kaplar ve bu da pasta içinde hacim genişlemesine neden olarak iç gerilme oluşturur ve çatlamaya yol açar (Mindess ve diğerleri 2003). Hacim genişlemesi, etrenjit mikro kristalin formda olduğunda su emilimi ile de meydana gelebilir (Mindess vd 2003). Sülfat saldırısına maruz kalan bir numunenin ardışık katmanlarının çıkarılması ve elde edilen yüzeylerin analizi, yüzeyden numunenin çekirdeğine doğru alçıtaşı, ardından etrenjit ve ardından monosülfatın varlığını göstermiştir; bu sırada portlandit miktarı yüzeye doğru azalmaktadır (Taylor 1997). Etrenjit yüzey tabakasında oluşur, bu da bu tabakada çatlamaya ve sülfat iyonlarının henüz girmediği sonraki tabakalarda daha az çatlamaya yol açar. Etrenjit bu ikinci tabakada oluştuğunda, bir sonraki istila edilmemiş tabakada çatlamaya neden olurken, kendi genişlemesi üçüncü tabakanın varlığı tarafından engellenir (Santhanam ve Cohen 1998).

2.4.2.5 Jips oluşumu

Eğer alçıtaşı ile reaksiyona girecek monosülfat ve/veya kalsiyum alüminat hidrat yoksa veya aşırı miktarda kalsiyum hidroksit ile reaksiyona bağlı olarak aşırı miktarda alçıtaşı oluşuyorsa, beton içindeki alçıtaşı serbest halde kalır. Sertleşmiş beton içindeki alçıtaşının oluşumu ve birikimi, bir tür sülfat saldırısıdır. Alçıtaşı oluşumu nedeniyle sülfat saldırısına maruz kalan çoğu yapı, dış yüzeyde dökülme, beton yüzey dokusunun yumuşaması ve basınç dayanımının kaybı ile karakterize edilir (Aziz vd 2005). Mehta (1973) tarafından yapılan çalışmaya göre, alçıtaşı oluşumu yalnızca pH çözeltisinin 8 ile 11.5 arasında olduğu durumlarda beton içinde gerçekleşir. Ancak, sertleşmiş betonda oluşan alçıtaşının etkisi konusunda görüş ayrılıkları vardır. Bir görüşe göre, sertleşmiş pastada alçıtaşı oluşumu genişlemeye neden olur (Mindess vd 2003, Santhanam vd 2003, Tian ve Cohen 2000a, Tian ve Cohen 2000b, Mehta 1992), diğer bir görüşe göre ise alçıtaşı genişlemeye neden olmaz (Hansen 1963, Mather 1996).

2.4.2.6 İç sülfat kaynaklarından kaynaklanan kimyasal saldırı

Alçıtaşı, klinkerin son öğütülmesi sırasında çimentoya eklenen ve priz süresini düzenlemek ve erken mukavemet sağlamak için kullanılan iç sülfat kaynaklarından biridir. Alçıtaşının yanı sıra, çimento betonu yavaşça çözünen sülfat içeren klinker, alçıtaşı ile kirlenmiş agregalar ve uçucu kül gibi katkı maddeleri gibi diğer iç sülfat kaynaklarını da içerebilir (Skalny vd 2003, Neville 1996). Zamanla ve uygun çevre koşullarıyla, bu sülfatlar C3A veya monosülfat veya C-A-H ile reaksiyona girerek sertleşmiş betonda etrenjit oluşturabilir ve genişlemeye ve bozulmaya neden olabilir, bu da iç sülfat saldırısı olarak adlandırılır.

2.4.2.7 Sülfat saldırısının önlenmesi

Yukarıdaki denklemlerden (Denklem 2.4'den 2.10'a kadar) anlaşılmaktadır ki sülfat saldırısı, sülfat iyonu ile trikalsiyum alüminat ve/veya kalsiyum hidroksit içeren reaksiyonların bir sonucudur. Bu nedenle, sertleşmiş betonda bu maddelerden bir veya daha fazlasının varlığının azaltılması veya ortadan kaldırılması sülfat saldırısını

önleyebilir. Betonun dış kaynaklardan sülfat iyonlarının girişini önleyerek sülfat iyonlarının varlığını en aza indirmek, betonun geçirgenliğinin azaltılmasıyla sağlanabilir. Geçirgenliğin azaltılması, su/çimento oranının (w/c) en aza indirilmesi ve belirli türdeki mineral katkı maddelerinin kullanılmasıyla mümkündür (Mehta ve Monteiro 2006, Neville 1996). Daha düşük geçirgenlikte, belirli bir bağlayıcı türü için düşük su/çimento oranıyla hazırlanan numunelerde daha az genleşme gözlemlenmiştir (Khatri ve diğerleri). Benzer bir sonuç yüksek C3A içeren düşük sülfat dayanımlı çimento üzerinde yapılan bir deneyde elde edilmiştir. (Sahmaran ve diğerleri 2007) Azaltılmış geçirgenlik ile daha iyi sülfat direnci elde edilmiştir (Rasheeduzzafar 1992) azaltılmış klorür difüzyon katsayısı (Thomas ve diğerleri 1999) ve çimentoya silika dumanı katılması ile birlikte. Trikalsiyum silikatın (C_3S) hidratasyon sırasında dikalsiyum silikata (C_2S) göre 2.2 kat daha fazla kalsiyum hidroksit ürettiği için CMS/ CH_2S oranını azaltarak kalsiyum hidroksit üretimi sınırlandırılabilir (Neville 1996). Düşük C_3S/C_2S oranına sahip çimento kullanımı ile artan sülfat direnci elde edilmiştir (Rasheeduzzafar ve diğerleri 1990). Yüksek CMS içeriğine sahip tip V çimento için %0.10 genleşme 148 günde ulaşılmışken, düşük C_3S içeriğine sahip tip V çimento için aynı genleşme sülfat içeren ortamda 1260 günde ulaşılmıştır (Gonzalez ve Irassar 1998). Başka bir çalışmada (Sahmaran ve diğerleri 2007), yüksek C_3S/C_2S oranına (18.3) sahip sülfat dirençli Portland çimentosu (SRPC) ile hazırlanan harç çubuklarında zayıf sülfat direnci gözlemlenmiştir. Çimentoya mineral katkı maddeleri (SCM'ler) eklenmesi ile kalsiyum hidroksit üretimi en aza indirilebilir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Materyal

3.1.1 Yüksek fırın cürufu

Karabük ilindeki Karçimsa firmasından sağlanan Yüksek Fırın Cürufu (YFC), geopolimer beton üretiminde kullanılmıştır. Temin edilen YFC'nin özgül yüzeyi $3996 \text{ cm}^2/\text{g}$ ve özgül ağırlığı ise 2.86 g/cm^3 olarak belirlenmiştir. YFC'nin kimyasal bileşimi, Çizelge 3.1'de detaylı olarak sunulmuştur. YFC şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1: Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi

Bileşim (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
YFC	32.47	9.94	1.25	32.45	9.32	0.82
Bileşim (%)	S ⁻²	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	Cl ⁻
YFC	0.33	0.31	0.85	1.16	3.51	0.015



Şekil 3.1: Yüksek fırın cürufu

3.1.2 Agrega

Üretilen numunelerde, en büyük agrega tane çapı 8 mm olarak tespit edilmiştir. Geopolimer beton üretiminde, ince agrega olarak 0-4 mm tane çapına sahip dere kumu, iri agrega olarak ise 4-8 mm tane çapına dere agregası tercih edilmiştir. Beton üretiminde, ince agrega hacimce %65, iri agrega hacimce %35 olacak şekilde TS 802 (2016) standartlarına uygun olarak belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan agregalardan alınan örnekler üzerinde gerçekleştirilen deneyler ve elde edilen sonuçlar, Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde detaylı bir şekilde açıklanmıştır. İri ve ince agrega sırasıyla şekil 3.2 ve 3.3 gösterilmiştir.



Şekil 3.2: İri agrega



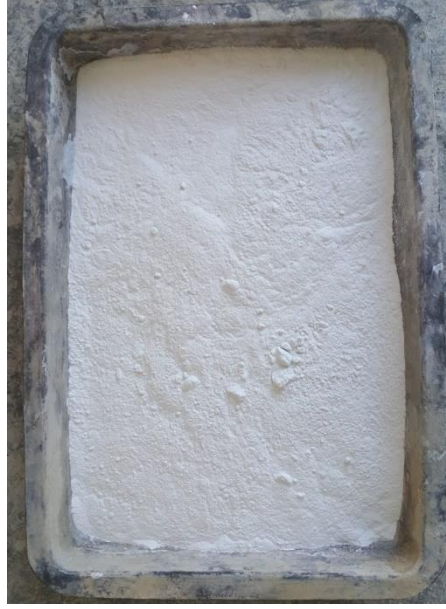
Şekil 3.3: İnce grega

3.1.3 Cam tozu

Bu çalışma kapsamında, AKÇİHAN Geri Dönüşüm Fabrikası'ndan tedarik edilen cam tozu kullanılmıştır. Cam tozunun özgül ağırlığı, 2.58 g/cm^3 olarak belirlenmiştir. Cam tozunun kimyasal bileşimi Çizelge 3.2'de verilmiştir olup, fiziksel görünümü Şekil 3.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2: Cam tozunun kimyasal bileşimi

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



Şekil 3.4: Cam Tozu

3.1.4 Aktivatör

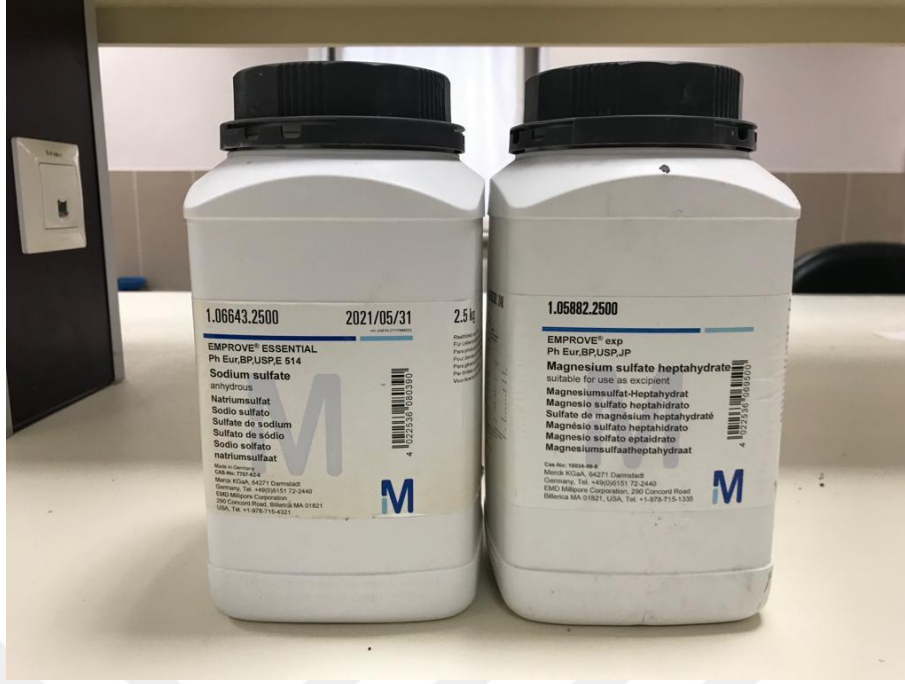
Bu tez çalışmasında YFC'yi aktive etmek amacıyla sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi kullanılmıştır. Musluk suyu kullanılarak 12 mol NaOH çözeltisi hazırlanmıştır. Deneylerde kullanılan NaOH'un kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'te sunulmuştur.

Çizelge 3.3: Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri

Özellikler	Sodyum Hidroksit
Molekül formülü	NaOH
Molekül kütlesi (g/mol)	40
Renk	Beyaz
pH	13-14
Bağıl yoğunluk (g/cm ³)	2.13

3.1.5 Sülfatlar

MgSO₄ ve Na₂SO₄, içme suyu ile ayrı ayrı %3 MgSO₄ ve %3 Na₂SO₄ konsantrasyonlu çözeltiler halinde hazırlanmıştır. Geopolimer beton numuneler bu çözeltiler de 4,8 ve 12 hafta bekletilmiş ardından numunelerin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, kılcal geçirimsizlik, ağırlık değişimi gibi beton özellikleri incelenmiştir. Deneyde kullanılan sülfatlar, Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

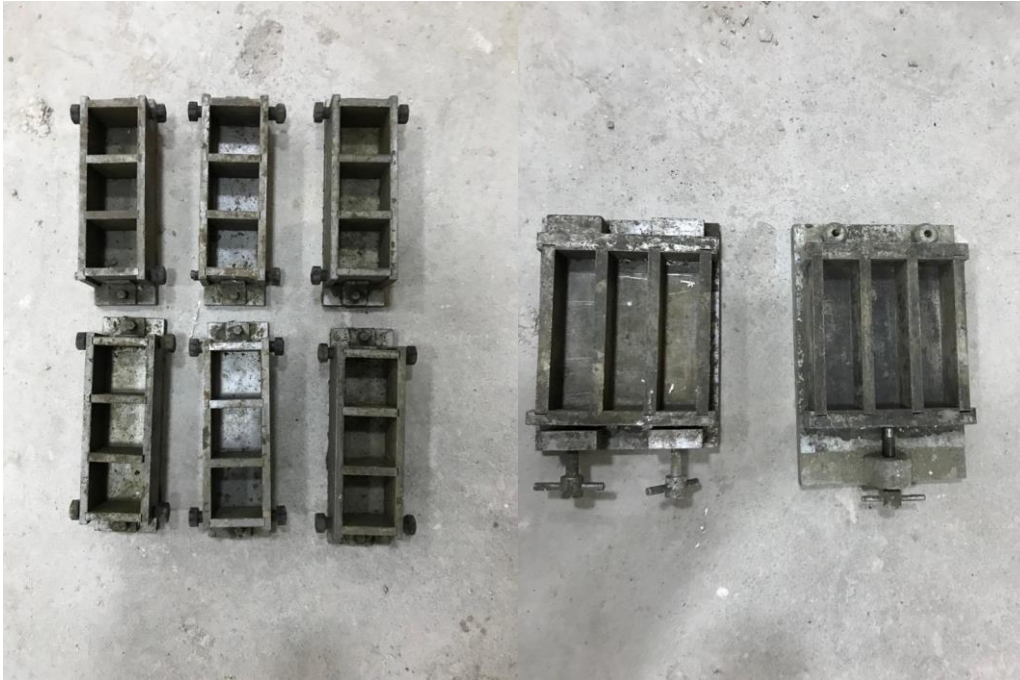


Şekil 3.5: Deneylerde kullanılan sülfatlar

3.1.6 Aletler

3.1.6.1 Çelik kalıplar

Geopolimer beton numuneleri, Şekil 3.6'da gösterilen ölçülere sahip olan 50x50x50 mm ve 40x40x160 mm boyutlarındaki çelik kalıplara yerleştirilmiştir.



Şekil 3.6: Çelik kalıplar

3.1.6.2 Beton karışım mikseri

Geopolimer beton üretiminde kullanılan malzemeleri homojen bir şekilde karıştırmak amacıyla ARMATEST marka laboratuvar tipi beton karışım mikseri tercih edilmiştir. Beton karışım mikseri, 5 litre kapasiteli olup düşük hızda karıştırma kabı yörüngesinde 62 devir/dakika, yüksek hızda karıştırma kabı yörüngesinde ise 125 devir/dakika hızda çalışma seçeneklerine sahiptir. Mikserin Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Beton beton mikseri

3.1.6.3 Hassas terazi

Çalışma aşamalarında ağırlık ölçümleri için Şekil 3.8’de görülen 0.01 g hassasiyetli terazi kullanılmıştır.



Şekil 3.8: Hassas terazi

3.1.6.4.Etv

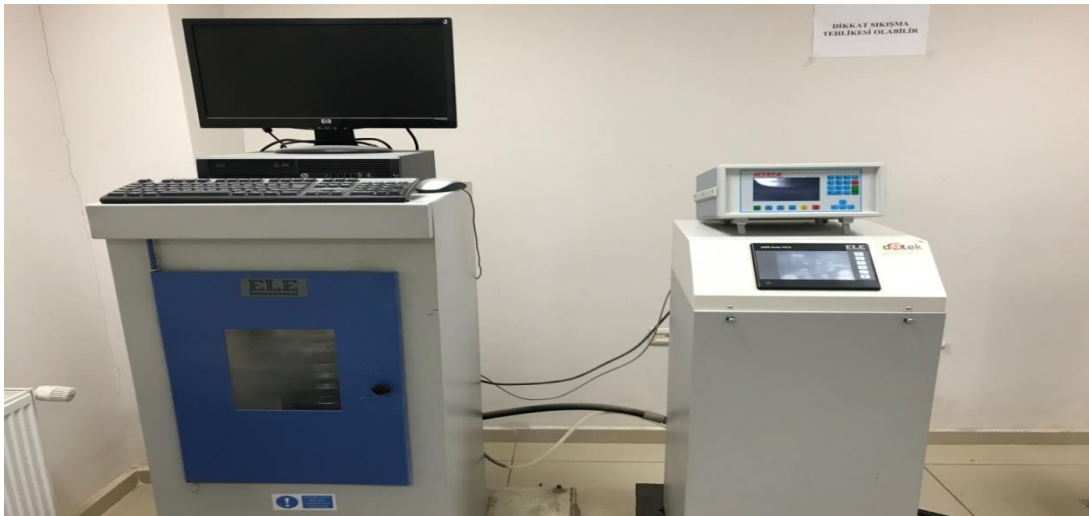
Sülfat sonrası numunelerin kılcal geirirnililik tayini deneylerinde Şekil 3.9'daki Mikrotest marka dijital termostatlı etv kullanılmıştır.



Şekil 3.9: Etüv cihazı

3.1.6.5 Basınç dayanım cihazı

Üretilen geopolimer numunelerin basınç dayanımlarını belirlemek için Şekil 3.10'da görülen ELE marka 3000 kN yükleme kapasitesine sahip tek eksenli basınç dayanım test cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.10: Basınç dayanım cihazı

3.1.6.6 Eğilme dayanım cihazı

Üretilen geopolimer numunelerin eğilme dayanımlarını belirlemek için Şekil 3.11’de görülen eğilme dayanım test cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.11: Eğilme dayanımı cihazı

3.1.6.7 pH metre

Hazırlanan sülfat çözeltilerin pH’larının ölçülmesi için Şekil 3.12’deki Hanna marka pH metre kullanılmıştır.



Şekil 3.12: pH metre

3.2 Yöntem

Bu bölümde, geopolimer betonun karışım oranlarının belirlenmesi, bu oranlara uygun karışımların hazırlanması, kalıplara dökülmesi ve kür edilmesi süreçleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, sülfat çözeltilerinin geopolimer beton numuneleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen ölçümler ve analizler de detaylı bir biçimde ele alınmıştır. Bu adımların özenle izlenmesi ve standartlara uygun olarak tamamlanması sağlanmıştır.

3.2.1 Geopolimer beton karışım seçeneklerinin belirlenmesi

Geopolimer beton üretiminde, bağlayıcı olarak YFC ve cam tozu kullanılmıştır. Bağlayıcı dozu, 400 kg/m³ olarak belirlenmiştir. YFC'nin yerine ağırlıkça %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında cam tozu içeren altı farklı grup geopolimer beton karışımı hazırlanmıştır (Çizelge 3.4). Literatür çalışmalarının incelenmesi ve laboratuvar deneyleri sonucunda optimum silis modülü 1.5, çözelti/bağlayıcı oranı 0.80 ve çözelti molaritesi 12 M olarak belirlenmiştir. Bu değerlere dayanarak aktivatör miktarı ve hacmi hesaplanmıştır. Toplam agrega hacmi, bağlayıcı miktarı ve aktivatör miktarının toplamının 1 m³'den çıkarılması ile bulunmuştur.

Çizelge 3.4: Geopolimer beton kodları

Geopolimer beton kodu	Ağırlıkça malzeme oranı (%)	
	CAM TOZU	YFC
C0	0	100
C1	10	90
C2	20	80
C3	30	70
C4	40	60
C5	50	50

Çizelge 3.5: Karışımda kullanılan malzeme miktarları

Karışımlar	C0	C1	C2	C3	C4	C5
YFC (kg)	400	360	320	280	240	200
Cam Tozu (kg)	0	40	80	120	160	200
İri agrega(kg)	575.18	575.18	575.18	575.18	575.18	575.18
İnce agrega(kg)	1035.94	1035.94	1035.94	1035.94	1035.94	1035.94
NaOH çözeltisi, (kg)	240	240	240	240	240	240

3.2.2 Geopolimer beton üretimi, numunelerin yerine konması ve kür edilmesi

Geopolimer beton üretimi için belirlenen malzemeler, 0.1 g hassasiyetli terazi kullanılarak titizlikle tartılmış ve karışıma hazır hale getirilmiştir. İlk aşamada alkali aktivatör çözeltisi hazırlanmış, ardından sırasıyla YFC, cam tozu ve agregası, beton karıştırma mikserine eklenerek homojen bir karışım elde edilmiştir. Hazırlanan geopolimer beton numuneleri, yağlanmış 50x50x50 mm ve 40x40x160 mm boyutlarına sahip çelik kalıplara düzgün bir şekilde yerleştirilmiş ve şişleme çubuğu kullanılarak sıkıştırılmıştır. Yerleştirilen numunelerin yüzeyi mala ile düzeltilip 24 saat boyunca kalıpta bekletilmiştir. 24 saatlik sürenin sonunda kalıptan çıkarılan numuneler oda koşullarında kür edilmiş ve deney gününe kadar bekletilmiştir.



Şekil 3.13: Kalıplara yerleştirilmiş geopolimer beton numuneler

3.2.3 Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler

Bu araştırma kapsamında üretilen geopolimer beton numuneleri, 28 günlük kür süresini tamamladıktan sonra %3 konsantrasyonundaki Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$) ve Sodyum Sülfat (Na_2SO_4) çözeltilerine maruz bırakılmıştır. Numuneler, 12 hafta süresince bu çözeltilerde bekletilmiş ve bu süre zarfında basınç dayanımları, eğilme dayanımları, kılcal geçirimsizlik değerleri ve ağırlık değişimleri ölçülmüş; ayrıca görsel olarak da değişimler incelenmiştir. Elde edilen ölçüm değerleri, kontrol numunelerinden elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

3.2.4.1 Basınç dayanımı

Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanım değerleri, TS EN 12390-3 ve ASTM C39/C39M test yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Basınç dayanım testi sırasında, geopolimer beton numuneleri cihaza yerleştirilirken, yükleme yönü numunelerin döküm yönüne dik olarak ayarlanmıştır. Numunelerin yükleneceği cihazın yüzeyleri önceden temizlenmiş ve numuneler düzgün bir şekilde yerleştirildikten sonra cihazın ekranından numune boyutları seçilerek, otomatik olarak numuneler 2.40 kN/s yük hızıyla yüklenmiştir. Numunelerin basınç dayanım değerleri, Denklem 3.1'e göre hesaplanmıştır. Basınç dayanımları belirlenirken, her bir karışım için 4 adet numune üretilmiş ve bu 4 numunenin basınç dayanımının aritmetik ortalaması kullanılmıştır.

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

F_c : Basınç dayanımı, MPa

P : Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N

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

3.2.4.2. Eğilme dayanımı

Yapılan çalışmalar neticesinde, geopolimer beton numunelerinin eğilme dayanımını belirlemek amacıyla SHIMADZU marka deney cihazı TS EN 12390-5 standardına uygun bir şekilde kullanılmıştır. Bu deney için her bir gruptan seçilen numuneler, 28 günlük kür süresinin ardından 40x40x160 mm boyutlarında olup, yükleme tablasında mesnetlere oturtularak deneye tabi tutulmuştur. Numunelerin eğilme dayanımları, Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma = 3FL / 2BH^2 \quad (3.2)$$

F : Numunenin taşıyabildiği maksimum yük (N)

L : Mesnetler arasındaki mesafe (mm)

B : Numune kesitinin kuvvete dik doğrultudaki uzunluğu (mm)

H : Numune kesitinin kuvvet doğrultusundaki uzunluğu (mm)

3.2.4.3 Kılcal geçirimlilik deneyi

Kılcal geçirimlilik deneyleri, ASTM C1585 standardına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Numuneler, sülfat etkisi sonrasında etüvde $105\pm5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 24 saat boyunca kurutulmuştur. Ardından, suya dayanıklı bantlarla sarılarak yan yüzeyleri su geçirmemesi sağlanmıştır. Hazırlanan numuneler, deney düzeneğine alt yüzeylerinden 5 mm suya temas edecek şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.14). Kronometre aynı anda başlatılmış ve 5, 15, 30, 60 ve 1440 dakika sürelerinin sonunda numunelerin yüzeyindeki su, havlu ile silinerek ardından 0.01 g hassasiyetli teraziyle tartılarak ağırlıkları kaydedilmiştir. Kılcal geçirimlilik katsayısı, Denklem 3.3 ve Denklem 3.4'e göre hesaplanarak numunenin birim alanda kapiler olarak emdiği su miktarı belirlenmiştir. Deney sonuçları, üç numunenin ortalaması alınarak raporlanmıştır. Sülfat etkisi altındaki geopolimer beton numunelerinin kılcal geçirimlilik değerlerini belirlemede kullanılan bu yöntem, aşağıda verilmiştir.

$$S = I / t^{0.5} \quad (3.3)$$

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

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

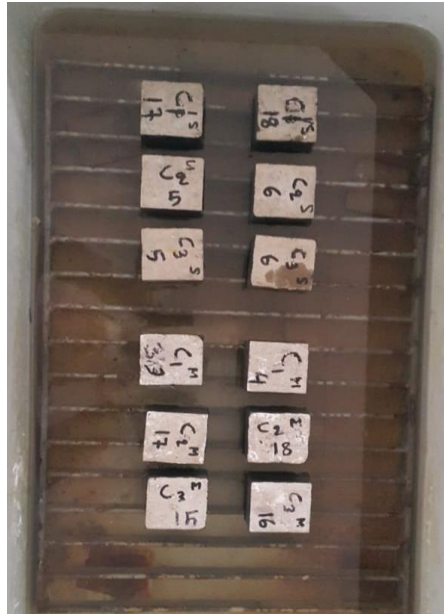
I: Numunelerin su emmesi, (cm).

t: Zaman, (s).

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

a: Numunenin açıkta kalan yüzey alanı, (cm^2).

d: Suyun yoğunluğu, (g/cm^3)



Şekil 3.14: Kılcal geçirimlilik düzeneğindeki numuneler

3.2.4.4. Ağırlık değişimi

ASTM C 267 standardına göre, numunelerin ağırlık değişimleri belirlenmiştir. Sülfat etkisi altındaki deformasyonları değerlendirmek amacıyla birim ağırlık kaybı deneyi gerçekleştirilmiştir. Ağırlık kaybını hesaplamak için, numuneler sülfat etkisi öncesinde ve sonrasında 0.01 hassasiyetli bir terazi ile tartılmış ve bu iki ağırlık arasındaki farkın 100'e oranlanmasıyla ağırlık kaybı oranı hesaplanmıştır. Elde edilen deney sonuçları, her iki numunenin aritmetik ortalaması alınarak raporlanmıştır. Ağırlık kaybı oranı, Denklem 3.5 kullanılarak hesaplanmıştır.

Ağırlık kaybı :

$$(\%) = ((W - W_0) / W_0) \times 100 \quad (3.5)$$

W_0 : Numunenin başlangıçtaki ağırlığı, g

W : Numunenin deney sonrası ağırlığı, g

3.2.4.5 Sülfat etkisi

Oluşturulan geopolimer beton numuneleri, 28 günlük kür süresini tamamladıktan sonra ayrı ayrı %3 $MgSO_4$ ve %3 Na_2SO_4 çözeltilerine yerleştirilmiştir. Numunelerin ağırlıkları, çözeltide belirli periyotlarda (4, 8 ve 12 hafta) ağırlık değişimleri için ölçülmüştür. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve kılcal geçirimlilik deneyleri de aynı periyotlarda gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.15'de gösterilmiştir.



Şekil 3.15: Sülfat çözeltilerinin içinde bekletilen numuneler

4.ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

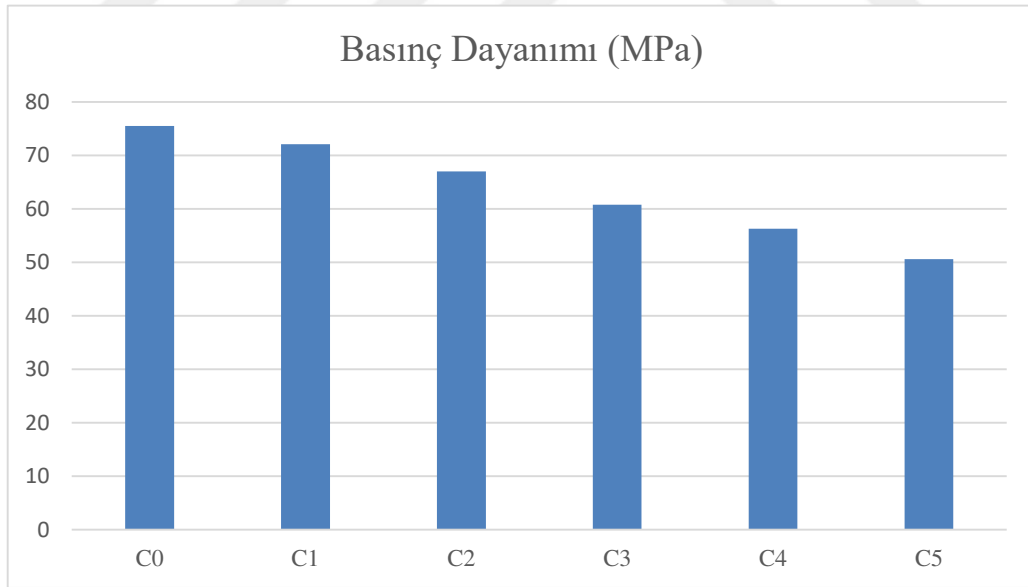
4.1 Sertleşmiş Beton Deneyleri İle İlgili Bulgular Ve Tartışma

4.1.1 Kontrol numuneleri basınç dayanımları

Geopolimer kontrol numunelerin basınç dayanımları, Çizelge 4.1'de sunulmuş ve Şekil 4.1'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Çizelge 4.1'den görülebileceği gibi, geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımları cam tozu arttıkça azalmıştır.

Çizelge 4.1: Kontrol numuneleri basınç ve eğilme dayanımı

Karışım	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)
C0	8,30	75,5
C1	8,08	72,1
C2	7,71	67,0
C3	7,34	60,8
C4	6,73	56,3
C5	6,65	50,6



Şekil 4.1: 28 günlük geopolimer beton kontrol numunelerin basınç dayanım değerleri

Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1 üzerinde yapılan inceleme sonucunda, en yüksek basınç dayanımı (75.5 MPa), C0 kodlu karışımda elde edilmiştir. En düşük basınç dayanımı ise C5 kodlu karışımda gözlemlenmiştir. Numunelerdeki cam tozu ikame oranı arttıkça basınç dayanımları azalmıştır. Cam tozu içermeyen numunelerin basınç dayanımları, %10, %20, %30, %40 ve %50 cam tozu içeren numunelerle karşılaştırıldığında, dayanım kaybı sırasıyla %4.5, %11.3, %19.5, %25.4 ve %33 oranlarında gerçekleşmiştir.

Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonda cam tozunun ağırlıkça yüzde %10, %20, %30, %40, ve %50 oranlarında yer değiştirmesi, basınç dayanımında azalmalara neden olmuştur. Bu durumun birkaç ana nedeni bulunmaktadır. Öncelikle, cam tozu ve YFC farklı özelliklere sahiptir. Cam tozu genellikle düşük yoğunluklu bir malzemedir ve bu nedenle beton karışımındaki ağırlıkça yüksek oranlarda kullanıldığında betonun yoğunluğunu düşürebilir. Yoğunluğun azalması, betonun genellikle daha düşük basınç dayanımına sahip olmasına yol açabilir. İkinci olarak, cam tozu ve YFC, kimyasal olarak farklı reaktivitelere sahiptir. Bu malzemelerin karışımı, geopolimerizasyon sürecini etkileyebilir. Farklı reaktiviteler, geopolimer matrisin oluşumunu ve güçlendirme mekanizmalarını etkileyebilir, bu da basınç dayanımının azalmasına neden olabilir. Üçüncü olarak, cam tozu ve YFC'nun partikül boyutu ve şekli de önemli bir rol oynar. Optimal beton performansı için partikül boyutu ve şeklinin dengeli olması gereklidir. Eğer cam tozu ve cüruf partikülleri uygun bir şekilde dağılmaz veya aglomere olursa, bu durum da basınç dayanımının düşmesine katkıda bulunabilir. Sonuç olarak, cam tozu ve YFC esaslı geopolimer betonun basınç dayanımındaki azalmanın nedeni, bu malzemelerin farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmaları, reaktivitelerinin farklı olması, yoğunluk ve partikül boyutu gibi faktörlerin etkileşimi olarak özetlenebilir.

Al-Obeidy ve Khalil (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çimento yerine %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında cam tozu kullanılarak hazırlanan beton numunelerinin 7, 28, 60 ve 90 günlük basınç dayanımı incelenmiştir. 7 ve 28 günlük dayanım sonuçlarında genel olarak dayanımda azalma gözlenmiştir, ancak en az dayanım azalması %10 cam tozu kullanımında gözlenmiştir. 60 ve 90 günlük dayanım sonuçlarında ise %15'e kadar cam tozu miktarının artmasıyla dayanımın arttığı, %15'ten sonra ise cam tozu miktarının artmasıyla dayanımın arttığı gözlemlenmiştir. %15 oranında cam tozu kullanımı, 28, 60 ve 90 günlük dayanımları sırasıyla %1.17, %13.34 ve %19.34 oranında artırmıştır.

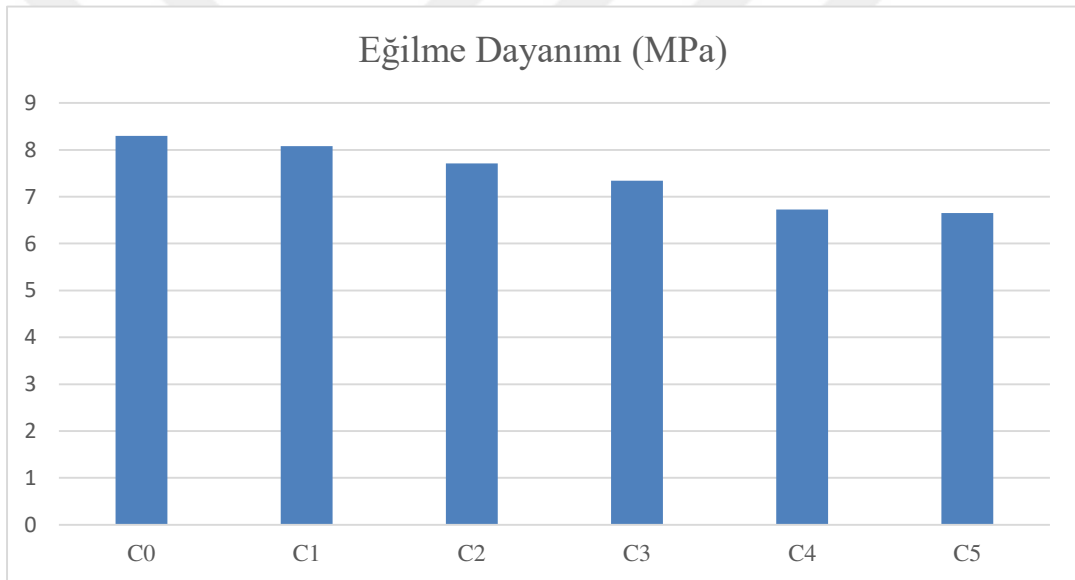
Mehta ve Ashish (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışma, silis dumanı ve atık camın betonun işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışma sonuçlarına göre, cam tozunun artmasıyla betonun çökme miktarı artmış, ancak dayanım ve geçirgenlik azalmıştır. Ayrıca, çimento yerine %20'ye kadar cam tozu ilavesi kullanılmasının, betonun sertleşmiş ve uzun vadeli özelliklerini, basınç dayanımı, yarmada çekme gerilmesi ve eğilme dayanımı dâhil olmak üzere, iyileştirebileceği sonucuna varılmıştır.

Bıçakçioğlu (2020), cam tozu ve YFC'nun ultra yüksek performanslı betonda çimento yerine kullanımının beton basınç dayanımına olan etkisini incelemiştir. Cam tozu ve YFC,

çimento yerine %4 ve %8 oranlarında ayrı ayrı ve bir arada kullanılarak karışımlar hazırlanmıştır. Yapılan çalışmada, cam tozu miktarının artmasıyla 7 ve 14 günlük numunelerde basınç dayanımının azaldığı, ancak 28 gün ve sonrasında basınç dayanımının kontrol numunesine göre değişiminin oldukça azaldığı gözlemlenmiştir.

4.1.2 Geopolimer beton kontrol numunelerinin eğilme dayanımı

Çizelge 4.1 ve Şekil 4.2, yapılan çalışmalar neticesinde üretilen geopolimer beton numunelerinin 28 günlük kür süresinin ardından ölçülen eğilme dayanım değerlerini göstermektedir. Verilerin incelenmesi sonucunda, cam tozu ikamesi arttıkça numunelerin eğilme mukavemetlerinde bir azalış görülmüştür. Cam tozu içermeyen numunenin eğilme mukavemeti 8.3 MPa olarak ölçülmüştür. Diğer taraftan, %10, %20, %30, %40 ve %50 cam tozu içeren numunelerin eğilme mukavemetleri 6.65 ile 8.08 MPa arasında değişmektedir. %10, %20, %30, %40 ve %50 Cam tozu ikamesi ile numunelerin eğilme dayanımları sırasıyla %2.7, %7.1, %11.6, %18.9 ve %19.9 oranlarında azalmıştır.



Şekil 4.2: Geopolimer beton numunelerin eğilme dayanımları

Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonda cam tozunun YFC ile ağırlıkça değiştirilmesi, eğilme dayanımında azalmalara neden olmuştur. Bu durumun birkaç temel nedeni vardır. Geopolimer betonlar, kimyasal reaksiyonlar yoluyla oluşan bir matrise dayanmaktadır. Ancak, cam tozu ve YFC farklı kimyasal özelliklere sahiptir. Bu malzemelerin karışımı, geopolimerizasyon sürecini etkileyebilir. Farklı kimyasal reaktiviteler, geopolimer matrisin oluşumunu ve sertleşme mekanizmalarını etkiler. Bu durum, eğilme dayanımında azalmaya neden olabilir, çünkü matrisin homojen ve güçlü bir yapı oluşturması engellenebilir. Cam tozu genellikle düşük yoğunluklu bir malzemedir ve betonun yoğunluğunu azaltabilir. Yoğunluğun azalması, betonun eğilme dayanımını negatif yönde etkileyebilir. Bu durum, cam tozunun yüksek oranlarda kullanıldığı

durumlarda belirginleşebilir. Ayrıca, cam tozu ve YFC nun mekanik özellikleri de farklıdır. Eğilme dayanımını etkileyen faktörlerden biri de malzemenin elastik modülüdür. Cam tozu ve YFC, farklı elastik modüllere sahip olabilir. Bu durum, malzemenin eğilme dayanımını olumsuz etkileyebilir. Sonuç olarak, cam tozu ve YFC esaslı geopolimer betonda eğilme dayanımındaki azalmanın ana nedenleri, farklı kimyasal reaktivitelerin etkisi, düşük yoğunluklu malzemenin katkısı ve mekanik özelliklerdeki farklılıklardır. Bu faktörlerin etkileşimi, eğilme dayanımının azalmasına katkıda bulunabilir.

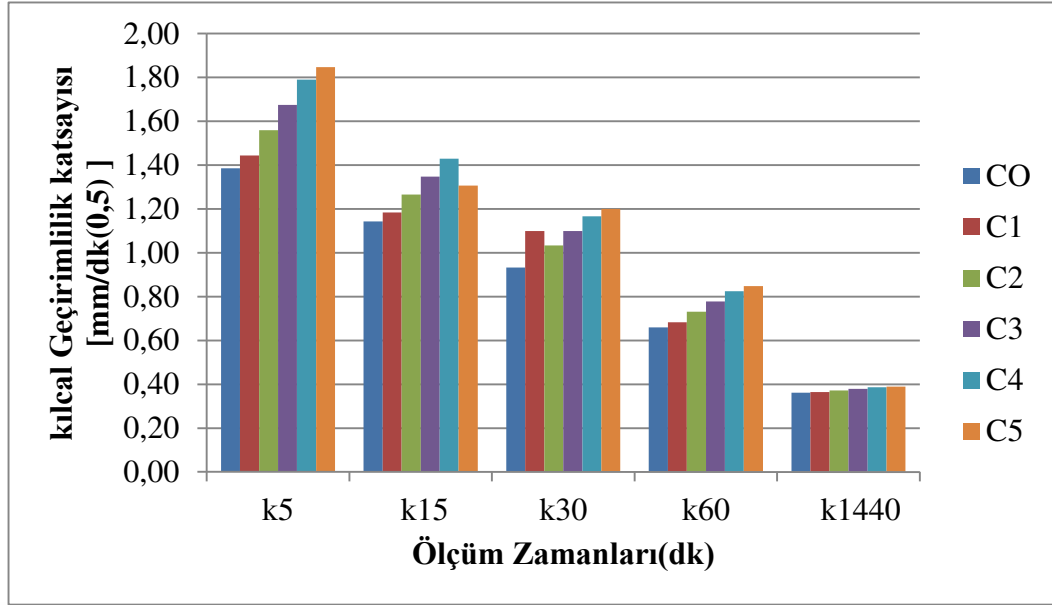
Bouty ve Homsı (2021), atık cam tozunun çimento yerine %10, %15, %20 ve %25 oranlarında kullanılmasının beton karışımları üzerindeki etkilerini inceleyen bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında, 25 MPa ve 32 MPa dayanımına sahip iki farklı beton karışımı üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde çökme, akış testi, hava içeriği testi, eğilme ve basınç dayanımı ile su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre, çimentonun atık cam tozu ile değiştirilmesinin taze beton özellikleri üzerinde belirgin bir etki oluşturduğu görülmüştür. Ancak, eğilme dayanımı açısından, 25 MPa beton karışımında %10 oranında cam tozu kullanımıyla %17 oranında bir artış gözlemlenmiştir. Diğer karışımlarda ise cam tozu oranına bağlı olarak azalma gözlemlenmiştir.

4.1.3 Geopolimer beton kontrol numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısı

Kılcal geçirimlilik deneyi sonuçları, Çizelge 4.3'te sunulmuştur. Elde edilen verilere göre, kılcal su emme miktarı tüm karışımlar için 5, 15, 30, 60 ve 1440 dakikalık ölçüm zamanları boyunca artış göstermiştir. %50 oranında cam tozu içeren C5 numunelerinde kılcal geçirimlilik katsayısı en yüksek değerlere sahiptir ve sırasıyla 5, 15, 30, 60 ve 1440 dakikalık ölçümler için 1.85, 1.31, 1.20, 0.85 ve 0.39 olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan, cam tozu içermeyen C0 numunelerinde kılcal geçirimlilik katsayısı en düşük değerlere sahiptir ve sırasıyla 5, 15, 30, 60 ve 1440 dakikalık ölçümler için 1.39, 1.14, 0.93, 0.66 ve 0.36 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.3 incelendiğinde, cam tozu eklemenin kılcal geçirimlilik katsayısını artırdığı gözlemlenmektedir.

Çizelge 4.2: Geopolimer beton kontrol numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısı değerleri

Karışım Adı	Kılcal geçirimlilik katsayısı (mm/dk(0,5))				
	k5	k15	k30	k60	k1440
C0	1,39	1,14	0,93	0,66	0,36
C1	1,44	1,18	1,10	0,68	0,36
C2	1,56	1,27	1,03	0,73	0,37
C3	1,67	1,35	1,10	0,78	0,38
C4	1,79	1,43	1,17	0,82	0,39
C5	1,85	1,31	1,20	0,85	0,39



Şekil 4.3: Geopolimer beton kontrol numunelerin zamana bağlı kılcal geçirimsizlik katsayı değerleri

Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonda cam tozunun YFC ile ağırlıkça değiştirilmesi, kılcal geçirimsizlik katsayısının artmasına neden olmuştur. Bu durumun temel nedenleri şunlardır. Bu karışımda kullanılan cam tozu ve YFC, genellikle daha poröz ve hafif malzemelerdir. Poröz malzemelerin beton içindeki kullanımı, betonun kılcal geçirimsizliğini artırabilir. Yüksek oranlarda cam tozu ve YFC'nun kullanılması, betonun porozitesini artırarak kılcal geçirimsizlik katsayısını artırabilir. Cam tozu ve YFC, özellikle mikro yapı düzeyinde boşlukları içerebilir. Bu boşluklar, suyun veya diğer sıvıların beton içinde daha fazla hareket etmesine olanak tanıyarak kılcal geçirimsizliği artırabilir. Geopolimerizasyon süreci sırasında, cam tozu ve YFC kimyasal reaksiyonlara girer ve poröz bir matris oluşturabilir. Bu durum, betonun iç yapısında boşlukların oluşmasına ve dolayısıyla kılcal geçirimsizlik katsayısının artmasına katkıda bulunabilir. Yoğunluğun azalması da kılcal geçirimsizlik üzerinde etkili olabilir. Cam tozu ve YFC, genellikle düşük yoğunluğa sahiptir. Bu durum, betonun daha fazla gözenek ve boşluk içermesine neden olarak kılcal geçirimsizliği artırabilir. Sonuç olarak, cam tozu ve YFC esaslı geopolimer betonda kılcal geçirimsizlik katsayısının artmasının temel nedenleri, poröz malzemelerin kullanımı, mikro yapıdaki boşlukların oluşumu, kimyasal reaksiyonlar ve yoğunluğun azalması gibi faktörlerdir. Bu etkileşimler, betonun kılcal geçirimsizliğini artırarak suyun geçirgenliğini olumsuz yönde etkileyebilir.

Yücel vd. (2019), harçlarda çimento yerine %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında atık camlardan elde edilen cam tozu kullanımının etkilerini araştırmışlardır. Üretilen numuneler üzerinde yapılan yayılma, kılcal su emme, hızlı klor geçirimsizliği ve gaz geçirimsizliği deneyleri sonuçlarına göre, harçlarda cam tozu kullanımının kontrol numunesine göre işlenebilirliği artırdığı görülmüştür.

4.1.4 Kontrol numunelerin görsel incelemeleri

Kür sürelerini tamamlayan kontrol numunelerin 12 hafta sonundaki görünüşleri incelendiğinde, Şekil 4.4 ve 4.5’deki gibi olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerdeki cam tozu oranı arttıkça, numunelerin rengindeki değişim oranının az olduğu belirlenmiştir.

Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonda cam tozunun YFC ile ağırlıkça değiştirilmesi, görsel değişimin az olmasının birkaç nedeni vardır. İlk olarak, YFC ve cam tozu benzer renk ve görünüş özelliklerine sahip olabilir. Bu durum, cam tozunun YFC ile değiştirilmesiyle betonun genel görünümünde belirgin bir değişiklik olmamasına yol açabilir. Benzer fiziksel özelliklere sahip olmaları, betonun dış görünüşünde büyük ölçüde farklılık yaratmayabilir. İkinci olarak, cam tozu ve YFC genellikle ince partiküllü malzemelerdir ve beton içinde homojen bir şekilde dağılabilirler. Bu durum, her iki malzemenin de betonun yüzeyinde benzer bir dağılım göstermesine ve görsel olarak belirgin bir farklılık olmamasına katkıda bulunabilir. Üçüncü olarak, görsel değişimdeki azalmanın nedenlerinden biri de cam tozunun YFC ile değiştirilmesinin betonun yüzey özelliklerini belirgin bir şekilde etkilememesidir. Yüzey dokusu, renk ve parlaklık gibi özelliklerde belirgin bir değişim olmaması, görsel değişimin az olmasına katkıda bulunabilir. Sonuç olarak, cam tozunun YFC ile ağırlıkça değiştirilmesinin görsel değişiminin az olmasının nedenleri, benzer renk ve görünüş özelliklerine sahip olmaları, homojen dağılımı ve yüzey özelliklerinde belirgin bir değişiklik olmaması olarak özetlenebilir. Bu faktörler, betonun görsel olarak farklı bir yapıya sahip olmasını engelleyebilir.



Şekil 4.4: Küp şeklindeki kontrol numunelerin 12 hafta sonundaki görünüşleri

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

Bu çalışma, üretilen geopolimer beton numunelerinin sülfat etkisine karşı dirençlerini belirlemek ve sülfat ortamındaki performanslarını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Numuneler, kür sürelerini tamamladıktan sonra 12 hafta boyunca %3 konsantrasyonundaki $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 çözeltilerinde bekletilmiştir. Bu süre zarfında numunelerin basınç dayanımları, eğilme dayanımları, kılcal geçirimsizlik ve ağırlık değişimleri ölçülmüş ve ayrıca görsel değişimleri incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, sülfat ortamındaki direnç ve performansın değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı değerleri, aynı yaşta olan ve laboratuvar ortamında bekletilen kontrol numunelerinin değerleriyle kıyaslanarak, numunelerin sülfat ortamındaki dayanıklılığını göstermektedir. Ayrıca, kılcal geçirimsizlik ve ağırlık değişimi ölçümleri, numunelerin su geçirgenliği özellikleri hakkında bilgi sağlamaktadır.

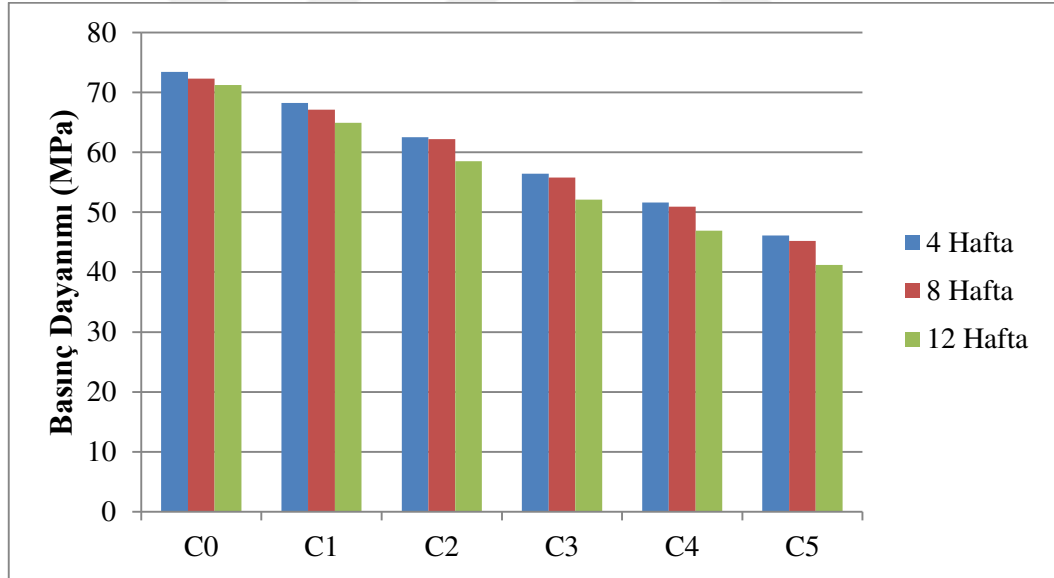
4.2.1 Sülfat etkisindeki numunelerin basınç dayanımları

Sülfat çözeltilerine bırakılan numuneler, 4, 8 ve 12 haftalık periyotlarda basınç dayanımları ölçülerek incelenmiştir. Numunelerin basınç dayanım değerleri, Çizelge 4.3'te verilmiş ve Şekil 4.6-7'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Sülfat çözeltisine 4, 8 ve 12 hafta boyunca maruz kalan geopolimer beton numunelerinin basınç dayanım değerleri, aynı yaşta olan ve laboratuvar ortamında bekletilen kontrol numunelerin basınç dayanım değerleriyle karşılaştırıldığında;

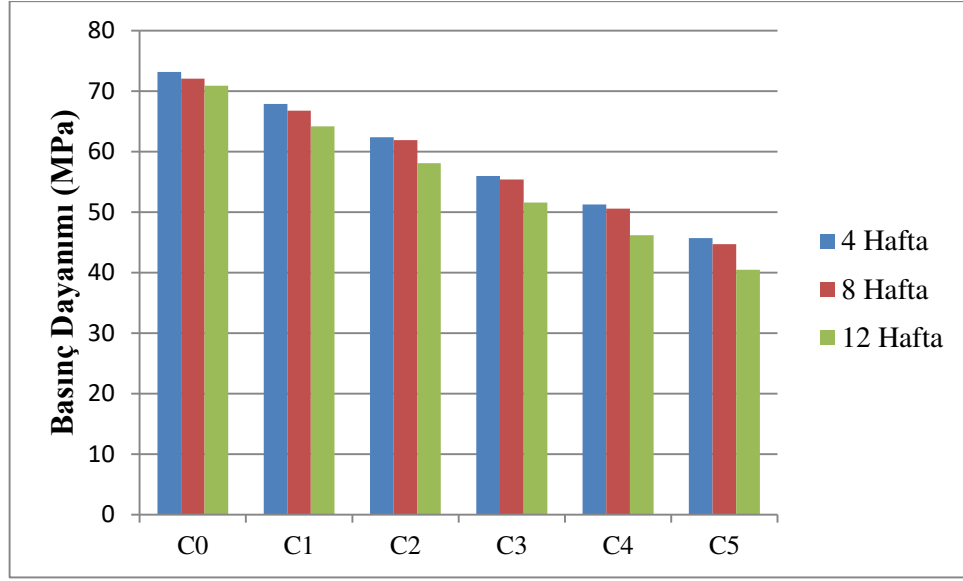
- %3 $MgSO_4$ çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde C0, C1, C2, C3, C4 ve C5 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %3.05, %5.83, %6.87, %7.89, %8.88, %9.68 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %4.50, %7.35, %7.61, %8.88, %10.12, %11.66 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %6.09, %10.96, %13.28, %15.13, %17.94, %19.96 oranında azalmıştır.
- %3 Na_2SO_4 çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %2.78, %5.41, %6.72, %7.24, %8.35 ve %8.89 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %4.24, %9.93, %7.16, %8.22, %9.59 ve %10.67 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer betonların basınç dayanımları sırasıyla %5.70, %9.99, %12.69, %14.31, %16.70 ve %18.58 oranında azalmıştır.

Çizelge 4.3: Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri, MPa

	Karışım	4 Hafta	8 Hafta	12 Hafta
%3 Na ₂ SO ₄	C0	73,4	72,3	71,2
	C1	68,2	67,1	64,9
	C2	62,5	62,2	58,5
	C3	56,4	55,8	52,1
	C4	51,6	50,9	46,9
	C5	46,1	45,2	41,2
%3 MgSO ₄	C0	73,2	72,1	70,9
	C1	67,9	66,8	64,2
	C2	62,4	61,9	58,1
	C3	56	55,4	51,6
	C4	51,3	50,6	46,2
	C5	45,7	44,7	40,5



Şekil 4.5: %3 Na₂SO₄ çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri



Şekil 4.6: %3 MgSO₄ çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri

Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonda cam tozunun YFC ile ağırlıkça değiştirilmesi ve sülfat etkisinin basınç dayanımını azaltmasının birkaç nedeni vardır. Öncelikle, cam tozu ve YFC, geopolimer betonun bileşenleri arasında kimyasal reaksiyonlara girer. Ancak, farklı oranlarda cam tozu ve YFC'nun kullanılması, geopolimerizasyon sürecini etkileyebilir. Bu durum, geopolimer matrisin oluşumunu ve güçlendirme mekanizmalarını etkileyerek basınç dayanımının azalmasına neden olabilir. Sülfat etkisi ise, betonun içindeki kimyasal bileşenlerin sülfatlarla reaksiyona girmesi sonucu ortaya çıkar. Sülfatlar, beton içindeki kalsiyum alüminat bileşenlerine zarar verebilir ve bu da betonun dayanımını azaltabilir. Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer beton, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla daha az miktarda kalsiyum alüminat içerir, ancak yine de sülfat etkisiyle karşı karşıya kalabilir. Bu durum, betonun sülfatlara karşı direncini azaltabilir ve basınç dayanımının düşmesine neden olabilir. Ayrıca, cam tozu ve YFC gibi ek malzemeler, betonun fiziksel özelliklerini değiştirebilir. Düşük yoğunluklu malzemelerin kullanılması veya homojen olmayan bir dağılım, betonun genel dayanımını azaltabilir. Sonuç olarak, cam tozu ve YFC esaslı geopolimer betonda YFC ile ağırlıkça değişim ve sülfat etkisinin basınç dayanımının azalmasına nedenleri, kimyasal reaksiyonlar, sülfat etkisi, malzeme dağılımı ve yoğunluk gibi faktörlerdir. Bu etkileşen faktörler, betonun dayanımını olumsuz yönde etkileyebilir.

Parthiban ve Mohan'ın (2017) çalışmasında, farklı GDA oranları (%0.25, %0.50, %0.75 ve %100) içeren karışımlar hazırlanmış ve bağlayıcı olarak granüle Yüksek Fırın Cürufu (YFC) kullanılmıştır. 28 gün kür süresinin ardından, numuneler %5 sodyum sülfat ve %5 magnezyum sülfat çözeltilerinde 90 gün boyunca bekletilmiş ve bu süreç sonunda kuvvet kaybı ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, magnezyum sülfat çözeltilerine maruz kalan numunelerde daha belirgin bir kuvvet kaybı gözlemlenmiştir. GDA oranı arttıkça, her iki çözeltide de basınç dayanım kaybının arttığı görülmüştür. Sodyum sülfata maruz kalan

numunelerde, GDA artış oranına göre basınç dayanım kaybı sırasıyla %5.89, %6.63, %7.93, %9.24 ve %10.58 oranlarında olmuştur. Magnezyum sülfatta ise aynı oranlar sırasıyla %6.09, %7.26, %8.59, %11.73 ve %14.32 olarak belirlenmiştir. En fazla basınç dayanım kaybı, %100 GDA oranına sahip ve magnezyum sülfatta bekletilen numunelerde %14.32 olarak gözlemlenmiştir. Normal portland çimentosu ile hazırlanan referans numunesinde ise basınç dayanım kaybı, sodyum sülfatta bekletilen numunelerde yaklaşık %8, magnezyum sülfatta bekletilen numunelerde ise yaklaşık %12 olarak tespit edilmiştir.

Khan vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, NaOH ile aktive edilen Yüksek Fırın Cürufu (YFC) ve YFC ile Portakal Çiçeği (PÇ) karışımından elde edilen geopolimer betonların sülfat direnci incelenmiştir. Bu amaçla, sıvı/bağlayıcı oranı 0.35 olan dört farklı grup numune üretilmiştir: %100 YFC, %25 YFC + %75 PÇ, %50 YFC + %50 PÇ, %70 YFC + %30 PÇ. Numuneler, 50 mm'lik küp şeklinde olup, 24 saat kalıpta bekledikten sonra 28 gün süresince 23 °C ve %50 bağıl nemde kür edilmiştir. Kür süresini tamamlayan numuneler, 6 ay boyunca %3.1 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilmiş ve deney süresince çözelti her ay yenilenmiştir. Basınç dayanımlarındaki azalmalar incelendiğinde, çözeltide 3 ay bekleyen numunelerin basınç dayanımları şu şekildedir: %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 şu şekildedir: %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

4.2.2 Sülfat etkisindeki numunelerin eğilme dayanımları

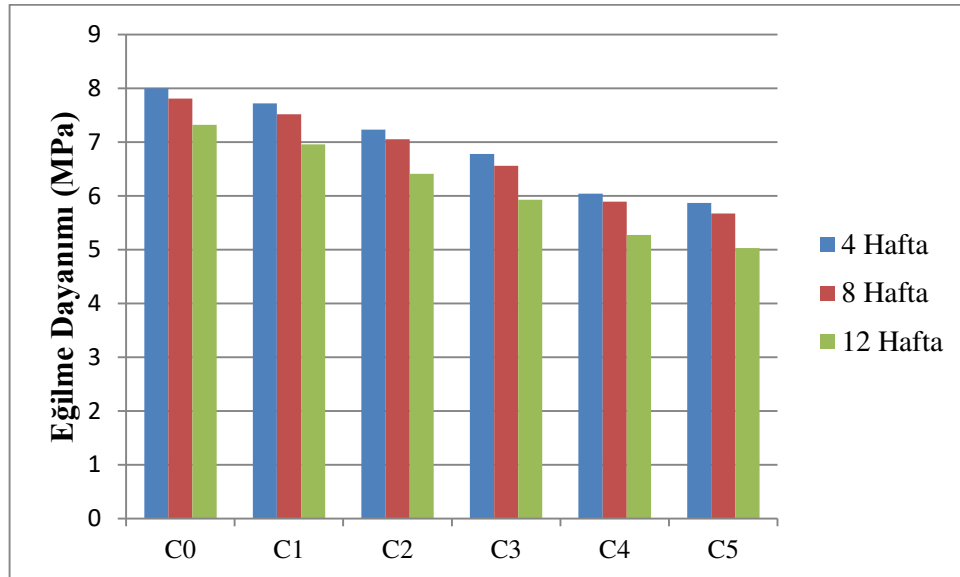
Sülfat çözeltilerine bırakılan numuneler, 4, 8 ve 12 haftalık periyotlarda eğilme dayanımları ölçülerek incelenmiştir. Numunelerin eğilme dayanım değerleri, Çizelge 4.4'te verilmiş ve Şekil 4.8-9'da grafiksel olarak gösterilmiştir. Sülfat çözeltisine 4.8 ve 12 hafta boyunca maruz kalan geopolimer beton numunelerinin eğilme dayanım değerleri, aynı yaşta olan ve laboratuvar ortamında bekletilen kontrol numunelerin eğilme dayanım değerleriyle karşılaştırıldığında;

- %3 MgSO₄ çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer betonların eğilme dayanımları sırasıyla %3.61, %4.46, %6.23, %7.63, %10.25, %11.73 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer betonların eğilme dayanımları sırasıyla %5.90, %6.93, %8.56, %10.63, %12.48, %14.74 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer betonların eğilme dayanımları sırasıyla %11.81, %13.86, %16.86, %19.21, %21.69, %24.36 oranında azalmıştır.
- %3 Na₂SO₄ çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer betonların eğilme dayanımları sırasıyla

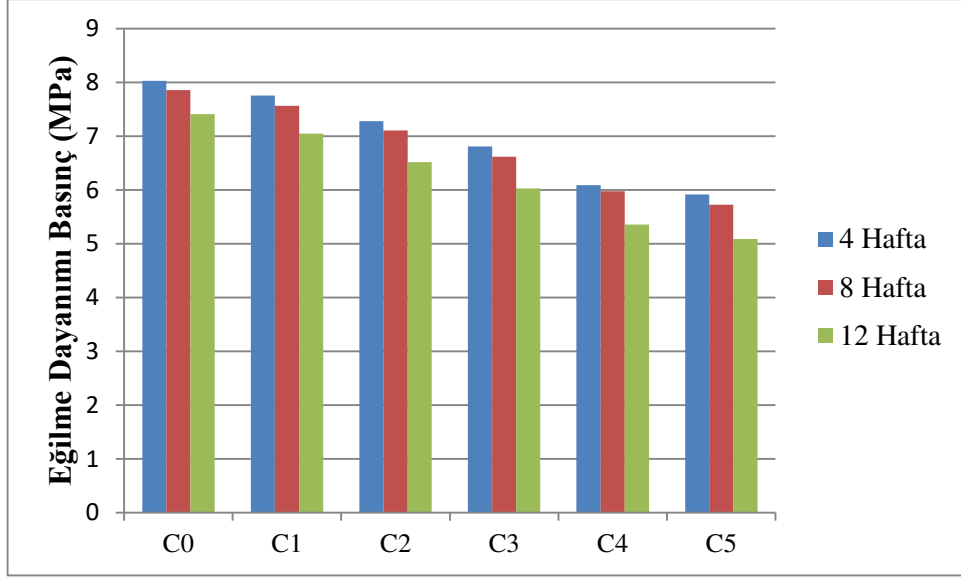
%3.25, %3.96, %5.58, %7.22, %9.51 ve %10.98 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer betonların eğilme dayanımları sırasıyla %5.30, %6.31, %7.78, %9.81, %11.14 ve %13.83 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer betonların eğilme dayanımları sırasıyla %10.72, %12.75, %15.43, %17.85, %20.36 ve %23.46 oranında azalmıştır.

Çizelge 4.4: Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin eğilme dayanım değerleri, MPa

	Karışım	4 Hafta	8 Hafta	12 Hafta
%3 Na₂SO₄	C0	8,03	7,86	7,41
	C1	7,76	7,57	7,05
	C2	7,28	7,11	6,52
	C3	6,81	6,62	6,03
	C4	6,09	5,98	5,36
	C5	5,92	5,73	5,09
%3 MgSO₄	C0	8	7,81	7,32
	C1	7,72	7,52	6,96
	C2	7,23	7,05	6,41
	C3	6,78	6,56	5,93
	C4	6,04	5,89	5,27
	C5	5,87	5,67	5,03



Şekil 4.7: %3 MgSO₄ çözeltisindeki numunelerin eğilme dayanım değerleri



Şekil 4.8: %3 Na₂SO₄ çözeltisindeki numunelerin eğilme dayanım değerleri

Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonda cam tozunun YFC ile ağırlıkça değiştirilmesi ve sülfat etkisiyle eğilme dayanımının azalmasının temel nedenleri şunlardır. Öncelikle, cam tozu ve YFC geopolimer betonun ana bileşenleridir ve bu malzemelerin oranlarının değiştirilmesi, betonun mekanik özelliklerini etkileyebilir. Farklı oranlarda cam tozu ve YFC'nun kullanılması, geopolimer matrisin oluşumunu ve güçlendirme mekanizmalarını etkileyerek eğilme dayanımının azalmasına neden olabilir. Sülfat etkisi, beton içindeki kimyasal reaksiyonlar yoluyla hasara neden olabilir. Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer beton, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla daha az miktarda kalsiyum alüminat içerir. Ancak, sülfatlar bu bileşenlere zarar verebilir ve bu da betonun eğilme dayanımını azaltabilir. Sülfat etkisiyle ortaya çıkan kimyasal reaksiyonlar, betonun içyapısını zayıflatarak eğilme dayanımında azalmaya yol açabilir. Betonun içyapısındaki porozite, eğilme dayanımını olumsuz yönde etkileyebilir. Cam tozu ve YFC gibi malzemeler, betonun porozitesini artırabilir. Artan porozite, betonun su emilimini artırabilir ve bu da sülfat etkisinin daha etkili olmasına neden olarak eğilme dayanımının düşmesine katkıda bulunabilir. Sonuç olarak, cam tozu ile YFC'nun ağırlıkça değiştirilmesi ve sülfat etkisiyle eğilme dayanımının azalmasının nedenleri, kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan hasar, porozite artışı ve malzeme oranlarındaki değişim gibi faktörlerdir. Bu etkileşimler, betonun eğilme dayanımını olumsuz yönde etkileyerek dayanım kayıplarına yol açabilir.

4.2.3 Sülfat etkisindeki numunelerin kılcal geçirimliliği

Üretilen geopolimer beton numuneleri, %3 Na₂SO₄ ve %3 MgSO₄ çözeltilerinde 4, 8 ve 12 hafta süreyle bekletildikten sonra kılcal geçirimlilik deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen deney sonuçları, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da sunulmuş, ayrıca Şekil 4.10-15'te değişimler grafiksel olarak gösterilmiştir. İncelenen verilere göre, her iki sülfat çözeltisinde de bekletme süresi arttıkça kılcal geçirimlilik katsayısı artış göstermiştir. Ayrıca, her iki sülfat

çözeltilisinde de cam tozu içeriği arttıkça kılcal geçirimlilik katsayısı artmıştır. Örneğin, %0 cam tozu içeren C0 kodlu beton numunesi en düşük kılcal geçirimlilik katsayısı değerine sahipken, %50 cam tozu içeren C5 kodlu beton numunesi en yüksek kılcal geçirimlilik katsayısı değerine ulaşmıştır. Ayrıca, %3 Na₂SO₄ çözeltilisinde bekletilen beton numunelerinin kılcal geçirimlilik katsayısı değerleri, %3 MgSO₄ çözeltilisinde bekletilen beton numunelerinin kılcal geçirimlilik katsayısı değerlerinden daha düşüktür.

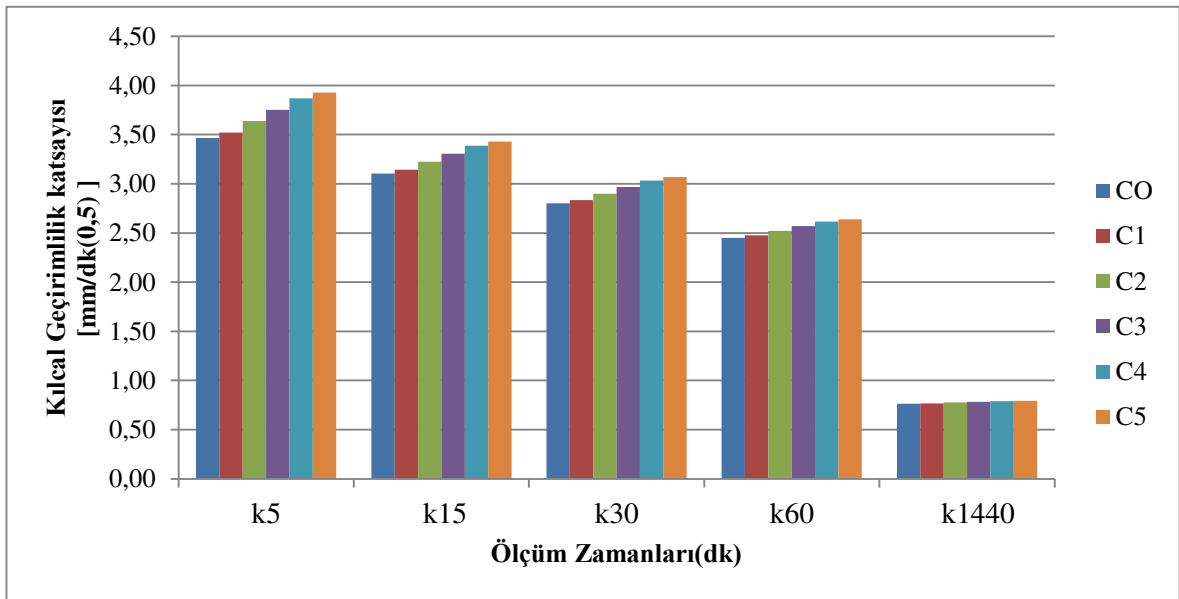
Deneyde ölçüm zamanı arttıkça, birbirini takip eden zamanlarda ölçülen kılcal geçirimlilik katsayısı değerlerinde azalma gözlenmiştir. Sülfat çözeltilerinde bekletilen geopolimer beton numuneleri, 28 gün kür edilen kontrol numuneleriyle karşılaştırıldığında kılcal geçirimlilik katsayısı değerlerinde artış meydana gelmiştir.

Çizelge 4.5: %3 Na₂SO₄ çözeltilisinde bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısı değerleri

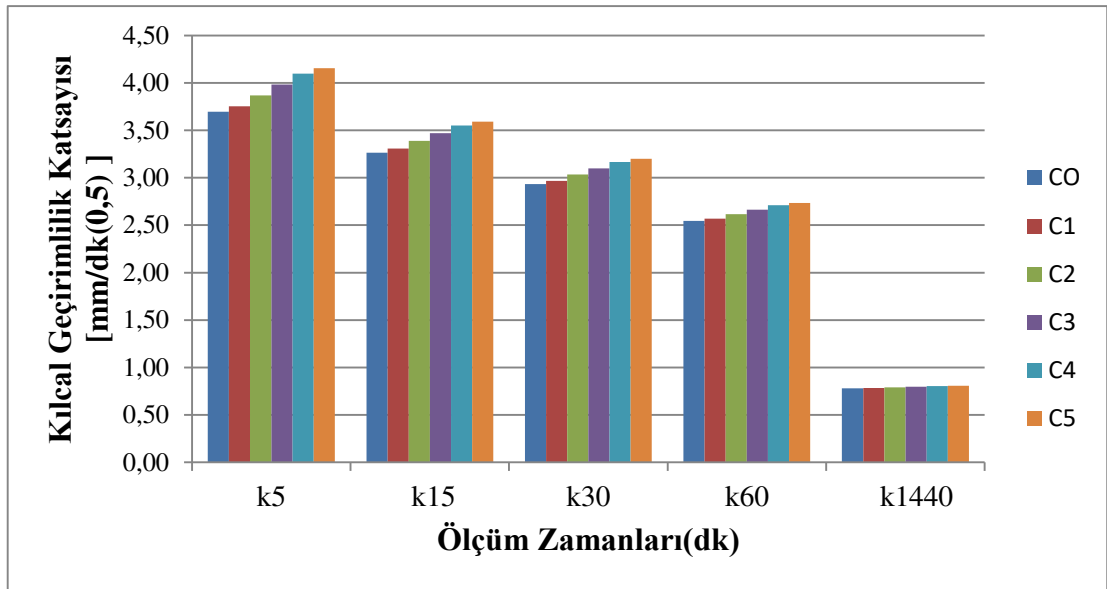
Kılcal geçirimlilik katsayısı (mm/dk (0.5))							
Çözelti	Süre (Hafta)	Karışımlar	k5	k15	k30	k60	k1440
%3 Na ₂ SO ₄	4 Hafta	C0	3,44	3,09	2,79	2,44	0,76
		C1	3,50	3,13	2,82	2,47	0,77
		C2	3,59	3,19	2,87	2,50	0,77
		C3	3,73	3,29	2,95	2,56	0,78
		C4	3,85	3,37	3,02	2,61	0,79
		C5	3,90	3,41	3,05	2,63	0,79
%3 Na ₂ SO ₄	8 Hafta	C0	3,67	3,25	2,92	2,54	0,78
		C1	3,73	3,29	2,95	2,56	0,78
		C2	3,82	3,36	3,01	2,60	0,79
		C3	3,96	3,45	3,09	2,65	0,79
		C4	4,08	3,54	3,15	2,70	0,80
		C5	4,13	3,58	3,19	2,72	0,80
%3 Na ₂ SO ₄	12 Hafta	C0	3,90	3,41	3,05	2,63	0,79
		C1	3,96	3,45	3,09	2,65	0,79
		C2	4,05	3,52	3,14	2,69	0,80
		C3	4,19	3,62	3,22	2,75	0,81
		C4	4,31	3,70	3,29	2,80	0,82
		C5	4,36	3,74	3,32	2,82	0,82

Çizelge 4.6: %3 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısı değerleri

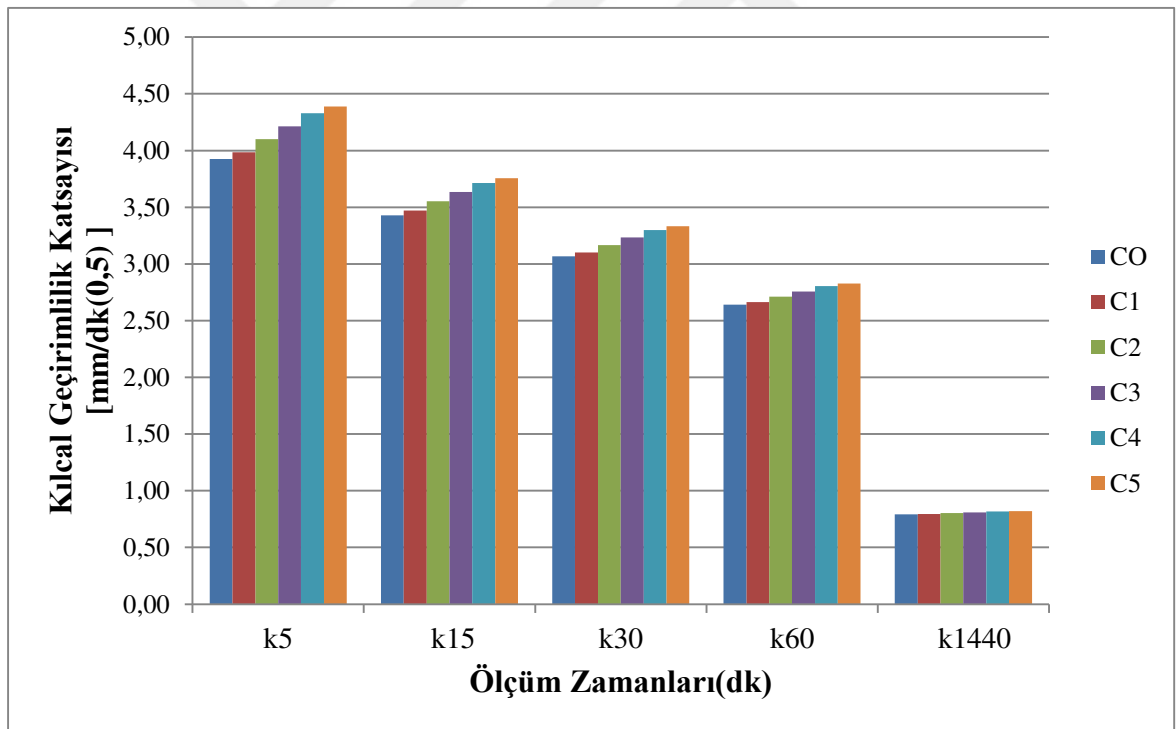
Kılcal geçirimlilik katsayısı (mm/dk (0.5))							
Çözelti	Süre (Hafta)	Karışımlar	k5	k15	k30	k60	k1440
%3 MgSO ₄	4 Hafta	C0	3,46	3,10	2,80	2,45	0,76
		C1	3,52	3,14	2,83	2,47	0,77
		C2	3,64	3,23	2,90	2,52	0,77
		C3	3,75	3,31	2,97	2,57	0,78
		C4	3,87	3,39	3,03	2,62	0,79
		C5	3,93	3,43	3,07	2,64	0,79
%3 MgSO ₄	8 Hafta	C0	3,70	3,27	2,93	2,55	0,78
		C1	3,75	3,31	2,97	2,57	0,78
		C2	3,87	3,39	3,03	2,62	0,79
		C3	3,98	3,47	3,10	2,66	0,80
		C4	4,10	3,55	3,17	2,71	0,80
		C5	4,16	3,59	3,20	2,73	0,81
%3 MgSO ₄	12 Hafta	C0	3,93	3,43	3,07	2,64	0,79
		C1	3,98	3,47	3,10	2,66	0,80
		C2	4,10	3,55	3,17	2,71	0,80
		C3	4,21	3,63	3,23	2,76	0,81
		C4	4,33	3,72	3,30	2,80	0,82
		C5	4,39	3,76	3,33	2,83	0,82



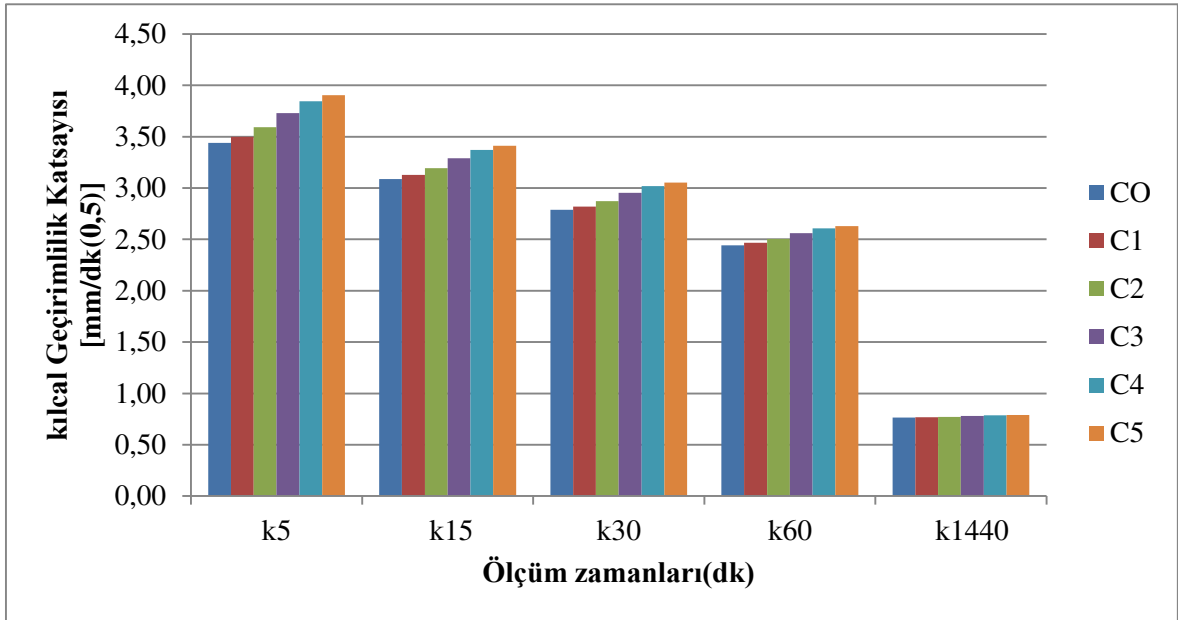
Şekil 4.9 : %3 MgSO₄ çözeltisinde 4 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim



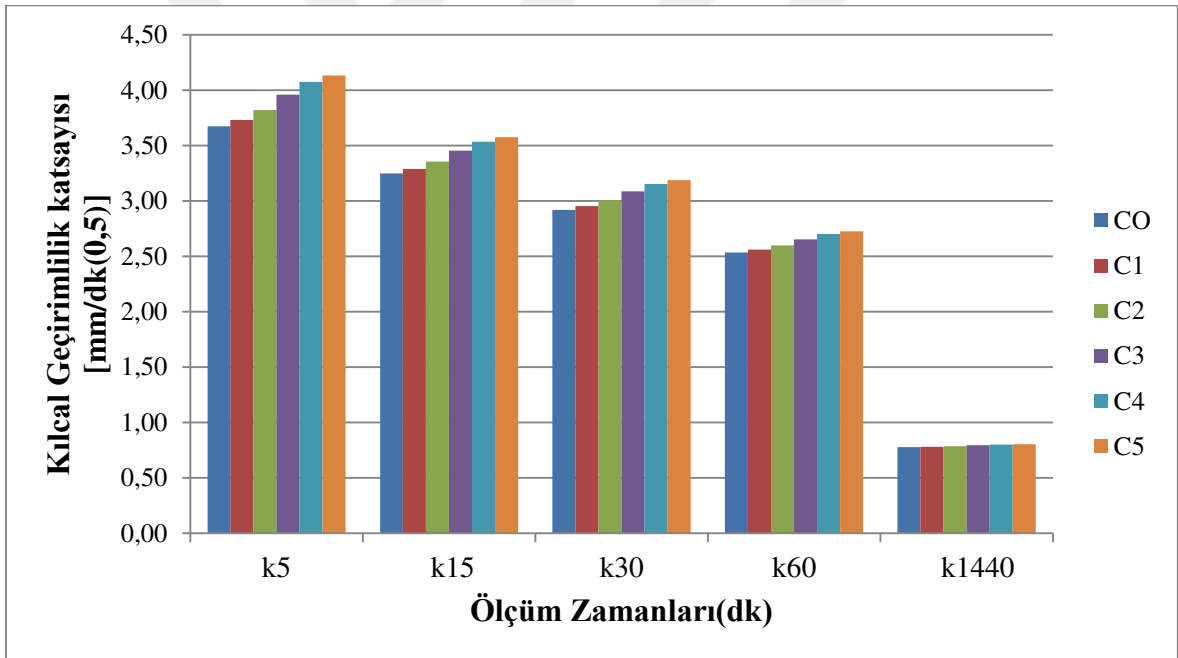
Şekil 4.10 : %3 MgSO₄ çözeltisinde 8 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim



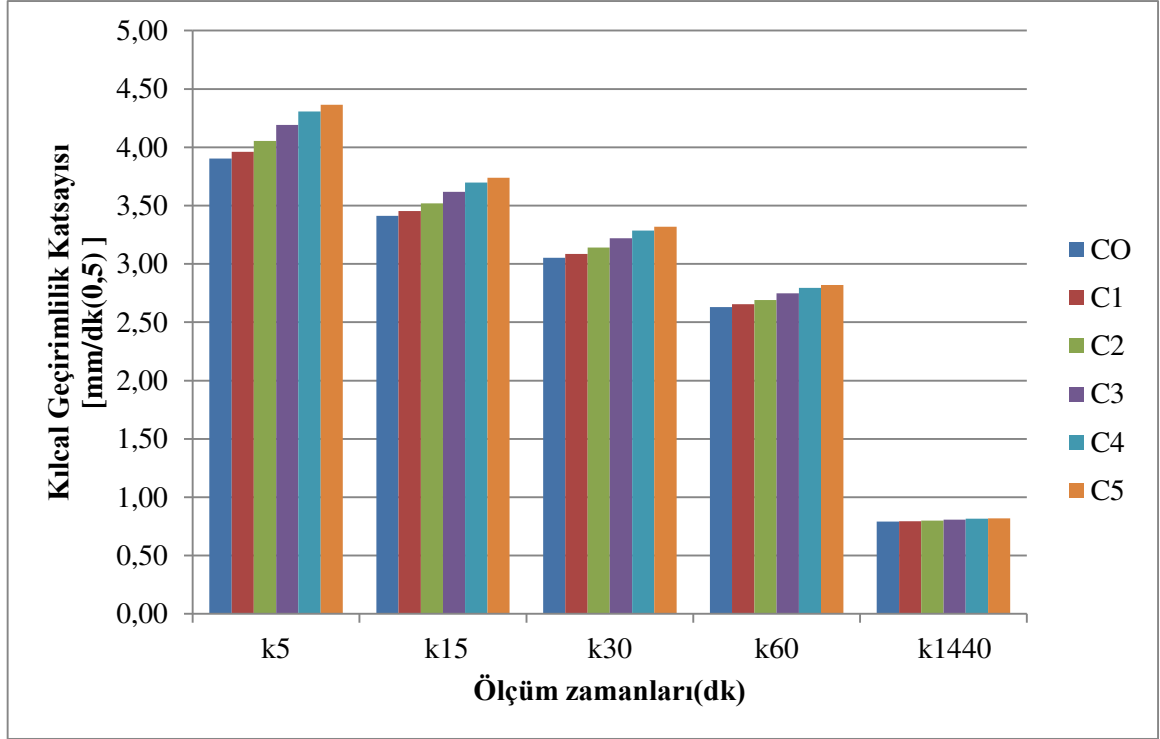
Şekil 4.11 : %3 MgSO₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim



Şekil 4.12 : %3 Na₂SO₄ çözeltisinde 4 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim



Şekil 4.13 : %3 Na₂SO₄ çözeltisinde 8 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim



Şekil 4.14 : %3 Na₂SO₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim

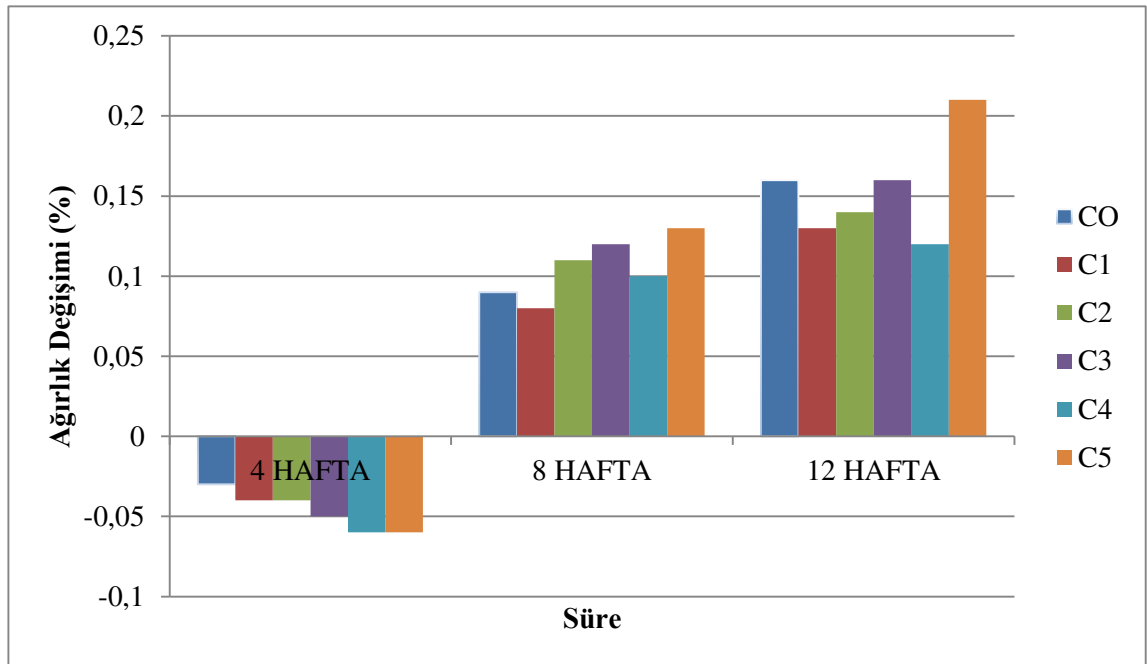
Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonda cam tozunun YFC ile ağırlıkça değiştirilmesi ve sülfat etkisiyle kılcal geçirimlilik katsayısının artmasının temel nedenleri şunlardır. İlk olarak, cam tozu ve YFC genellikle poröz malzemelerdir. Bu malzemelerin beton içinde kullanılması, betonun porozitesini artırabilir. Artan porozite, kılcal geçirimlilik katsayısını artırabilir çünkü suyun beton içinde daha rahat hareket etmesine izin verir. İkinci olarak, cam tozu ve YFC genellikle ince partiküllü malzemelerdir. Bu malzemelerin kullanılması, beton karışımının daha homojen olmasını sağlayabilir, ancak aynı zamanda betonun içinde mikroskobik boşlukların oluşmasına neden olabilir. Bu boşluklar, suyun beton içinde daha rahat geçişine ve dolayısıyla kılcal geçirimlilik katsayısının artmasına katkıda bulunabilir. Üçüncü olarak, sülfat etkisi betonun iç yapısını etkileyebilir. Sülfatlar, beton içindeki kimyasal bileşenlerle reaksiyona girerek hasara neden olabilir. Bu hasar, betonun porozitesini artırabilir ve kılcal geçirimlilik katsayısının artmasına yol açabilir. Sonuç olarak, cam tozu ile YFC'nun ağırlıkça değiştirilmesi ve sülfat etkisiyle kılcal geçirimlilik katsayısının artmasının nedenleri, porozite artışı, homojen yapıda mikroskobik boşluklar oluşumu ve kimyasal hasar gibi faktörlerdir. Bu etkileşen faktörler, betonun su geçirgenliğini artırarak kılcal geçirimlilik katsayısının yükselmesine neden olabilir.

4.2.4 Sülfat etkisindeki numunelerin ağırlık değişimleri

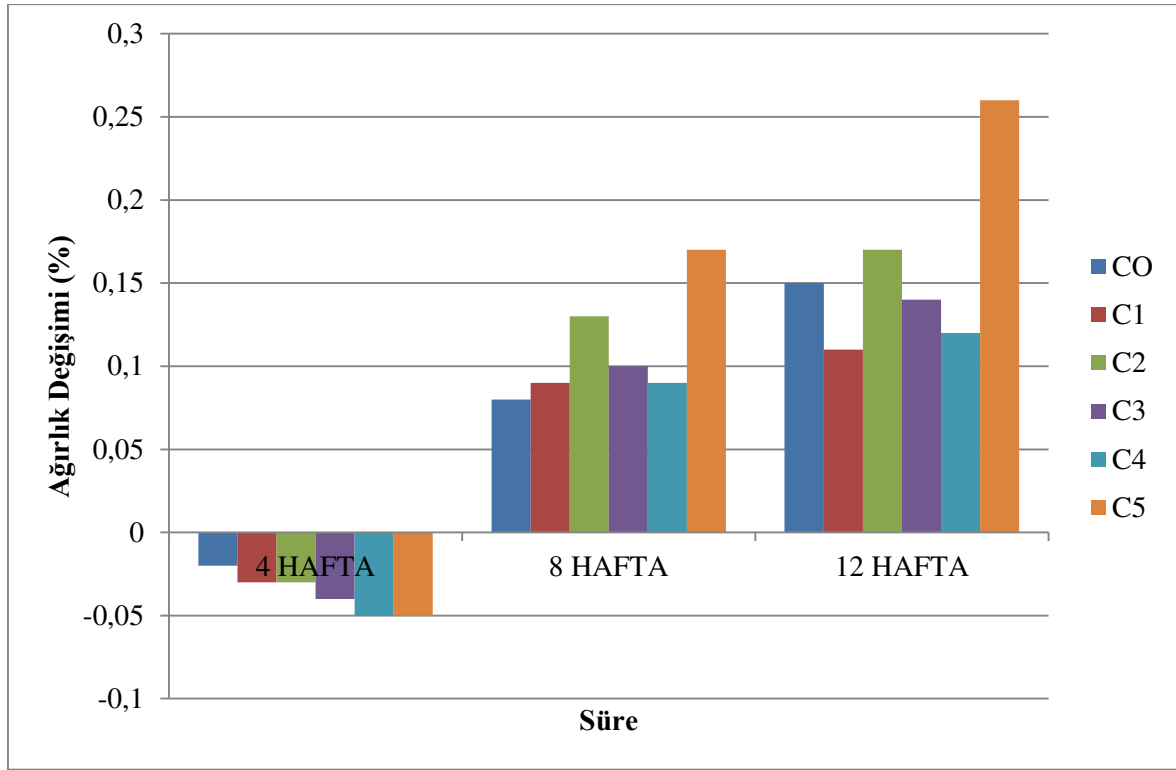
Üretilen geopolimer beton numuneleri, sülfat çözeltilerinde 4, 8 ve 12 hafta boyunca bekletilerek ağırlık değişimleri gözlemlenmiştir. Sülfat etkisine maruz bırakılan beton numunelerinin ağırlık değişim verileri, Çizelge 4.7'de sunulmuş ve bu değişimler Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde, %3 Na₂SO₄ ve %3 MgSO₄ sülfat etkisine 4.8 ve 12 hafta boyunca maruz kalan geopolimer beton numunelerinde ağırlık artışı gözlenmiştir.

Çizelge 4.7: Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri

	Karışım	4 Hafta	8 Hafta	12 Hafta
%3 MgSO ₄	C0	-0,03	0,09	0,16
	C1	-0,04	0,08	0,13
	C2	-0,04	0,11	0,14
	C3	-0,05	0,12	0,16
	C4	-0,06	0,1	0,12
	C5	-0,06	0,13	0,21
%3 Na ₂ SO ₄	C0	-0,02	0,08	0,15
	C1	-0,03	0,09	0,11
	C2	-0,03	0,13	0,17
	C3	-0,04	0,1	0,14
	C4	-0,05	0,09	0,12
	C5	-0,05	0,17	0,26



Şekil 4.15: %3 MgSO₄ çözeltisindeki numunelerin ağırlık değişimleri



Şekil 4.16: %3 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri

Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonda cam tozunun YFC ile ağırlıkça değiştirilmesi, sülfat etkisi ve ağırlık değişiminin ilk 4 hafta azalması, ancak 8 ve 12. haftalarda artmasının düzensiz olmasının birkaç nedeni vardır. Öncelikle, ilk 4 haftada görülen ağırlık değişiminin azalması, geopolimerizasyon sürecinin ilk aşamalarında oluşan kimyasal reaksiyonlar ve betonun sertleşme sürecidir. Bu dönemde, malzemeler arasındaki reaksiyonlar tam olarak gerçekleşmeyebilir veya başlangıçtaki su emilimi nedeniyle betonun ağırlığı değişebilir. Bu durum, ilk aşamada düşük bir ağırlık değişimine neden olabilir. 8 ve 12. haftalarda görülen ağırlık değişiminin artması, betonun daha olgunlaşmış bir aşamaya ulaştığını ve bu süre zarfında farklı kimyasal ve fiziksel etkileşimlerin meydana geldiğini gösterebilir. Geopolimer betonun içyapısındaki porozite, kimyasal reaksiyonların tamamlanması ve matrisin olgunlaşması sonucunda değişebilir. Ayrıca, suyun betondan uzaklaşması ve betonun daha yoğun bir yapı kazanması, ağırlık değişiminin artmasına neden olabilir. Sülfat etkisi, zaman içinde betonun içindeki kimyasal reaksiyonlarla devam edebilir. Sülfatlar, beton içindeki minerallerle reaksiyona girebilir ve bu reaksiyonlar zaman içinde değişebilir. Bu durum, sülfat etkisinin betonun ağırlığı üzerinde farklı etkiler göstermesine neden olabilir. Sonuç olarak, ilk 4 haftada ağırlık değişiminin azalması ve 8 ile 12. haftalarda artmasının düzensiz olmasının nedenleri, geopolimerizasyon sürecinin evreleri, sülfat etkisinin zaman içindeki değişkenliği ve betonun olgunlaşma sürecindeki farklı etkileşimler olabilir. Bu faktörlerin birleşimi, ağırlık değişimindeki düzensizlikleri açıklayabilir.

Karakoç vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, farklı $MgSO_4$ çözelti konsantrasyonlarına maruz kalan dere agregası kullanılarak üretilen geopolimer betonlardaki ağırlık artışının %0.62 ile %1.86 arasında değiştiği belirtilmiştir. Aynı çalışmada, kırma kum kullanılarak üretilen geopolimer betonlardaki ağırlık artışının ise %0.84 ile %2.11 arasında olduğu ifade edilmiştir.

Parthiban ve Mohan (2017) tarafından yapılan çalışmada, YFC bağlayıcı olarak kullanılarak %0, 25, 50, 75 ve 100 oranlarında GDA karışımlar hazırlanmıştır. 28 günlük kür süresinin sonrasında, numuneler %5 sodyum sülfat ve %5 magnezyum sülfat çözeltilerinde 90 gün boyunca bekletilmiş ve ağırlık kaybı incelenmiştir. Magnezyum sülfat çözeltilisine maruz kalan numunelerdeki ağırlık kaybının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Artan GDA oranına göre, sodyum sülfata maruz kalan numunelerdeki ağırlık kaybı sırasıyla %0.68, 0.90, 1.63, 2.25 ve 3.13 olarak belirlenmiştir. Magnezyum sülfata maruz kalan numunelerde ise bu oranlar %2.37, 3.00, 4.10, 4.96 ve 6.34 olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte, normal portland çimentosu ile yapılan referans numunesi ile karşılaştırıldığında bir iyileşme gözlemlenmiştir. Referans numunesindeki ağırlık kaybının sodyum sülfatta %2-2.5 arasında, magnezyum sülfatta ise %6-6.5 arasında olduğu tespit edilmiştir.

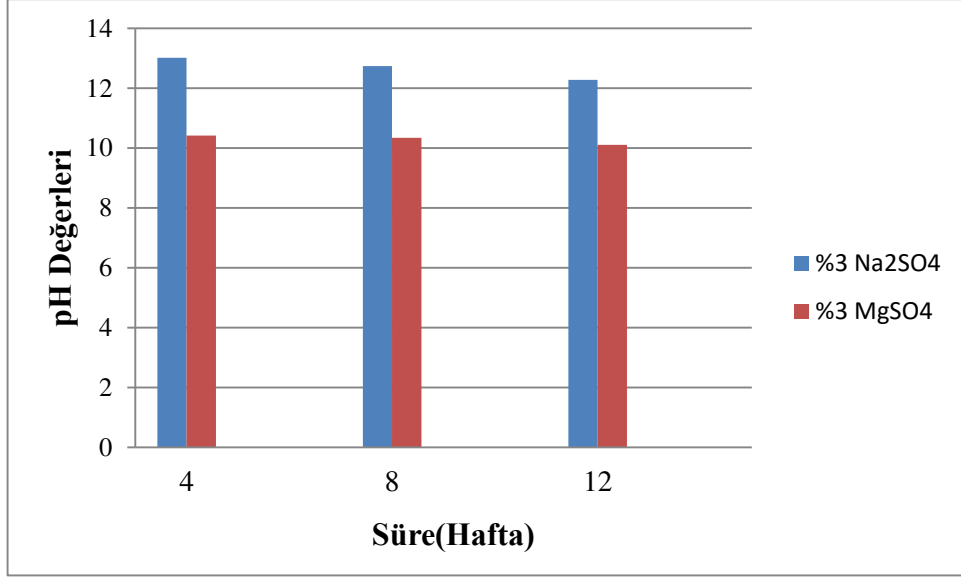
4.2.5 Sülfat çözeltilerinin pH değerlerindeki değişim

Geopolimer beton numuneleri, sülfat etkilerini incelemek amacıyla %3 konsantrasyonlu Na_2SO_4 ve $MgSO_4$ çözeltilerinde sırasıyla 4, 8 ve 12 hafta süreyle bekletilmiştir. Her dört hafta sonunda sülfat çözeltilerinin pH değerleri ölçülmüştür. Elde edilen veriler, Çizelge 4.8'da sunulmuş ve pH değerlerindeki değişim Şekil 4.18'de grafik olarak gösterilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, her iki sülfat çözeltilisinde de bekletme süresi arttıkça pH değerlerinde azalma gözlenmiştir. %3 konsantrasyonlu Na_2SO_4 ve $MgSO_4$ çözeltilerinin pH değerleri, sırasıyla 8.56 ve 8.13 olarak belirlenmiştir. Sülfat çözeltilerinin pH değerlerindeki değişime bakıldığında, %3 Na_2SO_4 çözeltilisinin pH değerlerinde 4, 8 ve 12 hafta boyunca sırasıyla %52.10, %48.83 ve %43.46 oranında artış olduğu, %3 $MgSO_4$ çözeltilisinde ise 4, 8 ve 12 hafta boyunca sırasıyla %28.17, %27.31 ve %24.35 oranında artış olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.8: %3 Na_2SO_4 ve %3 $MgSO_4$ çözeltilerinin pH değerleri değişimi

Çözelti	Çözelti pH değeri	pH değerleri değişimi Süre (Hafta)		
		4	8	12
%3 Na_2SO_4	8.56	13.02	12.74	12.28
%3 $MgSO_4$	8.13	10.42	10.35	10.11



Şekil 4.17: %3 Na₂SO₄ ve %3 MgSO₄ çözeltilerinin pH değerleri değişimi

Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonda cam tozunun YFC ile ağırlıkça değiştirilmesi ve sülfat etkisiyle pH değerinin ilk 4 hafta artmasının ardından 8 ve 12. haftada neden azaldığına dair birkaç olası neden vardır. İlk 4 haftada artan pH değeri, geopolimerizasyon sürecinin hızlanması, alkalinite artışı veya kimyasal reaksiyonların olumlu bir şekilde ilerlemesiyle ilişkilendirilebilir. Ancak, bu artışın sürdürülebilir olup olmadığı, 8 ve 12. haftalarda yaşanan azalmayla ilgili olarak bazı faktörlere bağlı olabilir. Öncelikle, ilk aşamada artan pH değeri, geopolimerizasyonun ana reaksiyonlarının gerçekleşmesiyle bağlantılı olabilir. Ancak, bu reaksiyonlar tamamlandığında veya stabil bir noktaya ulaştığında, pH değerindeki artışın devam etmesi beklenmeyebilir. Diğer bir etken, sülfat etkisinin uzun vadeli etkisi olabilir. İlk 4 haftada sülfatlarla reaksiyonlar gerçekleşmiş olabilir ve bu süreç pH değerini artırmış olabilir. Ancak, daha uzun bir süre zarfında sülfatlar ile etkileşim sürdüğünde, bu etkileşimlerin pH değerini düşürmeye yönelik olumsuz bir etkisi olabilir. Ayrıca, betonun iç yapısındaki diğer kimyasal reaksiyonlar veya su-beton etkileşimleri, 8 ve 12. haftalarda pH değerinde bir azalmaya neden olabilir. Bu durum, betonun yaşlandıkça veya olgunlaştıkça, içerdiği reaktanların ve suyun betonla olan etkileşimlerinin değişmesinden kaynaklanabilir. Sonuç olarak, YFC esaslı geopolimer betonda cam tozunun YFC ile ağırlıkça değiştirilmesi ve sülfat etkisiyle pH değerinin ilk 4 haftada artmasının ardından 8 ve 12. haftada azalmasının nedeni, geopolimerizasyon sürecinin ilerlemesi, sülfat etkisi, ve betonun yaşlanması ile ilgili karmaşık etkileşimler olabilir. Bu durumların düzensiz olması, bir dizi faktörün etkileşiminden kaynaklanabilir.

Alcamand vd. (2018) çalışmasında, MK ve cüruf tabanlı geopolimer betonların sülfat dayanıklılığını incelemişlerdir. Betonların üretiminde alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit kullanılmış, agregalar ise nehir kumu olmuştur. Numuneler, 28 gün boyunca oda

koşullarında kür işlemine tabi tutulmuş ve ardından ağırlıkça %5 $MgSO_4$ çözeltisine 180 gün boyunca maruz bırakılmıştır. Çalışmada sülfat çözeltisinin pH değişimine odaklanılmıştır. pH değerlerinin ilk 30 gün içinde %31.29 arttığı ve daha sonra magnezyum sülfat çözeltisinin testin sonuna kadar (180 gün) yenilenmediği için çözeltinin pH değerinin genellikle sabit kaldığı belirtilmiştir.

4.2.6. Sülfat etkisindeki numunelerin görsel incelemeleri

Sülfat çözeltilerine bırakılan numunelerin görsel olarak incelenmesi sonucunda, numunelerin yüzeyinde sınırlı miktarda çatlak veya bozulma görüldüğü tespit edilmiştir. Numuneler, 12 hafta boyunca sülfat çözeltilerinde bekledikten sonra, Şekil 4.19-20'de gösterildiği gibi görünümünde değişiklikler meydana gelmiştir.

Geopolimer betonlar, magnezyum ve sodyum sülfat gibi agresif kimyasal çözeltilere maruz kaldığında, numunelerin yüzeyinde gözlenen çatlaklar veya bozulmaların temel nedenleri birkaç faktöre dayanmaktadır. İlk olarak, sülfat iyonlarının etkisi önemlidir. Magnezyum ve sodyum sülfat çözeltileri, içerdikleri sülfat iyonları nedeniyle agresif bir ortam oluşturur. Bu iyonlar, geopolimer matrisindeki kimyasal bağları bozar ve numunenin yüzeyinde çatlaklara neden olur. İkinci olarak, sodyum ve magnezyum iyonlarının reaksiyonları söz konusudur. Bu iyonlar, betondaki bazı bileşenlerle reaksiyona girerek kristal oluşumuna yol açar. Oluşan kristaller, numunenin içinde ve yüzeyinde birikerek çatlaklara veya bozulmalara sebep olur. Üçüncü olarak, hidrasyon denge problemleri önemlidir. Sülfat çözeltilerine maruz kaldığında, geopolimer betonlarda hidrasyon dengesi bozulur. Bu, su ve diğer bileşenlerin çözeltiden numuneye doğru hareket etmesine ve kimyasal reaksiyonların hızlanmasına neden olur. Hızlı reaksiyonlar, numunenin iç yapısında gerilimlere yol açarak çatlakların oluşmasına katkıda bulunur. Son olarak, kristal genişlemesi etkili bir faktördür. Sülfat çözeltilerine maruz kalan numunelerde, çatlak ve bozulmaların bir diğer nedeni de kristal genişlemesidir. Sülfat iyonları, hidratlı haldeyken kristalleşirken hacimlerini genişletir. Bu genişleme, numunenin içinde mekanik gerilmelere ve yüzeyde çatlaklara neden olabilir. Bu nedenlerle, magnezyum ve sodyum sülfat çözeltilerine maruz kalan geopolimer beton numuneleri, görsel olarak sınırlı miktarda çatlak veya bozulma sergilemiştir. Beton bileşimi ve sülfat çözeltisinin özelliklerine bağlı olarak, bu değişikliklerin şiddeti ve yaygınlığı çeşitlilik gösterebilir.



Şekil 4.18: %3 MgSO_4 çözeltisinde 12 hafta bekletilen küp ve prizma numunelerin görünümleri



Şekil 4.19: %3 Na_2SO_4 çözeltisinde 12 hafta bekletilen küp ve prizma numunelerin görünümleri

Tuncan vd. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, geopolimer betonların görsel görünümü üzerinde sülfatın etkisi incelenmiştir. Deneylerde, farklı oranlarda magnezyum sülfat katkısı kullanılarak hazırlanan numunelerin görünümleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, magnezyum sülfatın betonların yüzeyinde beyaz lekeler oluşumuna neden olduğunu ve bu etkinin sülfat konsantrasyonu arttıkça arttığını göstermiştir.

Provis vd. (2016) tarafından yürütülen bir çalışmada, geopolimer betonların sülfat ile karşılaştığında görsel görünümü nasıl etkilediği araştırılmıştır. Deney sonuçları, sülfatın geopolimer pastaların renginde ve yüzeyinde değişikliklere neden olduğunu göstermiştir. Sülfatın, pastaların gri tonunu artırdığı ve yüzeylerinde beyaz lekeler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, sülfatın geopolimer betonların estetik görünümünü olumsuz etkileyebileceğini göstermiştir.

Thokchom vd. (2010) tarafından gerçekleştirilen bir deneysel araştırmada, magnezyum sülfat çözeltisi ortamında UK bazlı geopolimer beton numunelerinin performansı incelenmiştir. Araştırma sonucunda, numune yüzeyinde başlangıçta yumuşak olan ve daha sonra sert kristallere dönüşen beyaz tortuların oluştuğu belirtilmiştir.

Sata vd. (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, katkısız PÇ betonlarda geopolimer betonlara göre daha fazla bozulma olduğu belirtilmiştir. Bu bozulmanın nedeni, kalsiyum hidroksit ve kalsiyum monosülfoalüminatların sülfatla reaksiyona girmesinden kaynaklanan dayanım kaybı, genleşme ve çatlaklara yol açan etrenjit ve alçıtaşına dönüşmeleridir. Magnezyum sülfat çözeltilerine maruz kalan betonlarda, katyon değişimi sonucunda yüzeyde beyaz CaSO_4 tortuları görülmüştür. Geopolimere eklenen cüruf miktarı ve alkali aktivatör oranının artmasıyla tortu miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Sodyum sülfat çözeltisi içeren beton numunelerinde, aktif mineral elementlerinin betonlardan yıkanıp uzaklaşması nedeniyle betonların içyapısının bozulduğu belirtilmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, YFC yerine ağırlıkça %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında cam tozu kullanılarak geopolimer beton numuneleri üretilmiştir. Üretilen geopolimer beton numuneleri, ağırlıkça %3 konsantrasyonlu Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerinde 4, 8 ve 12 hafta süresince bekletilmiştir. Beton numunelerinin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ağırlık değişimi ve kılcal geçirimsizlik katsayısı gibi özellikleri incelenmiştir. Ayrıca görsel değişimler de gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, 28 gün kür edilen kontrol numuneleriyle karşılaştırılmıştır. Sülfat çözeltilerinin 4, 8 ve 12 hafta süresince pH değerlerindeki değişim de incelenmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar, aşağıda özetlenmiştir.

- Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı, cam tozu miktarı arttıkça azalmıştır. C0 karışımı, en yüksek basınç dayanımı olan 75.5 MPa değerini sağlarken, C5 karışımı en düşük basınç dayanımı olan 50.6 MPa değerini göstermiştir.
- Eğilme dayanımı açısından da benzer bir eğilim gözlemlenmiştir; cam tozu miktarı arttıkça eğilme dayanımı azalmıştır. C0 karışımı, en yüksek eğilme dayanımı olan 8.3 MPa değerini elde ederken, C5 karışımı en düşük eğilme dayanımı olan 6.65 MPa değerini sergilemiştir.
- Ayrıca, %3 Na_2SO_4 ve %3 MgSO_4 çözeltilerinde bekletilen numunelerin basınç dayanımı, bekletilme süresi arttıkça azalmıştır. 12 hafta sonunda, %3 Na_2SO_4 çözeltilisinde bekletilen numunelerde en yüksek basınç dayanımı C0 karışımında 71.2 MPa olarak elde edilirken, en düşük basınç dayanımı C5 karışımında 41.2 MPa değeriyle belirlenmiştir. Aynı süreçte, %3 MgSO_4 çözeltilisinde bekletilen numunelerde en yüksek basınç dayanımı 70.9 MPa değeriyle C0 karışımında gerçekleşirken, en düşük basınç dayanımı C5 karışımında 40.5 MPa değeriyle tespit edilmiştir.
- %3 Na_2SO_4 çözeltilerinde bekletilen numunelerin basınç dayanımlarının, %3 MgSO_4 çözeltilisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımlarından daha düşük olduğudur.
- %3 Na_2SO_4 ve %3 MgSO_4 çözeltilerinde bekletilen numunelerin bekletilme süresi arttıkça eğilme dayanımı azalmıştır. 12 hafta sonunda %3 Na_2SO_4 çözeltilisi ile bekletilen numunelerde en yüksek eğilme dayanım değeri C0 karışımında 7.41 MPa olarak elde edilirken, en düşük eğilme dayanım değeri C5 karışımında 5.09 MPa olarak kaydedilmiştir. Aynı süreçte, %3 MgSO_4 çözeltilisi ile bekletilen numunelerde ise en yüksek eğilme dayanım değeri C0 karışımında 7.32 MPa olarak belirlenirken, en düşük eğilme dayanım değeri C5 karışımında 5.03 MPa olarak gözlemlenmiştir. %3 Na_2SO_4 çözeltileri ile bekletilen numunelerin eğilme dayanımlarının, %3 MgSO_4 çözeltileri ile bekletilen numunelerin basınç dayanımlarından daha az görülmüştür.
- Sülfat etkisi sonrası beton numunelerinde ağırlık artışı olmuş, ancak bu artış düzensiz bir şekilde gerçekleşmiştir.

- Kontrol numunelerinin 28 gün kür edilen kılcal geçirimlilik katsayısı, cam tozu oranı arttıkça ve deney ölçüm zamanı arttıkça artmıştır. Ancak sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayıları kontrol numunelerine göre azalmıştır. Sülfat etkisi altında bekletilme süresi arttıkça ise kılcal geçirimlilik katsayıları artmıştır.
- Sülfat çözeltilerinin pH değerleri 12 hafta boyunca ölçülmüş, %3 Na₂SO₄ çözeltisinin pH değerlerinde 4 hafta sonra 52,10, 8 hafta sonra 48,83 ve 12 hafta sonra 43,46 oranlarında artış görülürken, %3 MgSO₄ çözeltisinde ise 4 hafta sonra 28,17, 8 hafta sonra 27,31 ve 12 hafta sonra 24,35 oranlarında artış tespit edilmiştir.
- %3 Na₂SO₄ çözeltisi ile 12 hafta süresince bekletilen numunelerin görünümünde herhangi bir değişim olmazken, %3 MgSO₄ çözeltisi ile 12 hafta bekletilen numunelerin yüzeylerinde beyazımsı lekeler ve renk değişimi gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara dayanarak, aşağıdaki öneriler ele alınabilir:

Bu çalışmanın uygulanan yöntemleri ve elde edilen sonuçları, geopolimer betonların kimyasal etkilere karşı dayanıklılığını araştırmak ve durabilitesini arttırmak için çeşitli öneriler geliştirmeye olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, silis modülü, s/b oranı, alkali türü ve miktarları, mineral ve kimyasal katkı maddeleri ve kür koşulları gibi faktörlerin değiştirilmesi ile üretilen geopolimer betonların dayanıklılıkları arasında karşılaştırmalar yapılabilir. Ayrıca, farklı konsantrasyonlardaki kimyasal çözeltilerin geopolimer numuneler üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Akman, M. S. (1996).** Kimyasal katkıların betona uygulanması. In *4. Ulusal Beton Kongresi* (pp. 1–12).
- Alcamand, H. A., Borges, P. H., Silva, F. A., & Trindade, A. C. C. (2018).** The effect of matrix composition and calcium content on the sulfate durability of metakaolin and metakaolin/slag alkali-activated mortars. *Ceramics International*, 44(5), 5037–5044.
- Aldred, J., & Day, J. (2012, August).** Is geopolymer concrete a suitable alternative to traditional concrete? In *Proceedings of the 37th Conference on Our World in Concrete & Structures* (pp. 29–31). Singapore.
- Aleem, M. A., & Arumairaj, P. D. (2012).** Geopolymer concrete—a review. *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, 1(2), 118–122.
- Al-Obeidy, N. F., & Khalil, W. I. (2016).** Properties of high strength eco-friendly concrete with glass waste powder. *Global Journal of Engineering Science and Researches*, 3, 43–53.
- Aly, A. M., El-Feky, M. S., Kohail, M., & Nasr, E. A. R. (2019).** Performance of geopolymer concrete containing recycled rubber. *Construction and Building Materials*, 207,
- Balaguru, P. (1998).** Geopolymer for protective coating of transportation infrastructures. *Unpublished manuscript*.
- Baradan, B., Yazıcı, H., & Ün, H. (2002).** Betonarme yapılarda kalıcılık (durabilite). *DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları*, 89-200.
- Barati, M., Esfahani, S., & Utigard, T. (2011).** Energy recovery from high temperature slags. *Energy*, 36(6), 5440-5449.
- Barbosa, V. F. F., MacKenzie, K. J. D., & Thaumaturgo, C. (2000).** Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: Sodium polysialate polymers. *International Journal of Inorganic Materials*, 2(4), 309–317.
- Belkowitz, J. S. (2009).** The investigation of nano silica in the cement hydration process. *Digital Commons @ DU*.
- Bellport, B. P. (1968).** Combating sulphate attack on concrete on Bureau of Reclamation projects. *Performance of Concrete*, 77-92.
- Berozashvili, M. (2001).** Continuous reinforcing fibers are being offered for construction, civil engineering and other composites applications. *Adv Materials Com News, Compos Worldwide*, 5–6.
- Bıçakcıoğlu, N. (2020).** Cam tozu ve YFC kullanımlarının ultra yüksek performanslı beton karışımlarının basınç dayanımına etkisi (Yüksek lisans tezi). Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

Bisio, G. (1997). Energy recovery from molten slag and exploitation of the recovery energy. *Energy*, 22(5), 501-509.

Bondar, D. (2013). Geo-polymer concrete as a new type of sustainable construction materials. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*.

Bouty, A., & Homsy, F. (2021). The effects of partially replacing cement by glass waste powder on concrete properties. *Journal of Silicate Based and Composite Materials*, 73(2), 40-43.

Brodnax, L., & Rochelle, G. (2000). Preparation of calcium silicate absorbent from iron blast furnace slag. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50(12), 1655-1662.

Cheng, T. W., & Chiu, J. P. (2003). Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Minerals Engineering*, 16(3), 205–210.

Christiansen, M. U. (2013). An investigation of waste glass-based geopolymers supplemented with alumina (Master's thesis, Michigan Technological University).

Crossin, E. (2015). The greenhouse gas implications of using ground granulated blast furnace slag as a cement substitute. *Journal of Cleaner Production*, 95, 101-108.

Cyr, M., Idir, R., & Poinot, T. (2012). Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet. *Journal of Materials Science*, 47(7), 2782–2797.

Davidovits, J. (1999). Chemistry of geopolymeric systems, terminology. In *Geopolymer* (Vol. 99, pp. 9–39).

Dimitrova, S. (1995). Metal sorption on blast-furnace slag. *Water Research*, 30(1), 228-232.

Dippenaar, R. (2005). Industrial uses of slag (the use and re-use of iron and steelmaking slags). *Ironmaking & Steelmaking*, 32(1), 35-46.

Djwantoro Hardjito, Sumajouw, D. M. J., Wallah, S. E., & Rangan, B. V. (2004). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal*, 101(6), 467–472.

Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933.

Eisenhuttenleute, V. (1999). *Slag atlas*. Verlag Stahleisen.

Erdoğan, T. (2003). *Beton*. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Ankara.

Federico, L. M., & Chidiac, S. E. (2009). Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete—critical review of treatment methods. *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 606-610.

Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., & López-Hombrados, C. (2006). Engineering properties of alkali-activated fly ash. *ACI Materials Journal*, 103(2), 106–112.

Flatt, R. J. (2002). Salt damage in porous materials: How high supersaturations are generated. *Journal of Crystal Growth*, 242(3-4), 435-454.

Formoso, A., Babich, A., Gudenay, H., Garcia, A., & Cores, A. (1999). Heat exchange in the hearth of a blast furnace operating with combined blast parameters. *ISIJ International*, 39(11), 1134-1139.

Francis, A. (2005). Non-isothermal crystallization kinetics of a blast furnace slag glass. *Journal of the American Ceramic Society*, 88(7), 1859-1863.

Fredericci, C., Zanutto, E., & Ziemath, E. (2000). Crystallization mechanism and properties of a blast furnace slag glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 273(1), 64-75.

Gan, L., & Lai, C. (2014). A general viscosity model for molten blast furnace slag. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 45(5), 875-888. <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0028-5>

Gourley, J. T., & Johnson, G. B. (2005). Developments in geopolymer precast concrete. In *Proceedings of the World Congress Geopolymer*.

Günay, V., & Yılmaz, Ş. (2010). *Cam - seramikler bilim ve teknolojisi* (1st ed.). TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi.

Ilıca, T. (2008). Farklı çimentolarla üretilen betonlarda sülfat etkisi ve klor geçirimsizliği (Yüksek lisans tezi). Sakarya Üniversitesi, Sakarya.

Ito, T., Yotsuji, J., & Nagamune, A. (2014). Development of pig iron and molten slag level measurement technique for blast furnace. *ISIJ International*, 54(11), 2618–2622.

Jak, E., & Hayes, P. (2004). Phase equilibria determination in complex slag systems. Paper presented at the International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts, South African Institute of Mining and Metallurgy.

Kan, T., Strezov, V., Evans, T., & Nelson, P. (2015). Trace element deportment and particle formation behaviour during thermal processing of iron ore: Technical reference for risk assessment of iron ore processing. *Journal of Cleaner Production*, 102, 384-393.

Karahan, O., Tanyildizi, H., & Atis, C. D. (2009). Statistical analysis for strength properties of polypropylene-fibre-reinforced fly ash concrete. *Magazine of Concrete Research*, 61(7), 557–566.

- Karakoç, M. B., Türkmen, İ., Maraş, M. M., Kantarcı, F., & Demirboğa, R. (2016).** Sulfate resistance of ferrochrome slag based geopolymer concrete. *Ceramics International*, 42(1), 1254-1260.
- Khan, M. S. H., Kayali, O., & Troitzsch, U. (2017).** Effect of NaOH activation on sulphate resistance of GGYFS and binary blend pastes. *Cement and Concrete Composites*, 81, 49-58.
- Kim, J., Lee, Y., Min, D., Jung, S., & Yi, S. (2004).** Influence of MgO and Al₂O₃ contents on viscosity of blast furnace type slags containing FeO. *ISIJ International*, 44(8), 1291-1297.
- Komnitsas, K. A. (2011).** Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities. *Procedia Engineering*, 21, 1023-1032.
- Kostmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., MacLeod, N. F., & McGrath, R. J. (2002).** *Design and control of concrete mixtures* (Engineering Bulletin, 101(7)).
- Kriskova, L., Pontikes, Y., Pandelaers, L., Cizer, O., Jones, P., Balen, K., & Blanpain, B. (2013).** Effect of high cooling rates on the mineralogy and hydraulic properties of stainless steel slags. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 44(5), 1173-1184.
- Kumar, S., Kumar, R., Bandopadhyay, A., Alex, T., Kumar, B., Das, S., & Mehrotra, S. (2008).** Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of Portland slag cement. *Cement & Concrete Composites*, 30(8), 679-685.
- Kuo, Y., Wang, J., Wang, C., & Tsai, C. (2008).** Effect of water quenching and SiO₂ addition during vitrification of fly ash Part 1: On the crystalline characteristics of slags. *Journal of Hazardous Materials*, 152(2), 994-1001.
- Laskar, A. I., & Bhattacharjee, R. (2011).** Rheology of fly-ash-based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal*, 108(5).
- Lee, H. (2002).** Fire resistance property of RC structure members strengthened with fiber sheet. *Mag Korean Concrete Institute*, 45-50.
- Liapis, I., & Papayianni, I. (2015).** Advances in chemical and physical properties of electric arc furnace carbon steel slag by hot stage processing and mineral mixing. *Journal of Hazardous Materials*, 283, 89-97.
- Lleyda, J. L. (2004).** Precast elements made of alkali-activated fly ash concrete. In *Proceedings of the 8th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete* (pp. 545-558). Las Vegas, USA.
- Lloyd, N., & Rangan, B. (2010).** Geopolymer concrete: A review of development and opportunities. In *Proceedings of the 35th Conference on Our World in Concrete & Structures* (pp. 307-314).

- Logachev, G., Gostenin, V., Pishnograev, S., Seleznev, D., & Gridasov, V. (2013).** Mobility of blast-furnace slag. *Steel in Translation*, 43(12), 805–807.
- Long, W. J., Li, H. D., Wei, J. J., Xing, F., & Han, N. (2018).** Sustainable use of recycled crumb rubbers in eco-friendly alkali activated slag mortar: Dynamic mechanical properties. *Journal of Cleaner Production*, 204, 1004-1015.
- MacKechnie, S. (2013).** *An exploration of the use of technology in primary school physical education* (MPhil(R) thesis). University of Glasgow.
- Madheswaran, C. K., Gnanasundar, G., & Gopalakrishnan, N. (2013).** Effect of molarity in geopolymer concrete. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 4(2), 106.
- Mehta, A., & Ashish, D. K. (2020).** Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review. *Journal of Building Engineering*, 29, 100888.
- Mehta, P. K. (2002).** Greening of the concrete industry for sustainable development. *Concrete International*, 24(7), 23-28.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2006).** *Concrete: Microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill.
- Meierhoff, J. (2014).** eCullet plant tour.
- Mendybaev, R., Richter, F., & Davis, A. (2006).** Reevaluation of the akermanite-gehlenite binary system. In *Proceedings of the 37th Annual Lunar and Planetary Science Conference* (March 13-17, 2006, League City, Texas).
- Menendez, G., Bonavetti, V., & Irassar, E. F. (2003).** Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag. *Cement & Concrete Composites*, 25(1), 61–67.
- Meyer, C. (2009).** The greening of the concrete industry. *Cement & Concrete Composites*, 31(8), 601–605.
- Mindess, S., Young, F., & Darwin, D. (2003).** *Concrete* (2nd ed.). Technical Documents.
- Motz, H., & Geiseler, J. (2001).** Products of steel slags: An opportunity to save natural resources. *Waste Management*, 21(3), 285-293.
- Nagalia, G., Park, Y., Abolmaali, A., & Ph, D. (2016).** Compressive strength and microstructural properties of fly ash-based geopolymer concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(12), 1–11.
- Nakamoto, M., Tanaka, T., Lee, J., & Usui, T. (2004).** Evaluation of viscosity of molten SiO₂–CaO–MgO–Al₂O₃ slags in blast furnace operation. *ISIJ International*, 44(12), 2115–2119.

National Slag Association. (2013). *National Slag Association*. Retrieved March 1, 2016, from [URL]

Nazari, A., & Riahi, S. (2011). The role of SiO₂ nanoparticles and ground granulated blast furnace slag admixtures on physical, thermal, and mechanical properties of self-compacting concrete. *Materials Science and Engineering: A*, 528(6), 2149–2157.

Neville, A. M. (1996). *Properties of concrete* (4th ed.). Addison Wesley Longman Limited.

Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2004). *Concrete Technology*. Pearson Education.

Ozturk, Z., & Gultekin, E. (2015). Preparation of ceramic wall tiling derived from blast furnace slag. *Ceramics International*, 41(12), 12020–12026.

Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323–1329.

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.

Polley, C., Cramer, S. M., & de la Cruz, R. V. (1998). Potential for using waste glass in Portland cement concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(4), 210–219.

Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2014). *Alkali activated materials: State-of-the-art report* (RILEM TC 224-AAM). RILEM Publications.

Puertas, F., & Torres-Carrasco, M. (2014). Use of glass waste as an activator in the preparation of alkali-activated slag: Mechanical strength and paste characterization. *Cement and Concrete Research*, 57, 95–104.

Redden, R., & Neithalath, N. (2014). Microstructure, strength, and moisture stability of alkali activated glass powder-based binders. *Cement and Concrete Composites*, 45, 46–56.

Said, A. M., Zeidan, M. S., Bassuoni, M. T., & Tian, Y. (2012). Properties of concrete incorporating nano-silica. *Construction and Building Materials*, 36, 838–844.

Saito, N., Hori, N., Nakashima, K., & Mori, K. (2003). Viscosity of blast furnace type slags. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 34B(4), 509–516.

Sata, V., Sathonsaowaphak, A., & Chindaprasirt, P. (2012). Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack. *Cement and Concrete Composites*, 34(5), 700–708.

Savastano, H., Warden, P., & Coutts, R. (2001). Ground iron blast furnace slag as a matrix for cellulose-cement materials. *Cement and Concrete Composites*, 23(5), 389–397.

Shi, C., & Zheng, K. (2007). A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(2), 234–247.

Sim, J., Park, C., & Moon, D. Y. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites Part B: Engineering*, 36(6–7), 504–512.

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.

Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., & Chindaprasirt, P. (2011). NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel*, 90(6), 2118–2124.

Swanepoel, J. C., & Strydom, C. A. (2002). Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. *Applied Geochemistry*, 17(8), 1143–1148.

Temuujin, J., Rickard, W., Lee, M., & Van Riessen, A. (2011). Preparation and thermal properties of fire resistant metakaolin-based geopolymer-type coatings. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 357(5), 1399–1404.

Thokchom, S., Ghosh, P., & Ghosh, S. (2010). Performance of fly ash based geopolymer mortars in sulphate solution. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 3(1), 36–40.

Togobitskaya, D., Otorvin, P., Bel'kova, A., & Grin'ko, A. (2004). Automated system for monitoring and controlling the slag regime in blast furnace smelting. *Metallurgist*, 48, 147–152.

Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., & Lukey, G. C. (2002). The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers. *Chemical Engineering Journal*, 89(1–3), 63–73.

Wang, Z., Ni, W., Jia, Y., Zhu, L., & Huang, X. (2010). Crystallization behaviour of glass ceramics prepared from the mixture of nickel slag, blast furnace slag and quartz sand. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 356(30), 1554–1558.

Xu, H., & Van Deventer, J. S. J. (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 247–266.

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.

Yücel, H. E., Öz, H. Ö., Güneş, M., & Kaya, Y. (2019). Basic durability properties of standard mortars produced with recycled glass powder. *Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 8(1), 215–225.

Zhao, H., Sun, W., Wu, X., & Gao, B. (2015). The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures. *Journal of Cleaner Production*, 95, 66–74.

Zheng, K., Zhang, Z., Liu, L., & Wang, X. (2014). Investigation of the viscosity and structural properties of CaO-SiO₂-TiO₂ slags. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 45B(4), 1389–1397.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: EŞREF AZİM

Eğitim Durumu:

Lisans: 2021, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı Kurum: 2022 Malatya İl Göç İdaresi Müdürlüğüne başladım...

