

**BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÜŞÜK SICAKLIKLARDA KÜR EDİLEN ELYAF TAKVİYELİ
ALKALİ AKTİVE EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN CÜRUFU/PORTLAND
ÇİMENTOLU HARÇLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ZEYNEP BAHÇECİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI

Doç. Dr. Ahmet Benli

BİNGÖL-2024



T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK SICAKLIKLARDA KÜR EDİLEN ELYAF TAKVİYELİ ALKALİ AKTİVE
EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN CÜRUFU/PORTLAND ÇİMENTOLU HARÇLARIN
MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ**

Doç. Dr. Ahmet BENLİ danışmanlığında, Zeynep BAHÇECİ tarafından hazırlanan bu çalışma 02/07/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Mehmet KARATAŞ	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Ahmet BENLİ	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Murat DENER	İmza	:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun// tarih ve/ nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmaları aşamaların da gerekli maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen tüm çalışanlara da destek olan ve yönlendiren değerli danışmanım sayın Doç. Dr. Ahmet BENLİ hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım da gerekli laboratuvar araç ve gereçlerini kullanmamda laboratuvar çalışmalarım da bilgi ve beceresiyle her daim beni destekleyen ve yönlendiren hiçbir konu da desteğini esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Murat DENER hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bizlere gerekli olan çalışma ve araştırma ortamını hazırlayan, emeği geçen Bingöl Üniversitesi hocalarına ve çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak hiçbir konuda maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen her zaman yanımda olan rahmetli babam H. Mehmet GÜL'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ZEYNEP BAHÇECİ

Bingöl 2025

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	6
2.1. Alkali Aktivatörler.....	7
2.2. Alkali-Aktif Malzemenin Üretimi.....	8
2.3. Çevresel Etkileri.....	9
2.4. Alkali-Aktif Bağlayıcılar İçin Öncü Malzemeler.....	11
2.4.1. Alüminosilikat Esaslı Malzemeler.....	12
2.5. Alkali-Aktif Bağlayıcıların Kür Koşulları.....	13
3. ALKALİ-AKTİF YÜKSEK FIRIN CÜRUFU.....	16
3.1. Yüksek Fırın Cürufu(YFC).....	18
3.2. Normal Sıcaklıklarda Alkali-Aktif Cüruf Üretimi.....	19
3.3. Düşük Sıcaklıklarda Alkali-Aktif Cüruf Üretimi.....	21
3.3.1. Düşük Sıcaklıklarda Alkali-Aktif Cüruf Aktivatör Konsantrasyonu... ..	22
3.4. Yüksek Sıcaklıklarda Alkali-Aktif Cüruf Üretimi.....	24
4. METERYAL VE YÖNTEM.....	26
4.1. Kullanılan Malzemeler.....	27
4.1.1. Yüksek Fırın Cürufu.....	27
4.1.2. Portland Çimentosu.....	28
4.1.3. Alkali Aktivatörler.....	30
4.1.3.1. Sodyum Hidroksit.....	30
4.1.3.2. Sodyum Silikat.....	31

4.1.4	Agrega.....	32
4.1.5	Doğal Su Kaynağı.....	33
4.1.6	Sülfürik Asit.....	33
4.1.7	Bazalt Elyaf.....	34
4.2.	Karışım Oranları ve Numunelerin Hazırlanması.....	35
4.2.1.	Karışım Oranları.....	35
4.2.2.	Numunelerin Hazırlanışı.....	36
4.3.	Gerçekleştirilen Deneyler.....	36
4.3.1.	Basınç Deneyi.....	38
4.3.2.	Ultrasen Hız Ölçümü (UPV).....	38
4.3.3.	Kütle Değişimi.....	39
4.3.4.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	39
4.3.5.	Sülfürik Asit Saldırısı.....	40
5.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	41
5.1.	Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları.....	41
5.2.	Eğilme Dayanımı.....	44
5.3.	Ultrasonik Ses Hız Ölçümü	47
5.4.	Sülfürik Asit Etkisi Sonrası Deney Sonuçları	50
5.4.1.	Basınç Dayanımı.....	50
5.4.2.	Ultrasonik Hız Ölçümü.....	55
5.4.3.	Kütle Artışı.....	58
5.4.4.	Sülfürik Asit Saldırısı Sonrası SEM Gözlemleri.....	61
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	77
	KAYNAKLAR.....	79

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

PÇ	: Portland Çimentosu
CO ₂	: Karbon Di Oksit
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
AAM	: Alkali Aktif Malzemeler
CaO	: Karbon mono oksit
SiO ₂	: Silisyum Di oksit
AAC	: Alkali Aktif Cüruf
Mpa	: Mega Paskal
°C	: Santigrat Derece
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
AD	: Alkali Dozajı
AA	:Alkali Aktivatör
Kg	: Kilogram
Mm	: Milimetre
%	: Yüzde
gr	: Gram
Cm ³	: Santimetreküp
N	: Newton
Mm ²	: Milimetrekare
KN	: Kilo Newton
UK	: Uçucu Kül
UPV	: Ultrases Dalga Hızı
AACPÇ	: Alkali Aktif Cüruf / Portland Çimentosu
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
CaSO ₄	: Kalsiyum sülfat
NaOH	: Sodyum Hidroksit
Na ₂ SiO ₃	: Sodyum Silikat
Ca (OH) ₂	: kalsiyum Oksit

AAC	: Alkali Aktif Cüruf
AEM	: Aktif Edilmiş Malzemeler
SÇ	: Silis Çözeltisi
ASR	: Alkali Silika Reaksiyonu
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrat
C-A-S-H	: Kalsiyum Alüminat Silikat Hidrat
GYFC	: Granüle Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu
AEM	:Aktif Edilmiş Malzemeler

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. YFC Kümülatif Hacim b-) YFC yoğunluk c-) YFC SEM Görüntüsü.....	28
Şekil 2. Nehir agregalarının tane boyutu dağılımı	33
Şekil 3. Basınç Dayanım Cihazı.....	38
Şekil 4. SEM cihazı[119]	39
Şekil 5. Karışımların basınç dayanımı sonuçları.....	44
Şekil 6. Eğilme dayanımı sonuçları	46
Şekil 7. Ultrases Hız Ölçüm Grafiği	48
Şekil 8. Ultrases Hız Ölçüm Ve Basınç Dayanım Arasındaki Korelasyon Grafiği	50
Şekil 9. a) 90 günlük Sülfirik asit Etkisi Sonrası Basınç Dayanımı b-) SES Sonrası Basınç Dayanım Değişimi.....	55
Şekil 10. a) 90 gün kütleme sonrası ve ardından 90 gün sülfirik asit ortamına maruziyet sonrası Ultrasonik Pulse Hızı (UPV) sonuçları. b) Sülfirik asit maruziyetinden sonra basınç dayanımı ile UPV arasındaki ilişki grafiği.	58
Şekil 11. 90 Günlük Sülfirik Asit Maruziyeti Sonrası Kütle Artışlar	61
Şekil 12. Sülfirik asit maruziyeti sonrası M1.4D6P0 karışımına ait SEM görüntüsü.....	64
Şekil 13. Sülfirik asit maruziyeti sonrası D8C0BF6 karışımına ait SEM görüntüsü.....	67
Şekil 14. Sülfirik asit maruziyeti sonrası D8C15BF0 karışımına ait SEM görüntüsü.	69
Şekil 15. Asit maruziyeti sonrası D8C15BF6 karışımının SEM görüntüsü.....	71
Şekil 16. Asit maruziyeti sonrası D12C0BF0 karışımının SEM görüntüsü.....	73
Şekil 17. Asit etkisi sonrası D12C0BF6 karışımının SEM görüntüsü	76

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 1. YFC ve PÇ'nin kimyasal bileşimleri (ağırlıkça%).....	26
Tablo 2. PÇ Kimyasal Bileşimi.....	29
Tablo 3. Bazalt lifin fiziksel ve kimyasal özellikleri	35
Tablo 4. Karışım Oranları	35
Tablo 5. Gerçekleştirilen testler	37

DÜŞÜK SICAKLIKLARDA KÜR EDİLEN ELYAF TAKVİYELİ ALKALİ AKTİVE EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN CÜRUFU/PORTLAND ÇİMENTOLU HARÇLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

ÖZET

Bu çalışma, granüle yüksek fırın cürufu (YFC) ve kısmen yerine konmuş Portland çimentosu (PC) içeren soğuk kürlü hibrit alkali aktive harçların mekanik performansı ve asit direncini incelemektedir. İki farklı alkali aktivatör dozu (%8 ve %12 Na₂O bağlayıcı kütlesine göre eşdeğeri) ile üç farklı bazalt lifi (BF) oranı (%0, %0,3 ve %0,6) kullanılarak, bu parametrelerin 90 gün sülfürik asit maruziyeti sonrası basınç dayanımı, ultrasonik atım hızı (UPV) ve kütle değişimi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Tüm karışımlar, asit maruziyetinden önce 0°C’de 90 gün boyunca kürlenmiştir. Sonuçlar, aktivatör dozunun artırılmasının erken dönemde yoğunlaşmayı geliştirdiğini ancak lif takviyesi olmadığında mikro yapısal zayıflıklara yol açtığını göstermiştir. Soğuk kür altında %8 alkali, %15 Portland çimentosu ve %0,6 bazalt lifi içeren optimum karışım, 90. günde en yüksek dayanımı (61,72 MPa) elde ederken, daha yüksek alkali dozu (%12) erken dayanımı artırmasına rağmen lif takviyeli karışımlarda uzun vadeli performansı düşürmüştür. En yüksek asit sonrası basınç dayanımı (69,33 MPa), %8 aktivatör dozu, %100 YFC ve %0,6 BF içeren karışımda gözlemlenmiştir. En düşük dayanım değerleri ise lif içermeyen ve Portland çimentosu içeren karışımlarda görülmüştür. SEM analizleri, asit maruziyetinin lifler etrafında ikincil yoğunlaşmayı teşvik ettiğini ancak Portland çimentosu açısından zengin karışımlarda lokalize bozulmaları da ortaya koymuştur. Bulgular, soğuk kür, optimize alkali aktivatör dozu ve lif takviyesinin hibrit alkali aktive harçların mekanik özellikleri ile asit direncini etkin şekilde artırabileceğini göstermektedir. Ancak, agresif ortamlar altında uzun vadeli performansı maksimize etmek ve asite duyarlı fazların oluşumunu minimize etmek için Portland çimentosu içeriğinin dikkatle kontrol edilmesi kritik önemdedir.

Anahtar Kelimeler: Soğuk kür; Hibrit alkali aktive harç; Bazalt lifi; Alkali dozu; Asit direnci; Mikroyapısal analiz.

ENGINEERING PROPERTIES OF FIBER-REINFORCED ALKALI-ACTIVATED BLAST FURNACE SLAG/PORTLAND CEMENT MORTARS CURED AT LOW TEMPERATURES

ABSTRACT

This study investigates the mechanical performance and acid resistance of cold-cured hybrid alkali-activated mortars composed of granulated blast furnace slag (GBFS) and partially substituted Portland cement (PC). Two alkali activator dosages (8% and 12% Na₂O equivalent by binder mass) and three basalt fiber (BF) contents (0%, 0.3%, and 0.6%) were examined to evaluate their effects on compressive strength, ultrasonic pulse velocity (UPV), and mass changes after 90 days of sulfuric acid exposure. All mixtures were initially cured at 0°C for 90 days before acid immersion. Results revealed that increasing the activator dosage improved early densification but led to microstructural vulnerabilities in the absence of fiber reinforcement. The optimal mix with 8% alkali, 15% Portland cement, and 0.6% BF achieved the highest 90-day strength (61.72 MPa) under cold curing, while higher alkali dosage (12%) improved early strength but reduced long-term performance in fiber-reinforced mixes. The highest post-acid compressive strength (69.33 MPa) was observed in the mixture containing 8% AD, 100% GBFS, and 0.6% BF, while the lowest strength values were associated with fiber-free and PC-containing compositions. SEM analyses confirmed that acid exposure promoted secondary densification around fibers but also revealed localized degradation in mixtures rich in PC. The findings demonstrate that cold curing combined with optimized alkali activator dosage and fiber reinforcement can effectively enhance the mechanical and acid resistance of hybrid alkali-activated mortars. However, careful control of PC content is critical to minimizing acid-susceptible phases and maximizing long-term performance under aggressive environments.

Keywords: Cold curing; Hybrid alkali-activated mortar; Basalt fiber; Alkali dosage; Acid resistance; Microstructural analysis.

1. GİRİŞ

Soğuk hava koşullarında beton dökme işlemi, bazen ertelemeyi gerektirse de, bazı teknik çözümlerle bu zorlukların üstesinden gelmek mümkündür[1]. Soğuk hava koşullarında beton dökme işlemleri daha önce belirli kısıtlamalar ve ertelemeler gerektirirken, gelişen teknolojiler sayesinde bu zorluklar minimize edilmiştir[2, 3]. Soğuk hava betonlama teknolojisinin aciliyeti, sadece inşaat projelerinin zamanında tamamlanmasını sağlamakla sınırlı kalmaz, aynı zamanda doğal afetler ve felaket kazalarından zarar gören temel altyapının hızlı bir şekilde onarılmasını sağlama yeteneğiyle de büyük bir öneme sahiptir[4]. Düşük kürlenme sıcaklıkları, Portland çimentosu (PÇ) kompozitlerinin mühendislik özelliklerini olumsuz etkileyebilir. Betonun dayanıklılığı ve mekanik özellikleri, büyük ölçüde hidrasyon sürecine bağlıdır. Bu süreç, çimentonun suyla reaksiyona girerek betonun sertleşmesini ve dayanım kazanmasını sağlar. Ancak, sıcaklıklar düşük olduğunda bu kimyasal reaksiyonlar yavaşlar ve betonun güç kazanımı gecikir. Bu da, betonun başlangıçta istenen mekanik özelliklere ulaşmasını engeller. Portland çimentosunun ideal kürlenme sıcaklığı 10 ile 20°C arasındadır. Bu sıcaklık aralığında, betonun hidrasyon süreci optimum hızda gerçekleşir, bu da betonun istenilen dayanım seviyesine ulaşmasını sağlar. 5°C, PÇ'nin hidrasyon sürecinin normal şekilde devam etmesini sağlayan minimum sıcaklık olarak kabul edilir. Bunun altındaki sıcaklıklarda, hidrasyon reaksiyonu yavaşlar, bu da betonun güç kazanımının istenenden daha uzun süre almasına yol açar[5]. Kış inşaatı sırasında alınan mevcut önlemler iki kategoriye ayrılabilir[6, 7]. Soğuk hava koşullarında beton dökme ve kürlenme sürecini optimize etmek için sıcak ortamların sağlanması büyük önem taşır. Hammaddelerin önceden ısıtılması, sıcak barınaklar ve ısıtıcı sistemlerin kullanımı, betonun tasarım özelliklerine ulaşmasına yardımcı olur. Bu yöntemler, betonun soğuk hava dayanıklılığını artırarak, inşaat projelerinin zamanında ve güvenli bir şekilde tamamlanmasına olanak tanır[8]. Sıcaklık bakım yöntemleri, betonun soğuk hava koşullarında uygun şekilde kürlenmesini sağlamak için etkili olsa da, yüksek enerji tüketimi ve CO₂ emisyonları gibi çevresel etkilerle birlikte gelir. Bu nedenle, enerji verimliliğini artırmak ve çevresel etkileri azaltmak amacıyla alternatif çözümler düşünülmelidir. Bu alternatifler arasında,

bağlayıcıları değiştirmek veya kimyasal katkı maddeleri kullanmak önemli bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Bunlar arasında sülfuoalüminat çimentosu ve magnezyum çimentosu gibi alternatif bağlayıcılar bulunmaktadır. Bu bağlayıcılar, soğuk hava koşullarında daha hızlı sertleşme ve dayanım kazanma özelliklerine sahip olabilir. Ancak bu avantajlarının yanı sıra belirli dezavantajları da mevcuttur[9, 10]. Çimento üretimi, dünya çapında büyük bir karbon ayak izine sahiptir. Her yıl yaklaşık 4,5 milyar ton CO₂ üreten çimento, küresel karbon salınımının yaklaşık %8'ini oluşturmaktadır. Bu durum, inşaat sektörünün çevresel etkilerinin önemli bir parçasıdır ve daha sürdürülebilir inşaat çözümleri geliştirmek, karbon emisyonlarını azaltmak ve enerji tüketimini en aza indirmek için büyük bir ihtiyaç doğurmuştur[3]. Alkali aktivasyonlu malzemeler (AAM'ler) son yıllarda inşaat endüstrisinde büyük bir ilgi görmektedir çünkü bu malzemeler, karbon emisyonlarının azaltılması konusunda önemli avantajlar sunmaktadır. AAM'ler, geleneksel Portland çimentosuna alternatif olarak geliştirilmiş, daha sürdürülebilir ve çevre dostu bağlayıcılar olarak öne çıkmaktadır[11-13]. Uçucu kül, YFC, metakaolin ve doğal puzolanlar, AAM için yaygın olarak kullanılan öncü malzemelerdendir.

Alkali-aktif cüruf (AAC), alkali aktivasyonlu malzemeler kategorisinde yer alan ve geleneksel inşaat malzemelerinden farklı olarak, ısıtma işlemine gerek duymadan yüksek mekanik özelliklere ulaşabilen bir malzemedir[14, 15]. Diğer birçok inşaat malzemesi, özellikle geleneksel Portland çimentosu, yüksek dayanım kazanmak için yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi gerekirken, alkali-aktif cüruf, normal koşullar altında bile yüksek basınç dayanımı sağlar[16]. alkali aktivatör çözeltisi genellikle serbest iyonlar içerdiği için, donma noktasının düşmesi gibi bir etki yaratır. Bu, alkali-aktif cüruf (AAC) macunlarının hazırlanmasında önemli bir avantaj sağlar[4]. Geleneksel çimentolu sistemlerde kürlenme, genellikle hidrasyon veya jeopolimerleşme süreçlerini teşvik etmek amacıyla ortam sıcaklığında veya yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilir ve bu sayede erken yaş dayanımı gelişimi ile matris yoğunlaşması sağlanır [17-19]. Ancak, soğuk iklim bölgelerinde ya da kış aylarında yapılan inşaatlarda ortam sıcaklığı, bağlayıcının aktive olması için gereken optimal aralığın oldukça altına düşebilir; bu da reaksiyon kinetiğini ve dayanım kazanımını önemli ölçüde yavaşlatır [20-22]. Bu durum, kimyasal çözünme ve polikondensasyon reaksiyonlarına dayanan alkali ile aktive edilmiş malzemelerin (AAM'ler) daha geniş çaplı uygulanması açısından temel bir zorluk teşkil eder. Bu bağlamda, bağlayıcının optimal olmayan veya donma noktasına yakın sıcaklıklarda sertleşmesini ifade eden "soğuk

kürleme", hem pratik bir gereklilik hem de bilimsel bir zorluk olarak ortaya çıkar. Soğuk kürleme, dışarıdan ısı girdisine ihtiyaç duymadan inşaatın zorlu çevresel koşullarda devam etmesine olanak tanır [23]. Ancak düşük sıcaklık ortamı, alüminosilikat öncüllerinin çözünmesini yavaşlatarak, granüle yüksek fırın cürufu (YFC) ile aktive edilen sistemlerde kalsiyum-alüminosilikat-hidrat (C-A-S-H) gibi reaksiyon ürünlerinin oluşumunu geciktirir[24]. YFC tabanlı sistemler, alkali ortamda yüksek kalsiyum içeriği sayesinde dayanım gelişimini destekleyen geç hidrolik reaktiviteye sahip olmalarına rağmen, aktivasyon hızı ve kapsamı hâlâ büyük ölçüde kür sıcaklığından etkilenmektedir[25-27]. Bu nedenle, soğukta kürlen AAM'lerin uzun vadeli mekanik bütünlüğü ve çevresel dayanıklılığı sağlamak için dikkatle tasarlanması gerekmektedir. Özellikle YFC kaynaklı alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılar, daha düşük karbon ayak izi, üstün kimyasal dayanıklılık ve çeşitli endüstriyel yan ürünleri bünyeye katabilme yeteneği nedeniyle, geleneksel Portland çimentosuna (PC) sürdürülebilir alternatifler olarak giderek daha fazla ilgi görmektedir. Sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) gibi alkali aktivatörlerin kullanımı, reaktif türlerin çözünmesini ve sonrasında sertleşmiş bağlayıcının oluşmasını kolaylaştırır[28-30]. Ancak, alkali dozajı, reaksiyon hızını ve oluşan jelin kimyasal kararlılığını belirlemede kritik bir rol oynar. Yüksek alkali içerikleri genellikle ilk jeopolimerleşme reaksiyonlarını hızlandırırsa da, çatlamaya veya kimyasal bozunmaya eğilimli alkali açısından zengin ikincil fazların oluşmasına neden olabilir[24]. Bu durum, özellikle reaksiyon kinetiklerinin zaten yavaş olduğu soğuk kürleme sistemlerinde dayanıklı performans elde etmek için dikkatli bir denge gerektirir.

Hibrit alkali ile aktive edilmiş sistemler, genellikle YFC veya uçucu kül gibi alüminosilikat öncüllerle yürütülen alkali aktivasyon reaksiyonları ile Portland çimentosuna özgü hidrasyon mekanizmalarının bir araya getirildiği bağlayıcılardır [31-34]. Bu çift reaktif yaklaşım, OPC ile ilişkili hızlı erken yaş dayanımı ve priz alma özellikleriyle birlikte, AAM'lere özgü yüksek dayanıklılık, düşük CO_2 salımı ve kimyasal direnç gibi avantajları bir arada sunmayı hedefler [35, 36]. Bu tür sistemlerde, YFC'nin kısmen PC ile ikame edilmesi, özellikle düşük sıcaklıklı kürleme koşullarında matrisin bütünlüğünü ve erken mekanik performansı artıracak kalsiyum açısından zengin hidrasyon ürünleri olan C-S-H'nin oluşumuna olanak tanır. Aynı zamanda, cürufun jeopolimerleşmesi sonucu oluşan C-A-S-H jelleri uzun vadeli kararlılığa katkıda bulunur[37-40]. Ancak, bu iki jel sisteminin birlikte var olması, özellikle OPC hidrasyonundan kaynaklanan kalsiyum hidroksitin asit

saldırılarına karşı savunmasız kaldığı zorlu ortamlarda mikro yapısal karmaşıklıklar ve potansiyel uyumsuzluklar yaratabilir. Ayrıca, aktivatör çözeltileri ile OPC kaynaklı fazlar arasındaki kimyasal etkileşimler jel kimyasını, büzülme davranışını ve dayanıklılığı etkileyebilir. Bu nedenle, hibrit alkali ile aktive edilmiş harçlar, hidrasyon ve jeopolimerleşme süreçlerinin sinerjisini optimize edecek şekilde dikkatlice formüle edilmelidir. AAM'lerin içsel gevrekliği ve sınırlı çekme kapasitesi nedeniyle, lif takviyesi yaygın olarak araştırılmıştır. Çeşitli lif türleri arasında, bazalt lifler (BF) yüksek çekme dayanımı, mükemmel kimyasal direnç ve çevresel açıdan olumlu profiliyle öne çıkar. Bu inorganik lifler, mikro çatlakları köprüleyerek enerji sönümleme kapasitesini artırabilir ve sertleşmiş bağlayıcıların eğilme ve çekme özelliklerini iyileştirebilir[41-46]. Ayrıca, aşırı sıcaklıklara ve agresif kimyasallara karşı dirençleri, onları soğuk kürleme ve kimyasal olarak zorlayıcı ortamlardaki AAM sistemleri için ideal hale getirir [47]. Ancak, lif takviyesinin soğuk kürleme koşullarındaki etkinliği büyük ölçüde araştırılmamıştır. Lif dağılımı, matrisle bağlanma ve kimyasal uyumluluk gibi parametrelerin dikkatle değerlendirilmesi gerekir. Yüksek alkali ortamlarda lif yüzeyinde bozulmalar oluşabilir veya zayıf geçiş bölgeleri (ITZ) gelişebilir; bu da mekanik performansı ve dayanıklılığı olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, aşırı lif içeriği aglomerasyona veya gözenekliliğin artmasına yol açarak beklenen takviye faydalarını tersine çevirebilir [48]. Bu nedenle, çatlak direncini en üst düzeye çıkarırken matris homojenliğini ve kimyasal kararlılığı koruyacak optimal bir lif dozajının belirlenmesi gereklidir [49]. Alkali ile aktive edilmiş sistemler üzerine yapılan çalışmalar artmakla birlikte, düşük sıcaklık kürleme, OPC hibritizasyonu ve BF takviyesinin birleşik etkilerini inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Mevcut araştırmaların çoğu, reaksiyon koşullarının daha elverişli olduğu ve dayanım gelişiminin hızlandığı ortam veya yüksek sıcaklık kürlemesine odaklanmıştır [50-52]. Bu nedenle, alkali ile aktive edilmiş harçların soğuk kürleme altındaki davranışı ve uzun vadeli dayanıklılığı hakkında önemli bir bilgi eksikliği bulunmaktadır. Ayrıca, önceki çalışmalar alkali dozajı ve lif içeriğinin etkilerini genellikle ayrı ayrı incelemiştir; ancak bunların özellikle asit saldırısına maruz kalan hibrit sistemlerdeki birleşik etkileri hâlâ yeterince anlaşılmamıştır. Alkali dozajı, PC içeriği ve lif takviyesi arasındaki sinerjik ya da antagonistik etkileşimler açıklığa kavuşturulmalıdır. Bu çalışma, 0°C'de kürlenen alkali ile aktive edilmiş harçların mekanik performansı ve kimyasal dayanıklılığı üzerindeki etkileri sistematik olarak araştırarak bu bilgi boşluğunu doldurmayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda, iki farklı alkali aktivatör dozajı (%8 ve %12 Na₂O bağlayıcı kütlesine göre), iki

PC ikame seviyesi (%0 ve %15) ve üç BF içeriği (%0, %0,3 ve %0,6) değerlendirilmiştir. Soğuk kütleme sürecinin ardından numuneler, agresif hizmet koşullarını simüle etmek amacıyla %5'lik sülfürik asit çözeltisine 90 gün süreyle maruz bırakılmıştır. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrasonik darbe hızı (UPV) gibi mekanik özellikler, asit kaynaklı dayanım kaybı, kütle değişimi ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile değerlendirilen mikroyapısal bozulma gibi dayanıklılık göstergeleriyle birlikte incelenmiştir. Bu kapsamlı deneysel çerçeve, bağlayıcı kimyası, aktivatör dozajı ve takviye stratejisinin aşırı kütleme ve maruz kalma koşullarındaki etkileşimini çok boyutlu bir şekilde analiz etmeye olanak sağlar. Bu araştırmanın yeniliği, alkali ile aktive edilmiş sistemlerde soğuk kütleme, hibrit bağlayıcı tasarımı ve lif takviyesini entegre bir şekilde ele almasıdır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Günümüzde, atmosferik CO₂ emisyonlarını azaltma potansiyeline sahip ve yüksek sıcaklık koşullarında mekanik dayanımını sürdürebilen çevre dostu yapı malzemelerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar artarak devam etmektedir. Bu bağlamda, geleneksel Portland çimentosu (PÇ) yerine bağlayıcı olarak alkali aktivasyon yöntemi kullanılarak, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atık ya da yan ürünlerden elde edilen kompozit malzemeler ön plana çıkmaktadır. Alkali aktivasyon teknolojisi, Portland çimentosuna benzer yapısal ve mekanik özellikler sunmasının yanı sıra, bazı uygulamalarda daha üstün termal performans sergilemesi sayesinde inşaat sektöründe alternatif bir bağlayıcı sistem olarak değerlendirilmektedir. Literatürde yer alan çalışmalar, özellikle uçucu kül ve cüruf esaslı alkali aktive bağlayıcıların, yüksek sıcaklıklara maruz kalmaları durumunda sahip oldukları açık gözenekli mikro yapı sayesinde, PÇ bazlı sistemlere kıyasla daha yüksek termal dayanım gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu tür malzemelerin, 600–800°C ve üzeri sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra bile basınç dayanımlarını büyük oranda muhafaza ettikleri tespit edilmiştir [53].

Alkali aktive bağlayıcılar (AAB), inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan geleneksel çimento esaslı bağlayıcılara çevreci bir alternatif olarak öne çıkan, düşük karbon ayak izine sahip bağlayıcı sistemlerdir. Bu bağlayıcılar, uygun kimyasal bileşime sahip silikatlı veya alüminatlı malzemelerin, genellikle sodyum ya da potasyum bazlı alkali çözeltilerle aktivasyonu sonucunda oluşur ve yüksek dayanım sergileyen bir bağlayıcı matris meydana getirir. AAB sistemleri, özellikle çevresel sürdürülebilirlik bağlamında önemli avantajlar sunmaktadır; zira üretimleri, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla daha düşük enerji gereksinimiyle gerçekleştirilmekte olup, aynı zamanda uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıkların değerlendirilmesine olanak tanıyarak kaynak verimliliğini artırmaktadır [54]. Alkali aktive bağlayıcılar (AAB), silika (SiO₂) ve alümina (Al₂O₃) içeren malzemelerin alkali çözeltilerle (çoğunlukla sodyum veya potasyum bazlı) kimyasal reaksiyona sokulmasıyla elde edilmektedir. Bu reaksiyon sonucunda, düşük kristalli veya amorf yapıda siliko-alüminat bileşikler oluşur ve bu bileşikler bağlayıcı özellik kazandıran

bir matris meydana getirir. Geleneksel Portland çimentosu üretimi, yüksek sıcaklıklarda kalsiyum karbonatın (CaCO_3) pişirilmesiyle gerçekleştirilir ve bu süreçte ciddi miktarda CO_2 emisyonu açığa çıkar. Buna karşılık, AAB üretim süreci daha düşük enerji gereksinimine sahip olup, karbon salınımı açısından çok daha çevreci bir alternatiftir. Bu yönüyle AAB sistemleri, karbon ayak izini önemli ölçüde azaltmaktadır. AAB'ler, yalnızca çevresel sürdürülebilirlik açısından değil, aynı zamanda üstün mühendislik özellikleri bakımından da dikkat çekmektedir. Yüksek mekanik dayanım sunmalarının yanı sıra; suya, kimyasal etkilere, yüksek sıcaklıklara ve çeşitli çevresel zorlayıcılara karşı yüksek direnç göstermektedirler. Bu özellikleri sayesinde uzun ömürlü ve dayanıklı yapıların inşasında etkin bir şekilde kullanılabilmektedirler. Sonuç olarak, AAB sistemleri hem çevresel hem de yapısal performans açısından geleneksel çimentolara kıyasla sürdürülebilir ve yüksek potansiyele sahip alternatifler olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, ilerleyen yıllarda inşaat sektöründe daha yaygın kullanım alanı bulmaları beklenmektedir [54, 55].

2.1. Alkali Aktivatörler

Alkali aktivatörler, alkali ile aktive edilen malzemelerin (AAM'lerin) farklı kürlenme koşullarında mekanik dayanım gelişimi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Sodyum hidroksit, potasyum hidroksit ve sodyum silikat gibi sıvı haldeki; sodyum metasilikat gibi katı haldeki aktivatörler, molarite düzeyleri ve konsantrasyonlarına bağlı olarak AAM'lerin kürlenme davranışlarını olumlu yönde etkileyebilmektedir. Genel kabul gören yaklaşıma göre, alkali aktivatörlerin iki ana işlevi bulunmaktadır: İlki, sistemdeki alkali metal iyonlarının elektriksel yük dengesini sağlamak; ikincisi ise Si-O, Al-O ve Ca-O bağlarını kırarak yeni bağ yapılarını oluşturarak bağlayıcı matrisin gelişimini desteklemektir. Aktivatörler, kimyasal yapılarına göre altı ana grupta sınıflandırılmaktadır: Alkali alüminatlar, Alkali silikatlar, Alüminosilikatlar, Silikat içermeyen güçlü asit tuzları, Alkali hidroksitler ve Silikat içermeyen zayıf asit tuzları. Her bir grup, başlangıç hammaddesi ile farklı etkileşim mekanizmalarına sahip olup, AAM sistemlerinin mikro yapı oluşumu ve nihai mekanik özellikleri üzerinde belirgin etkiler göstermektedir[56]. Önceki araştırmalarda, üretilen çoğu AAM, aktivasyon süreci için silika çözeltisi (SC) ile birlikte sodyum hidroksit (NaOH) aktivatörlerinin ya da yalnızca alkali oksitlerin kullanılmasıyla aktive edilmiştir. Lityum ve rubidyum oksitlerine kıyasla, NaOH ve potasyum hidroksit (KOH) gibi bileşikler, suda çok daha yüksek çözünürlük kapasitesine

sahip olduklarından, aktivasyon amacıyla daha yaygın olarak tercih edilen alkali oksitler arasında yer almaktadır [57]. Dayanım ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirdiği için, silika çözeltisi (SÇ), AAM karışımlarında en yaygın kullanılan alkali silikat türü olarak öne çıkmaktadır. SÇ kullanımının, reaksiyonun ilk saatlerinde oluşturduğu yoğun ortam, NaOH ile aktive edilen sistemlere kıyasla erken dönemde dayanımı azaltmasına rağmen, silikatın sağladığı katkılar sayesinde uzun vadede dayanımın belirgin şekilde arttığı gözlemlenmektedir[57].

2.2. Alkali-Aktif Malzemenin Üretimi

AAM betonunun üretimi için sıfırdan tamamen yeni bir altyapı inşa edilmesi gerekmemektedir. Geleneksel Portland çimentosu (PÇ) beton üretiminde kullanılan teknoloji, aşındırma (AD) ve karıştırma enerjisinin optimizasyonu, yalnızca küçük değişiklikler yapılarak AAM beton karıştırma ve döküm işlemleri için uygun hale getirilebilir. Mevcut tesislerde, aktivatörler ve alkali etkinleştirilmiş malzemeler (AEM'ler) üretilebilir ve hazırlanabilir. AEM üretimi için özel fırınlara ihtiyaç duyulmaz, ancak bu malzemelerin öğütülmesi gerekmektedir. Bu bağlayıcıların üretimi için gerekli altyapı, PÇ üretimi için gereken tesislerden daha azdır ve yüksek sıcaklık gereksinimi olmadığı için fosil yakıtlar yerine elektrik enerjisi kullanılabilir [58]. Genel olarak, alkali ile aktive edilmiş malzemeler (AAM'ler) ile Portland çimentosu (PÇ) esaslı malzemeler benzer sertleşme sürelerine sahiptir. Bununla birlikte, alkali aktivasyonlu bağlayıcılar genellikle daha hızlı priz alma eğilimindedir. Bu hızlı reaksiyon sürecini kontrol altına almak amacıyla, bazı durumlarda priz geciktirici katkı maddeleri kullanımı gerekli olabilir. Yüksek kalsiyum içeriğine sahip uçucu küller, ortam sıcaklığında dahi sertleşme kapasitesine sahipken; düşük kalsiyumlu uçucu kül esaslı bağlayıcı sistemler için genellikle harici ısı uygulaması gerekmektedir. Bu bağlamda, AAM sistemleri için en yaygın kürleme yöntemi kapalı kürlemedir. Öte yandan, su içerisinde yapılan kür işlemleri, aktivatör bileşenlerinin ortamdan uzaklaşmasına neden olarak mukavemet gelişimini sınırlayabilmektedir. Hiçbir işlem uygulanmaksızın ortam koşullarında kürleme yapılması ise, genleşme farkları nedeniyle yüzey çatlaklarının oluşmasına yol açabilir. Özellikle prekast beton uygulamalarında, buharla kürleme yöntemi tavsiye edilmektedir. AAM sistemlerinin uygulamadaki en önemli zorluklarından biri, bu bağlayıcıların reolojik davranışlarını kontrol altına alabilecek etkin kimyasal katkıların henüz yeterince

geliştirilmemiş olmasıdır[58]. Demir-çelik endüstrisinin bir yan ürünü olan yüksek fırın cürufu (YFC), günümüzde inşaat sektöründe yaygın biçimde değerlendirilmektedir. YFC; karayolu dolgu malzemesi, beton agregası, çimento katkısı ve demiryolu balastı gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır[59]. İlk aşamalarda geliştirilen organik katkı maddeleri, sınırlı reolojik performans iyileştirmeleri sağlamış olsa da, bu katkılar hâlâ Portland çimentosu (PÇ) esaslı betonlarda kullanılan süperakışkanlaştırıcıların sağladığı işlenebilirlik düzeyine ulaşamamıştır. Bu nedenle, alkali aktivasyonlu bağlayıcı sistemlerde reolojik davranışın iyileştirilmesi için özellikle çözelti-katı faz ara yüzünün daha kapsamlı ve detaylı biçimde karakterize edilmesine ihtiyaç duyulduğu ortaya konmuştur. AAM sistemlerinde işlenebilirlik üzerindeki kontrol, büyük ölçüde karışım tasarım parametrelerinin optimize edilmesiyle sağlanabilmektedir. İstenen taze ve sertleşmiş beton özelliklerine ulaşmak, uygun malzeme seçimi ve dozajlamaya dayanan tasarım iyileştirmelerini gerektirmektedir. Ayrıca, AAM üretim maliyetleri çoğu zaman üreticinin hammadde tedarik zinciri üzerindeki kontrol gücüne bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Hammaddeye doğrudan erişim, maliyetleri azaltma açısından kritik bir faktör olarak değerlendirilmektedir[54].

2.3. Çevresel Etkileri

Çimento ve beton, yaygın kullanımları nedeniyle küresel ölçekte karbon emisyonlarına ciddi düzeyde katkı sağlayan yapı malzemeleridir. Önümüzdeki yıllarda artması öngörülen hızlı kentleşme ve altyapı ihtiyacı, çimento ve beton tüketiminin daha da artmasına neden olacak; bu durum da çevresel etkileri azaltılmış alternatif malzemelere olan ihtiyacı kaçınılmaz kılmaktadır[60]. Yıllık üretimi yaklaşık 4 gigaton (Gt) düzeyine ulaşan çimento, beton üretiminde temel bağlayıcı olarak kullanılmakta olup, betonun toplam kütesinin %10'undan fazlasını teşkil etmektedir[61]. Çimento üretimi, küresel CO₂ salımlarının yaklaşık %8'lik kısmını oluşturarak önemli bir çevresel yük meydana getirmektedir. Üstelik, her bir ton çimento üretim süreci, ortalama 650 ila 920 kilogram arasında değişen CO₂ emisyonu üretmektedir. Buna karşılık, alkali ile aktive edilmiş malzemelerin (AAM) üretimi, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla çok daha düşük sera gazı salımıyla gerçekleştirilebilmekte ve bu yönüyle sürdürülebilir yapı malzemeleri arasında dikkat çekici bir alternatif sunmaktadır. Araştırmacıların çevresel sürdürülebilirliğe yönelik artan duyarlılığı sonucunda, alkali ile aktive edilmiş malzemeler

(AAM'ler) olarak adlandırılan yeni nesil bağlayıcı sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemler, uygun kimyasal bileşime sahip alkali etkinleştirilmiş malzemelerin alkali çözeltilerle reaksiyona sokulmasıyla elde edilmektedir. AAM'lerin kullanımıyla elde edilebilecek CO₂ emisyonlarındaki azalma, çeşitli parametrelere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu parametreler arasında karışım tasarımı, uygulanan kür koşulları ve referans olarak alınan Portland çimentosu (PÇ) sisteminin kimyasal ve mineralojik bileşimi yer almaktadır. Bu bağlamda, AAM sistemlerinin çevresel avantajı, koşullara bağlı olarak %9 ile %97 arasında değişen oranlarda CO₂ emisyonu azaltımı sağlayabilmektedir. Alkali ile aktive edilmiş malzemelerin kullanımından kaynaklanan emisyon azaltımını, geleneksel Portland çimentosu (PÇ) esaslı betonla karşılaştırmalı olarak tek bir sabit oranla ifade etmek güçtür. Bu farklılık; bölgesel koşullar, karışım tasarımı parametreleri ve hedef uygulamaya göre seçilen bileşenlerin özelliklerine bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Alkali aktivasyon teknolojisinin çevresel performansı yalnızca son ürünün özelliklerine değil, aynı zamanda özellikle aktivatorlerin ve diğer hammaddelerin temin süreçlerine de bağlıdır. Bu kapsamda, sodyum karbonat ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) gibi aktivatörlerin üretim yöntemleri, özellikle sodyum silikatın yüksek sıcaklıklarda silika ile işlenmesi süreci, çevresel açıdan önemli etkiler yaratabilmektedir[62]. AAM üretiminde kullanılan sodyum silikat (Na₂SiO₃) gibi enerji yoğun aktivatörler, genellikle diğer düşük çevresel etkili aktivatörlerle belirli oranlarda karıştırılarak kullanıldığından, ortaya çıkan ton başına CO₂ emisyonu, geleneksel Portland çimentosuna (PÇ) kıyasla yine de belirgin şekilde daha düşüktür. Bununla birlikte, alkali karbonatların temininde kullanılan hammadde kaynakları ve bu hammaddelerin elde edilmesinde tercih edilen madencilik yöntemleri, toplam emisyon profili üzerinde önemli rol oynamaktadır. Alkali ile aktive edilmiş malzemelerin üretim süreci, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştiği için enerji tüketimi açısından daha verimlidir. Çimento üretiminde gereken yüksek sıcaklıklar önemli miktarda enerji kullanımını zorunlu kılarken, AAM sistemlerinde bu sıcaklık ihtiyacı belirgin şekilde düşüktür. Bu durum, toplam enerji tüketiminin azalmasına ve dolayısıyla çevresel etkilerin önemli ölçüde azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, AAM sistemleri genellikle daha yüksek dayanıklılık özellikleri sergileyerek uzun ömürlü yapı malzemelerinin üretilmesine olanak tanır. Bu bağlayıcı sistemler, sülfat ve klorür iyonları gibi kimyasal etkilere karşı geleneksel bağlayıcılara kıyasla daha yüksek direnç gösterme eğilimindedir. Bu üstün dayanım, bakım ve onarım sıklığını azaltarak hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir.

AAM üretiminde kullanılan alkali çözeltiler – genellikle sodyum hidroksit (NaOH) veya potasyum hidroksit (KOH) – oldukça yüksek pH değerlerine sahip olup, çevresel açıdan dikkatle yönetilmesi gereken bileşenlerdir. Bu tür kimyasalların su kaynaklarıyla doğrudan teması, potansiyel su kirliliği riski oluşturabilir. Bu nedenle, üretim tesislerinde etkili atık yönetimi sistemlerinin kurulması ve çevresel koruma önlemlerinin eksiksiz bir şekilde uygulanması büyük önem taşımaktadır. AAM üretiminde kullanılan alkali kimyasallar, genellikle yüksek pH değerine sahip sulu çözeltiler içermektedir. Bu tür çözeltilerin yetersiz yönetimi durumunda, su kaynaklarında alkalikleşme meydana gelebilir ve bu durum, sucul ekosistemler üzerinde olumsuz çevresel etkiler yaratabilir. Öte yandan, geleneksel Portland çimentosu üretimi; kireçtaşı, kil ve benzeri doğal hammaddelerin çıkarılmasını gerektiren, çevresel etkisi yüksek bir süreçtir. AAM sistemleri ise çoğunlukla endüstriyel yan ürünler (örneğin uçucu kül, yüksek fırın cürufu) ve doğal olarak bulunan minerallerin yeniden kullanımı ile üretilmektedir. Bu durum, doğal kaynak tüketiminin azaltılması ve hammadde çıkarımına bağlı çevresel yüklerin hafifletilmesi açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Sonuç olarak, AAM teknolojisi, çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir seçenek sunar ve iklim değişikliği üzerindeki etkisi, geleneksel çimento üretimine kıyasla belirgin şekilde daha düşüktür. AAM'ler, düşük karbon emisyonları, atıkların geri dönüşümü, daha az enerji tüketimi ve uzun hizmet ömrü gibi özellikleriyle çevre dostu alternatifler sunmaktadır. Ancak, alkali çözeltilerin yanlış yönetimi gibi çevresel riskler de mevcuttur. Bu nedenle, üretim süreçlerinde etkili çevre yönetimi uygulamalarına büyük önem verilmesi gerekmektedir. AAM'lerin yaygın kullanımı, inşaat sektöründe karbon ayak izinin önemli ölçüde azaltılmasına katkı sağlayabilir.

2.4. Alkali-Aktif Bağlayıcılar İçin Öncü Malzemeler

Alternatif malzemeler, beton üretiminde giderek daha fazla tercih edilmektedir. Son yıllarda, alkali aktivasyonlu kompozitlerin üretimi, birden fazla hibrit malzemenin kombinasyonu ile yapılan araştırmaların merkezinde yer almıştır. Alkali aktivasyonlu kompozitler, geniş bir malzeme yelpazesiyle üretilebilmektedir ve bu malzemeler arasında uçucu kül, Yüksek Fırın Cürufu (YFC) gibi endüstriyel yan ürünler öne çıkmaktadır. Bu tür malzemeler, silikon, alüminyum ve kalsiyum açısından zengin olup, alkali aktivasyonlu hibrit matrislerin üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalar, bu malzemelerin tek başına ve diğer maddelerle kombinasyon hâlinde kullanımını

incelemiştir. Özellikle, bağlayıcı matrisin tek başına kullanılması durumunda, kürlenme koşulları ve aktivasyon sıcaklığı gibi faktörlere bağlı olarak yüzey çatlaklarının meydana gelebileceği gözlemlenmiştir[63, 64]. Alkali Aktivasyonlu Bağlayıcılar (AAB), çevre dostu ve dayanıklı bağlayıcı malzemeler olarak, çimentonun yerine kullanılmaktadır. Bu bağlayıcılar, yüksek alkali ortamda aktive olan ve kimyasal reaksiyonlarla sertleşen silikat ve alüminat içeren malzemelerden üretilir. AAB, alkali aktivasyon yoluyla sertleşen bağlayıcı sistemlerdir ve geleneksel Portland çimentosu (PÇ) yerine tercih edilmektedir. Bu bağlayıcılar, yüksek SiO_2 ve Al_2O_3 içeren doğal ya da endüstriyel yan ürünlerle üretilir. Alkali çözeltiler (sodyum veya potasyum bazlı) ile reaksiyona giren bu malzemeler, geopolimer adı verilen dayanıklı ve çevre dostu bir bağlayıcı oluşturur. Alkali aktivasyon sürecinde kullanılan öncü malzemeler, genellikle yüksek oranda reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 içeren endüstriyel yan ürünler veya doğal minerallerdir [65].

2.4.1. Alüminosilikat Esaslı Malzemeler

Silika (SiO_2) ve Alümina (Al_2O_3) içeren malzemeler, alüminosilikat esaslı bileşikler olarak sınıflandırılmaktadır. Bu bileşikler genellikle doğal minerallerde, endüstriyel yan ürünlerde veya sentetik olarak üretilmiş malzemelerde bulunur. Alüminosilikatlar, özellikle geopolimer beton üretimi ve alkali aktivasyon gibi sürdürülebilir inşaat uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğal alüminosilikatlar, alüminyum, silisyum ve oksijen içeren minerallerden oluşan bileşiklerdir ve yer kabuğunun önemli bir kısmını oluşturur; bu mineraller çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Alkali Aktivasyon Malzemeleri (AAM) üretiminde kullanılan alüminosilikat bazlı bileşenlerin çoğu, aynı zamanda Portland Çimentosu (PÇ) betonlarına mineral katkı olarak eklenmektedir. Alkali aktivasyon, Si ve Al açısından zengin amorf (düşük kristalli) malzemelerin gereksinimi olan bir süreçtir. Bu bağlamda, kırmızı çamur, uçucu kül, kaolinit killeri, YFC ve metakaolin gibi bileşenler AAM üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır[66]. Metakaolin, kaolinit mineralinin kalsinasyonu (ısıtılma işlemi) ile elde edilen bir bileşiktir. Silikon ve alüminyum açısından zengin olan uçucu kül ve metakaolin, düşük kalsiyum içeriğine sahip sistemlerin alkali aktivasyonunda bağlayıcı olarak yaygın şekilde tercih edilmektedir. Ancak, metakaolin gibi malzemeler nispeten pahalıdır ve son yıllarda popülerlik kazanmıştır; bu nedenle, geopolimer bağlayıcıların reaksiyon mekanizmaları, endüstriyel yan ürünler olan uçucu kül ve YFC

sistemlerine kıyasla daha az bilinmektedir. Glukhovsky'nin araştırmalarına göre[67], silisyum ve alüminyum açısından zengin malzemelerin alkali aktivasyon süreci, üç ana adımdan oluşmaktadır. Bu adımlar şu şekilde sıralanabilir: pıhtılaşma ve ardından yıkım, pıhtılaşma ve ardından yoğunlaşma, ve yoğunlaşma ve ardından kristalleşme. Glukhovsky'nin önerdiği modele göre, ilk aşamada, bağlayıcı malzemedeki Si-O-Si bağları, alkali çözelti içindeki hidroksil iyonları tarafından kırılır ve (-Si-OH) ile (-Si-O-) bileşenleri oluşur. Hidroksil iyonları, alkali aktivasyon sürecinde Si-O-Al bağlarını kırarak $Al(OH)_4^-$ iyonlarının oluşmasına yol açmaktadır. Bu süreç, alkali aktivasyonun ikinci aşamasında, silikon ve alüminyum monomerlerinin birbirleriyle yer değiştirmesi ve polimerizasyon reaksiyonunun başlamasıyla devam eder. Aynı zamanda, hidroksil iyonları bu aşamada katalitik işlev görürken, önceki adımda katalizör olarak görev yapan alkali katyonlar, artık polimer yapısına katılmaktadır. Aktivasyon sürecinin son aşamasında ise reaksiyonlar hızlanır ve birincil hidratasyon ürünleri (örneğin, C-S-H) ve ikincil hidratasyon ürünleri (örneğin, hidrotalsit) oluşur[68]. AAM'lerin reaktivitesi ve kimyasal bileşimi, alkali aktivasyon reaksiyonlarının belirleyicisi olan önemli faktörlerdir. Genellikle amorf yapıya sahip olan uçucu kül, metakaolin ve YFC gibi malzemeler, kalsine edilmemiş malzemelere kıyasla reaksiyon sırasında daha yüksek reaktivite sergiler. Önceki araştırmalarda, AAM üretimi için sıklıkla uçucu kül, metakaolin ve YFC gibi öncüller kullanılmıştır. Ancak günümüzde, bu öncüllerin türleri ve kaynakları giderek çeşitlenmiştir. Volkanik tuf ve pomza, alkali aktivasyon için uygun doğal malzemeler arasında yer alır. Bu malzemeler, yüksek silisyum ve alüminyum içerikleri sayesinde alkali aktivasyon için son derece reaktif ve uygun seçenekler sunmaktadır [69].

2.5. Alkali-Aktif Bağlayıcıların Kür Koşulları

Su bazlı çimento sistemleri, AAB ve PÇ gibi alternatif bağlayıcılarla değiştirilmekte olup, bu bağlayıcılar genellikle uçucu kül, YFC ve metakaolin gibi alüminosilikat esaslı malzemelerin alkali aktivatörlerle reaksiyona girmesiyle oluşmaktadır. Bu sistemlerin nihai dayanımı, mikroyapısı ve performansı, uygulanan kür koşullarına büyük ölçüde bağlıdır. Bağlayıcının hidratasyon veya polimerleşme süreçlerini tamamlayabilmesi, kütleme yöntemine göre şekillenir [55]. AAB sistemlerinde kütleme süreci, hidratasyon olaylarına değil, daha çok alkali aktivasyon reaksiyonlarına dayanır. Alkali aktivatör çözeltisi, silisyum ve alüminyum iyonlarını çözer. Alkalın ortamda, bu çözünmüş iyonlar

reaksiyona girerek yeni bağlayıcı fazların oluşmasına neden olur. Bağlayıcı, zaman içinde sertleşerek nihai dayanımına ulaşır. Aktivatör konsantrasyonu, sıcaklık ve nem, bu reaksiyonun hızını ve etkinliğini doğrudan etkileyen faktörlerdir. AAB'ler, inşaat sektöründe beton ve harç üretimi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılan, su ile kimyasal reaksiyona girerek sertleşen ve dayanıklı yapılar oluşturan bağlayıcılardır. AAB'ler, özellikle düşük karbonlu yapılarıyla çevre dostu alternatifler olarak giderek daha fazla tercih edilmektedir [55]. Bağlayıcı malzemelerin sertleşme ve dayanıklılık kazanmasını garanti altına almak için belirli sıcaklık, nem ve hava koşullarında işlem yapılır. Bu koşullar kürlenme koşulları olarak adlandırılmaktadır. Sıcaklık, bağlayıcıların reaksiyon hızını ve dayanım gelişimini maksimize etmek için önemli bir faktördür. AAB'ler genellikle 20-30°C arasında en iyi şekilde çalışmaktadır. Yüksek sıcaklık, aşırı su kaybına ve çatlamaya yol açabilirken, düşük sıcaklık reaksiyonları yavaşlatır. AAB'lerin aktif hale gelmesi için su gereklidir ve nem, verimli bir reaksiyon için kritik bir faktördür. Yüksek nem, bağlayıcının etkinliğini artırarak kürlenme sürecini hızlandırabilir. Bununla birlikte, bağlayıcının kuruma sırasında nemli kalması, çatlak oluşumunu önlemek açısından önemlidir. Kürlenme süresince hava akışının azaltılması, su kaybını önleyerek reaksiyonun verimli bir şekilde gerçekleşmesini sağlar. Nem kaybını azaltmak için bazı durumlarda bağlayıcı yüzeyi örtülebilir. AAB'ler genellikle dayanım kazanmak için 7-28 gün boyunca kürlenir. Öte yandan, bazı bağlayıcılar daha hızlı tepki verir ve daha kısa kür süresine ihtiyaç duyabilir. Sıkıştırma işlemi, bağlayıcının dayanıklılığını ve yapısal bütünlüğünü artırmak için kritik öneme sahiptir. Kür sürecinde bağlayıcıya uygulanan baskılar, mikro yapının gelişmesini destekler. Kür koşulları, kullanılan AAB türüne, ortam koşullarına ve istenilen sonuca göre değişiklik gösterebilir. Yine de genel olarak nemin korunması, sıcaklığın kontrolü ve belirli bir süre boyunca kürlenmenin yapılması en etkili sonuçları sağlar[54]. AAB malzemelerinin kür koşullarını belirleyen üç ana faktör sıcaklık, süre ve nem içeriğidir. Düşük kalsiyum konsantrasyonuna sahip sistemler için oda sıcaklığında kürlenme (20-25°C) uygundur, bu da onu ekonomik ve çevre dostu bir seçenek haline getirir. Ayrıca, bu yöntem enerji tasarrufu sağlar. Yavaş reaksiyon süreci, zamanla dayanım kazanılmasını sağlar. Ancak, başlangıçta daha yavaş dayanım gelişimi ve daha uzun süren bir alkali aktivasyon süreci söz konusu olabilir. Yüksek sıcaklıkta kürlenme (40-90°C) özellikle uçucu kül ve metakaolin bazlı bağlayıcılar için gereklidir. Erken dayanım gelişimini sağlamak için 4-24 saat boyunca yüksek sıcaklığa maruz bırakılmaları gerekmektedir. Bu işlem, kimyasal reaksiyonları hızlandırarak hızlı priz almayı ve daha

yoğun bir yapı oluşumunu sağlar. Ancak, yüksek enerji tüketimi bir dezavantaj oluşturur ve yüksek sıcaklıklar çatlak oluşumuna neden olabilir. Bağlayıcının erken dayanımı, kürleme sıcaklığının artmasıyla iyileşirken, aynı zamanda çatlama riski de artar. Su kaybını azaltarak nemli kürleme, malzemenin priz alma kabiliyetini artırır. Oda sıcaklığında kürleme süreci, reaksiyon hızını yavaşlatabilir, ancak enerji verimliliği açısından daha sürdürülebilir bir seçenektir. Endüstriyel üretimde erken dayanım kazanımı sağlamak için ısıtılmış kürleme yaygın olarak kullanılır. Yüksek sıcaklık ve buhar kürleme teknikleri, hızlı üretim ve dayanım gelişimi için etkilidir. Uzun vadeli dayanıklılık ve çevre dostu yapı malzemeleri için oda sıcaklığında kürleme önerilmektedir[54].

3. ALKALİ-AKTİF YÜKSEK FIRIN CÜRUFU

Yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılarak alkali ile aktive edilen bağlayıcı sistemlerin (AAM) üretimi, çevresel avantajlarının yanı sıra, Portland çimentosuna (PÇ) kıyasla birtakım önemli teknolojik üstünlükler de sunmaktadır. Bu bağlayıcı sistemler; artırılmış dayanıklılık, düşük gözeneklilik, azaltılmış hidrasyon ısı ve erken yaşlarda gelişen yüksek mekanik dayanım gibi avantajlara sahiptir. Bununla birlikte, yüksek rötre (büzülme), hızlı priz alma ve çiçeklenme gibi bazı olumsuzlukların da göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Bu tür sistemler, yüksek oranda endüstriyel yan ürünlerin, sınırlı miktarda PÇ ile harmanlanması ve uygun alkali aktivatörler ile aktive edilmesiyle elde edilmektedir. Literatürde, alkali-aktif PÇ ikameli bağlayıcıların erken yaşlarda dahi tatmin edici mekanik performans sergilediği geniş şekilde raporlanmıştır. YFC esaslı alkali-aktif çimentoların mekanik ve dayanıklılık özelliklerine ilişkin yapılan çalışmalar, bu bağlamda bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiş ve ilgili alt başlıklar çerçevesinde yapılandırılmıştır [39]. Cürufun alkali aktivasyonuna yönelik bir çalışmada, Na_2SiO_3 çözeltisinin, NaOH ve sodyum karbonata kıyasla daha üstün basınç dayanımı sağladığı belirlenmiştir. Bazı araştırmalar, Na_2SiO_3 kullanımı durumunda AAM harçlarının mekanik dayanımının maksimum seviyeye ulaştığını ortaya koyarken; aktivatör konsantrasyonu, kür sıcaklığı ve cürufun partikül boyutu gibi parametrelerin de performans üzerinde belirleyici rol oynadığı bildirilmektedir [70]. Aktivatör çözeltisinin $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranının, AAC özellikleri üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, PÇ kullanılmaksızın, yalnızca alkali aktivasyon yoluyla yaklaşık 100 MPa basınç dayanımına ulaşabilen YFC esaslı bağlayıcıların, sıcaklık kürüne gerek duymaksızın yüksek performans sergileyebildiği belirtilmiştir. Bu durum, AAC sistemlerinin PÇ'ye alternatif olarak kullanılabilirliğini daha da anlamlı kılmaktadır[71]. Karışım tasarımında sıvı/katı oranının etkisi sınırlı düzeyde olmakla birlikte, silika modülü ve aktivatör konsantrasyonunun erken yaş dayanımı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu parametrelerde yapılacak optimizasyonlar sayesinde, AAC sistemlerinin erken yaş dayanımının ciddi ölçüde iyileştirilebileceği ifade edilmektedir. Diğer taraftan, aktivatördeki yüksek sodyum içeriği, dayanım açısından avantaj sağlarken; Na_2SiO_3 ile aktive edilen cürufun hızlı reaksiyon

göstermesi sonucu işlenebilirlik ve priz süresinde olumsuzluklar yaşandığı rapor edilmiştir[72]. Çeşitli deneysel çalışmalar kapsamında, AAC betonunun mekanik performansı, işlenebilirliği ve erken yaş dayanımı detaylı biçimde analiz edilmiştir. Bazı kaynaklara göre, yalnızca AAC bağlayıcı kullanılarak, PÇ betonunun bir günlük basınç dayanımına ulaşmak mümkün olabilmektedir[73]. %100 PÇ içeren referans numuneler ile kıyaslandığında, farklı oranlarda YFC ve PÇ içeren alkali-aktif bağlayıcı sistemlerinin daha yüksek basınç ve eğilme dayanımları sergilediği görülmüştür. Örneğin, Angulo-Ramirez ve arkadaşları tarafından yürütülen bir çalışmada, %80 YFC ve %20 PÇ içeren bağlayıcının Na_2SiO_3 ve NaOH ile aktivasyonu sonucunda, referans karışıma kıyasla çok daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Benzer sonuçlara ulaşan diğer çalışmalar da, düşük PÇ (%20) ve yüksek YFC (%80) içeriğiyle üretilen AAM sistemlerinin erken yaşta yüksek mekanik performans gösterebildiğini ortaya koymuştur [74]. Betonun uzun ömürlülüğünü belirleyen başlıca parametrelerden biri geçirgenliktir. Bu nedenle, beton tasarımında geçirgenliği azaltıcı stratejiler uygulanmaktadır. Literatürde yer alan bulgular, AAC betonlarının genellikle PÇ betonlarına kıyasla daha az geçirgenlik gösterdiğini ortaya koysa da, aksi yönde sonuçlar sunan çalışmalar da mevcuttur. Sülfat saldırısı, betonun hizmet ömrünü tehdit eden en kritik kimyasal etkilerdendir. Beton, sülfat içeriği yüksek zeminlerde ya da endüstriyel atıkların bulunduğu ortamlarda sülfat etkisine maruz kalabilir[75, 76]. Genel kabul gören görüş, AAC sistemlerinin Na_2SO_4 etkisine karşı MgSO_4 etkisine kıyasla daha dayanıklı olduğudur. MgSO_4 saldırısı sonrası, bağlayıcı matris içinde yer alan C-A-S-H fazı, yoğun silikat polimerizasyonu ve dekalsifikasyon süreçleri nedeniyle bozulmaya uğrayabilmektedir. Bu süreçte, C-A-S-H fazının silika jellerine veya M-A-S-H yapılarına dönüşme eğilimi gösterdiği bildirilmektedir. Ancak Na_2SO_4 etkisinde, AAC bağlayıcı jellerinde bu tür bozulmalar daha sınırlı düzeydedir; çünkü etrenjit ve alçıtaşı gibi zararlı fazların çökeltme hızı düşüktür [77]. Yüksek sıcaklıklara karşı dayanım bakımından, YFC bazlı AAM sistemleri oldukça rekabetçidir. AAC sistemleri yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, jellerdeki zayıf bağlı suyun buharlaşması bağ yapısını ciddi şekilde etkilemez ve mekanik özelliklerin korunmasına olanak tanır. Bilindiği üzere, tüm beton türleri belli sıcaklık aralıklarında dayanıklılık gösterse de, geleneksel PÇ betonları 800°C üzerindeki sıcaklıklarda, hidrat kristallerinin su kaybına bağlı olarak yapısal bozulmaya uğrar. AAC sistemlerinde ise, nano ölçekli gözenek yapısı sayesinde suyun kontrollü şekilde uzaklaştırılması mümkün olmakta ve bu durum alüminosilikat yapının korunmasını sağlamaktadır [78, 79]. Alkali-silika reaksiyonu

(ASR) bağlamında, PÇ betonlarında genellikle cüruf ilavesiyle genleşme kontrol altına alınmaktadır. Ancak, AAC sistemlerinin ASR'ye karşı dayanımı konusunda literatürde çelişkili bulgular bulunmaktadır. Yüksek cüruf ve doğrudan kalsiyum içeriğine rağmen, bazı çalışmalar AAC sistemlerinin ASR'ye karşı PÇ betonlarına göre daha düşük direnç gösterdiğini rapor etmektedir [80]. Bununla birlikte, bazı araştırmacılar AAC'nin ASR'ye karşı dayanıklı olduğunu ve bu durumun, bağlayıcı sistemdeki hidratasyon ürünlerinin alkali bağlaması sonucu, gözenek çözeltisinde reaktif silikanın çözünmesi için yeterli alkali bulunmamasına dayandığını ifade etmektedir. Asidik ortamlara karşı dayanım açısından, AAC sistemleri genellikle PÇ bazlı bağlayıcılardan daha üstün performans sergilemektedir. Ancak bu durum, asit etkilerinin AAC üzerinde tamamen etkisiz olduğu anlamına gelmemektedir. Düşük kalsiyum içeriği, AAC'yi PÇ'ye kıyasla daha dayanıklı kılmaktadır[81]. Betonun donma-çözülme döngülerine karşı direnci, iç çatlak oluşumu, genleşme ve kütle kaybı gibi etkileri minimize etme kapasitesiyle ilişkilidir. AAC sistemleri, düşük su/bağlayıcı oranı ve yüksek iyonik iletkenliğe sahip gözenek çözeltisi sayesinde bu döngülere karşı yüksek dayanım göstermektedir[82]. Hava sürükleyici katkı kullanılmaksızın yürütülen deneylerde, AAC numunelerinin 300 donma-çözülme döngüsüne dayanabildiği ve bu süreçte bozulmaya uğrayan PÇ numunelerine göre çok daha yüksek performans sergilediği ortaya konmuştur[83]. Çiçeklenme (efloresans), alkali içeren suyun yüzeye ulaşarak kristalleşmesi sonucu beton yüzeyinde oluşan beyaz birikintilerle tanımlanır. AAC sistemlerinde gözlemlenen düşük düzeydeki çiçeklenme, bağlayıcının mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerinde anlamlı bir etki yaratmaz. Ancak, belirli aktivatör türleri veya kür koşulları çiçeklenmeyi artırabilir.

3.1. Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Pik demir, demir cevheri, kireçtaşı ve kok kömürünün yüksek sıcaklıklarda işlenmesiyle elde edilir. Bu işlem sırasında, yüksek fırın cürufu (YFC) adı verilen bir yan ürün ortaya çıkar. YFC, sıvı hâlde iken ani soğutmayla söndürülerek büyük ölçüde amorf bir yapı kazanır. Genel olarak, YFC'nin bileşimi %27-40 arasında silisyum dioksit (SiO_2), %30-50 arasında kalsiyum oksit (CaO), %5-15 arasında alüminyum oksit (Al_2O_3) ve %1-10 arasında magnezyum oksit (MgO) içerir. Bu oranlar, büyük ölçüde kullanılan demir cevherinin kimyasal yapısına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Son yıllarda yapılan araştırmalar, YFC'nin özelliklerini ve harmanlanmış çimento üretimindeki potansiyel

kullanımını detaylı şekilde incelemiştir[84]. Cürufun ikincil bağlayıcı malzeme olarak kullanımı ve çeşitli uygulamaları üzerine kapsamlı bilgi bulunmaktadır. Bu bağlamda, en yaygın kullanım alanları arasında cüruf katkılı çimento ve harmanlanmış çimento üretimi öne çıkmaktadır. Günümüzde bu tür alternatif bağlayıcılar büyük ilgi görmektedir; çünkü Portland çimentosu (PÇ) üretimi, küresel CO₂ salımının yaklaşık %8'ine neden olmaktadır. Cüruf miktarı sınırlı olmakla birlikte, çevresel etkileri azaltma çabaları doğrultusunda cürufllu çimentoya olan talep sürekli artmaktadır [85]. YFC, Portland çimento klinkerine kıyasla daha yavaş hidratlandığı için erken yaşlarda mekanik dayanımı düşük olur, ancak zamanla dayanımda belirgin bir artış gösterir. Yavaş reaksiyona giren cüruf, kimyasal etkilere karşı oldukça dirençli ve yoğun mikroyapıya sahip çimentolu sistemlerin oluşmasını sağlar. Cürufun hidratasyonu sırasında kalsiyum hidroksit oluşmaz; bu da daha düşük bir kireç içeriği anlamına gelir. Bunun yerine, düşük kalsiyum/silikon oranına sahip kalsiyum-silikat hidrat (C-S-H) ve etrenjit gibi fazlar meydana gelir. Hidrasyon süreci, cüruf partiküllerinin çözünmesiyle başlar ve aşırı doymuş gözenek çözeltisinden hidrat ürünlerinin çökmesiyle tamamlanır. Bu noktada, çözünme hızı sürecin temposunu belirleyen en kritik etkidir. Eğer çözünme hızı yüksekse, hidrat ürünlerinin oluşumu da o kadar hızlanır. Gözenekli çözeltinin yüksek pH değeri, camsı cüruf yapısının çözünmesini hızlandırabilir; bu nedenle, genellikle Portland çimento ile birlikte kullanılması tercih edilir. Çimento ve beton teknolojisinde cürufun pek çok farklı uygulaması vardır. Geleneksel yöntemlerle üretilen çelik cürufları, kristal yapılarından dolayı genellikle beton ve yol dolgularında kullanılırken; modern çelik üretim tesislerinden elde edilen, camsı yapıya sahip cüruflar çimentolu sistemlerde daha uygun hale gelmiştir[86].

3.2. Normal Sıcaklıklarda Alkali-Aktif Cüruf Üretimi

Alkali-aktif cüruf (AAC), çimento yerine kullanılabilen çevreci bir bağlayıcı sistemdir ve yüksek fırın cürufu, uçucu kül veya metakaolen gibi endüstriyel atıkların sodyum hidroksit, sodyum silikat ya da potasyum hidroksit gibi alkali aktivatörlerle tepkimeye sokulmasıyla elde edilir. Geleneksel çimento üretiminin aksine, bu süreçte klinkerleşme adımı gerekmez; böylece %80'e varan oranda karbon emisyonu azaltımı sağlanabilir, enerji kullanımı düşer ve atık malzemelerin değerlendirilmesiyle sürdürülebilirlik desteklenmiş olur. AAC, 28 günlük periyotta 40-70 MPa aralığında yüksek basınç dayanımı sunar; düşük geçirgenliği, asit ve sülfatlara karşı direnci sayesinde zemin stabilizasyonu, yapı elemanları, madencilik

uygulamaları ve tehlikeli atık yönetimi gibi alanlarda geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir [87]. Alkali aktivasyon sonrası başlayan sertleşme süreci, ortam sıcaklığında daha yavaş ilerlese de, zamanla daha sağlam ve dirençli bir iç yapı gelişir. Bu durum, AAC'yi uzun ömürlü ve zorlu çevre koşullarına dayanıklı bir yapı malzemesi haline getirir. Üretimin oda sıcaklığında gerçekleşebilmesi, enerji açısından ciddi bir avantaj sunar. Klasik çimento üretiminin yüksek sıcaklık ihtiyacına kıyasla, AAC üretimi daha düşük enerji harcar ve dolayısıyla daha az karbon salımı yapar. Bu yönüyle, çevreye zarar vermeyen ve döngüsel ekonomiye katkı sağlayan bir üretim yöntemi olarak öne çıkar[88, 89]. AAC üretiminde en temel avantajlardan biri, enerji verimliliğidir. Oda sıcaklığında gerçekleşen alkali aktivasyon işlemi, geleneksel çimentoya göre çok daha az enerjiyle tamamlanır. Sonuç olarak çevresel etkiler azalır ve karbon ayak izi küçülür. Ayrıca, AAC'nin dayanıklılığı artar; betonun suya ve korozyona karşı direnci güçlenir. Böylece bu malzeme uzun ömürlü yapıların oluşturulmasında etkin bir rol oynar. Yüksek fırın cürufu gibi atık malzemelerin yeniden değerlendirilmesi, yalnızca atık miktarını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliğe de katkıda bulunur[88, 89]. Bununla birlikte, bazı zorluklar da mevcuttur. Örneğin, alkali aktivasyonun düşük sıcaklıklarda daha yavaş gerçekleşmesi, üretim süresini uzatabilir. Ancak bu durum, uygun sıcaklık kontrol sistemleriyle yönetilebilir. Erken yaş dayanımı açısından, Portland çimentosu (PÇ) ile birlikte kullanıldığında bu dezavantaj giderilebilir. PÇ katkısı ilk dayanımı artırırken, AAC'nin uzun vadeli dayanım üzerindeki etkisi sınırlı kalır. Ayrıca, alkali aktivatörlerin maliyeti geleneksel bağlayıcılara göre daha yüksek olabilir; fakat uzun vadeli çevresel ve enerji avantajları bu maliyeti dengeleyebilir. Genel olarak bakıldığında, oda sıcaklığında alkali-aktif cüruf üretimi; enerji tasarrufu, düşük karbon emisyonu ve sürdürülebilir inşaat malzemesi üretimi açısından önemli bir alternatiftir. Geleneksel çimentoya göre çok daha çevreci bir seçenek olarak, inşaat sektöründe kalıcı çözümler sunabilir [90-92]. Bu üretim sürecinde, alkali aktivatörlerin etkisiyle cürufun içeriğindeki silika ve alümina çözünerek N-A-S-H ve C-A-S-H türü jeller oluşturur. Bu jellerin polimerleşmesi sayesinde sertleşme gerçekleşir ve mekanik dayanım gelişir. Önceden yüksek sıcaklık gerektiren alkali aktivasyon işlemleri, günümüzde geliştirilen yeni teknolojiler sayesinde oda sıcaklığında yapılabilmekte ve böylece üretim maliyetleri düşürülürken enerji verimliliği artmaktadır. AAC, özellikle prefabrik beton üretimi, saha betonları, sülfatlı zemin uygulamaları ve nükleer atık stabilizasyonu gibi özel alanlarda tercih edilmektedir. Düşük karbon salımı ve dayanıklılığı ile öne çıkan bu malzeme, geleceğin sürdürülebilir yapı çözümlerinden biri

olarak değerlendirilmektedir. Daha ekonomik alkali aktivatörlerin geliştirilmesi ve yeşil inşaatı destekleyen politikalar sayesinde, AAC kullanımının önümüzdeki yıllarda daha da yaygınlaşması beklenmektedir.

3.3. Düşük Sıcaklıklarda Alkali-Aktif Cüruf Üretimi

Düşük sıcaklıklarda alkali-aktif cüruf (AAC) üretimi, çimento esaslı bağlayıcılara çevre dostu bir alternatif sunan ve geleneksel klinkerleşme adımını ortadan kaldıran bir teknolojidir. Bu yöntemde; yüksek fırın cürufu (YFC), uçucu kül ve metakaolen gibi sanayi yan ürünleri, sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve potasyum hidroksit (KOH) gibi alkali aktivatörlerle reaksiyona sokularak bağlayıcı özellik kazandırılır. Özellikle düşük sıcaklıklarda etkin sonuçlar elde edebilmek adına; malzeme seçimi, aktivatör oranı ve katkı maddesi kullanımı gibi değişkenler dikkatlice kontrol edilmelidir. Alkali aktivasyon temelli bu bağlayıcı sistem, geleneksel Portland çimentosuna göre karbon emisyonlarını %80'e kadar düşürebilmekte ve asit ile sülfatlara karşı yüksek dayanım göstermektedir. Ayrıca, uygun formülasyonlar kullanıldığında erken mukavemet gelişimi sağlanarak, uzun ömürlü ve dayanıklı betonlar üretilebilmektedir. Ancak düşük sıcaklık ($0-15^\circ\text{C}$) koşullarında alkali aktivasyon mekanizmasının etkinliği düşebilir; çünkü silikat ve alüminat iyonlarının çözünmesi ile jel oluşumu sıcaklıkla doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, düşük sıcaklıklarda bağlayıcının performansını artırmak için bazı stratejilerin uygulanması gereklidir [4]. Düşük sıcaklıklarda daha etkili sonuçlar almak amacıyla; yüksek molariteye sahip aktivatörlerin tercih edilmesi, çözünebilir silikat miktarının artırılması ve su/bağlayıcı oranının optimize edilmesi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Ayrıca, sertleşmeyi hızlandırmak adına $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, Na_2CO_3 ve Li_2CO_3 gibi kimyasal katkıları uygulanabilirken; kalsiyum içeriği zenginleştirilmiş sistemlerde C-A-S-H jel oluşumu teşvik edilerek dayanım artırılabilir. Nano-silika ve nano-kil gibi nanomalzemeler de düşük sıcaklıklarda reaksiyon hızını artırarak sertleşme mekanizmasına katkı sağlar. Bu üretim sürecinde harici ısı kaynağına ihtiyaç duyulmaksızın, içsel ısı üreten bileşenler (örneğin MgO veya kalsiyum alüminatlar) kullanılarak sistemin sıcaklığı kontrol edilebilir. Ayrıca, $15-20^\circ\text{C}$ aralığında yapılan kısa süreli ön kür işlemleri de sertleşme sürecini hızlandırabilmektedir. Tüm bu optimizasyon stratejileri, düşük sıcaklık koşullarında yüksek dayanım, düşük geçirgenlik ve kimyasal etkilere karşı direnç gibi teknik üstünlükler sağlayan AAC sistemlerinin geliştirilmesini mümkün kılar. Doğru

formülasyon ve üretim koşulları sağlandığında, bu bağlayıcılar 28 günlük basınç dayanımı açısından 40–80 MPa aralığında değerlere ulaşabilir. Hatta özel katkı sistemleriyle birlikte ilk 3–7 gün içinde Portland çimentosuna kıyasla daha hızlı mukavemet gelişimi görülebilir. Düşük geçirgenliği ve kapalı gözenek yapısı, betonun suya ve kimyasal saldırılara karşı dayanımını artırırken, N-A-S-H ve C-A-S-H gibi jellerin oluşumu sülfatlı ortamlarda yüksek performans sağlar. Bu bağlayıcı sistemler; soğuk iklimlerde inşa edilen betonarme yapılarda, prefabrik beton üretiminde, zemin iyileştirme çalışmalarında ve korozyon direnci gerektiren altyapı projelerinde (örneğin deniz yapıları) geniş kullanım alanına sahiptir [93]. Kış aylarında beton dökümü gibi düşük sıcaklık koşullarında hızlı priz alması gereken durumlarda da AAC, önemli avantajlar sunmaktadır. Sıcaklığın alkali aktivasyon üzerindeki etkisine bakıldığında; düşük sıcaklıklar reaksiyon hızını yavaşlatarak sertleşme süresini uzatabilir. Bu durum, üretim zamanlamasını olumsuz etkileyebilir ve projelerde gecikmelere neden olabilir. Ancak, bu sürecin optimize edilmesi; sıcaklık kontrolü, içsel ısı üretimi ve reaktif katkı kullanımı ile mümkündür. Böylece düşük sıcaklık koşullarında dahi etkin bağlayıcı performansı elde edilebilir. Gelecekte, düşük sıcaklıklarda çalışan alkali aktivasyon sistemlerinin daha yaygın hale gelmesi beklenmektedir. Yeni katkı maddelerinin geliştirilmesi ve üretim tekniklerinin iyileştirilmesiyle birlikte, düşük maliyetli ve çevre dostu bağlayıcı sistemlerin inşaat sektöründe daha fazla tercih edilmesi mümkün olacaktır. İklim değişikliği ve sürdürülebilir yapı ihtiyacının giderek artması da bu dönüşümü hızlandıracaktır. Sonuç olarak, düşük sıcaklıklarda AAC üretimi; düşük karbon emisyonu, enerji tasarrufu, yüksek dayanım ve çevresel sürdürülebilirlik gibi avantajları sayesinde çimento endüstrisine güçlü bir alternatif sunmaktadır. Düşük sıcaklık aktivasyonunun bazı zorlukları olsa da (örneğin daha uzun sertleşme süreleri), bu yöntemle çevre dostu ve uzun ömürlü yapı malzemeleri üretmek mümkündür[94-96].

3.3.1. Düşük Sıcaklıklarda Alkali-Aktif Cüruf Aktivatör Konsantrasyonu

Düşük sıcaklıklarda alkali aktivasyonlu bağlayıcı sistemlerinin (AAC) sertleşme süreci, başta aktivatör konsantrasyonu olmak üzere çeşitli parametrelerin dikkatli bir şekilde optimize edilmesini zorunlu kılmaktadır. Alkali aktivatörler, granüle yüksek fırın cürufu (YFC) gibi aluminosilikat esaslı malzemelerde bulunan SiO_2 ve Al_2O_3 fazlarının çözünmesini teşvik ederek, N-A-S-H ve C-A-S-H türü bağlayıcı jellerin oluşumunu sağlamaktadır. Ancak 0–15 °C aralığındaki düşük sıcaklıklarda reaksiyon kinetiği önemli

ölçüde yavaşlamakta, bu da bağlayıcının hidratasyon sürecini ve dayanım gelişimini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu koşullar altında, reaksiyon hızını artırmak amacıyla aktivatör konsantrasyonlarının uygun şekilde belirlenmesi gereklidir. Genel olarak, 6–12 M sodyum hidroksit (NaOH) çözeltileri ile birlikte 1,5–2,5 modül oranına sahip sodyum silikat (Na_2SiO_3) çözeltilerinin ya da potasyum hidroksit (KOH) bazlı sistemlerin kullanımı, düşük sıcaklıklarda erken yaş dayanım gelişimini destekleyici etki göstermektedir. NaOH konsantrasyonunun 4 M'nin altına düşmesi, yeterli jelleşmenin gerçekleşmemesine yol açarken; 12 M'nin üzerindeki değerler ise, aşırı hızlı reaksiyonlar nedeniyle erken yaşta çatlak oluşumuna neden olabilmektedir [97]. Alkali aktivasyon süreçlerinde düşük sıcaklıkların oluşturduğu en temel problem, silika ve alümina türü bileşenlerin çözünürlüğünün azalmasına bağlı olarak reaksiyon hızının düşmesidir. Özellikle NaOH bazlı sistemlerde, düşük sıcaklıklarda erken yaş mukavemet gelişimi zayıflarken, nihai dayanım kazanımı gecikmeli olarak gerçekleşmektedir. 5 °C'nin altındaki sıcaklıklarda priz süresi belirgin şekilde uzamakta ve sertleşme süreci yavaşlamaktadır. Bu tür olumsuzlukların önüne geçebilmek adına, daha yüksek reaktiviteye sahip aktivatör sistemleri ve optimum konsantrasyon aralıkları tercih edilmelidir [98]. Sodyum karbonat, kalsiyum nitrat ve lityum karbonat gibi kimyasal katkı maddeleri, hidratasyon reaksiyonunu hızlandırarak düşük sıcaklıklarda erken mukavemetin gelişmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, nano-silika ve nano-kil gibi nanomalzemelerin kullanımı da bağlayıcı sistemlerin reaksiyon kinetiğini artırmakta, bu sayede düşük sıcaklıklarda daha hızlı sertleşme sağlanabilmektedir. Sistem içerisinde %4–8 aralığında Na_2O eşdeğeri hedeflenerek ve uygun su/bağlayıcı oranı korunarak dayanım performansı artırılabilir. Bu şekilde optimize edilen alkali aktivasyon süreçleri, düşük sıcaklıklarda dahi erken mukavemet gelişimi, yüksek nihai basınç dayanımı (28 günde 40–80 MPa), düşük geçirgenlik, sülfat ve asit etkilerine karşı yüksek direnç gibi üstün performans özellikleri sunmaktadır. Bu tür bağlayıcı sistemler; prefabrik üretim, düşük sıcaklıklı saha koşulları ve kimyasal dayanım gereksinimi olan altyapı projeleri gibi uygulamalarda etkin biçimde değerlendirilebilmektedir. İlerleyen dönemlerde, çevresel etkisi azaltılmış ve maliyeti düşürülmüş yeni nesil aktivatörlerin geliştirilmesi ile alkali aktivasyon teknolojisinin daha yaygın hale gelmesi öngörülmektedir. Özellikle düşük sıcaklık koşullarında başarılı bir aktivasyon süreci için NaOH konsantrasyonunun 10–12 M aralığında tutulması ve sodyum silikat oranının artırılması önerilmektedir. Çevre sıcaklığının 5 °C'nin altına düştüğü durumlarda ilave önlemler alınması gerekmektedir. Bu

bağlamda, aktivatör çözeltisinin uygulama öncesinde 30–40 °C'ye kadar ısıtılması, ısı düzenleyici katkı malzemelerinin karışıma dahil edilmesi ve kalıp sisteminin yalıtımı ile ortam havalandırmasının kontrol altına alınması önerilmektedir. Bu tür önlemler, düşük sıcaklık koşullarında dahi AAC esaslı bağlayıcıların etkin bir şekilde uygulanmasına olanak sağlayacaktır. Don riski bulunan ortam sıcaklıklarında (–5 °C ve altı) hidratasyon süreçlerinin neredeyse tamamen durabileceği göz önünde bulundurularak, karışım tasarımı ve saha uygulamaları titizlikle planlanmalıdır [98].

3.4. Yüksek Sıcaklıklarda Alkali-Aktif Cüruf Üretimi

Yüksek sıcaklık koşullarında gerçekleştirilen alkali aktivasyon işlemleri, endüstriyel yan ürünlerin (örneğin cüruf, uçucu kül, metakaolen) alkali aktivatörlerle kimyasal reaksiyona girerek Portland çimentosuna alternatif bağlayıcı sistemlerine dönüşmesini mümkün kılmaktadır. Bu dönüşüm, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla daha düşük karbon emisyonu, artan kimyasal dayanıklılık ve daha hızlı mukavemet gelişimi gibi çevresel ve mekanik avantajlar sağlamaktadır. Literatürde, 30–90 °C aralığında uygulanan sıcaklıkların alkali aktivasyon süreçlerini hızlandırarak bağlayıcının erken yaş mukavemet kazanımını olumlu yönde etkilediği gösterilmiştir. Ancak, çok yüksek sıcaklıklarda (>80–90 °C) reaksiyon hızının kontrolsüz artması nedeniyle hidratasyon ürünlerinde düzensizlikler ve mikroçatlak oluşumu meydana gelebilmekte, bu durum bağlayıcının kırılma dayanımını artırarak uzun vadeli performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Optimum sıcaklık aralığı olan 30–50 °C'de bağlayıcının dengeli sertleşme göstermesi ve istenilen dayanım değerlerine ulaşması mümkündür. 50–70 °C aralığı ise erken dayanım artışı sağlasa da, iç gerilmeler nedeniyle rötre riskini artırabilir. Bu nedenle, üretim koşullarının ve sıcaklık profilinin titizlikle kontrol edilmesi büyük önem arz etmektedir. Yüksek sıcaklıklarda yaygın olarak kullanılan aktivatör sistemleri arasında sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) çözeltileri yer almakta olup; 6–10 M NaOH konsantrasyonu ile 1,5–2,5 modül oranına sahip Na_2SiO_3 çözeltileri bağlayıcının optimum performans sergilemesine olanak tanımaktadır [99]. Alternatif aktivatörler olarak potasyum hidroksit (KOH), sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve kalsiyum hidroksit [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] gibi kimyasallar da tercih edilebilmektedir. Su/bağlayıcı (w/b) oranı, bağlayıcının hem mekanik dayanım hem de işlenebilirlik özelliklerini belirleyen kritik bir parametredir. Düşük w/b oranları (<0,4), yüksek dayanım değerleri sağlarken işlenebilirliği

sınırlandırabilir; yüksek oranlar ($>0,5$) ise artan porozite ve rötre riski nedeniyle dayanımı olumsuz etkileyebilir. Yüksek sıcaklıklarda üretilen AAC sistemleri, hızlı reaksiyon kinetikleri sayesinde ilk 24 saat içerisinde 10–30 MPa aralığında basınç dayanımına ulaşılabirirken, 28 gün sonunda bu değer 50–100 MPa seviyelerine kadar çıkabilmektedir. Bu bağlayıcılar, sanayi yapıları, ağır yüke maruz kalan taşıyıcı sistemler, kimyasal etkilere direnç göstermesi gereken altyapı bileşenleri ve prefabrik yapı elemanları gibi birçok mühendislik uygulamasında etkin biçimde kullanılmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklık dayanımı ve kimyasal direnç gerektiren özel uygulamalar için büyük potansiyel sunan bu sistemlerin, aktif katkı maddeleri, nano malzemeler ve hibrit aktivatör sistemleri ile daha kararlı hale getirilerek sürdürülebilir inşaat sektöründe yaygınlaştırılması beklenmektedir[100]. Alkali aktivasyon sonrası gerçekleşen sertleşme süreci, yüksek sıcaklık etkisiyle hız kazanmaktadır. Bu durum, özellikle cüruf esaslı ba layıcılarda daha kısa sürede yapı kazanımına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, aşırı sıcaklıklar bazı kimyasal bileşenlerin bozunmasına veya reaktifliklerinin azalmasına yol açabileceğinden, sıcaklık kontrolü sistemin uzun vadeli kararlılığı açısından kritik önemdedir. Yüksek sıcaklık, kimyasal reaksiyon hızlarını artırarak yoğun, homojen ve düşük geçirgenlikte bağlayıcı matrislerin oluşımasını desteklemekte, bu da malzemenin su, asit ve alkali ortamlar karşısndaki dayanıklılığını artırmaktadır. Yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen alkali aktivasyonun avantajları arasında, üretim süresinin kısılması, daha hızlı erken mukavemet kazanımı, yüksek nihai dayanım ve gelişmiş dayanıklılık performansı sayılabilir. Sıcaklık optimizasyonunun sağlanması, aynı zamanda enerji tüketiminin azaltılmasına da katkı sunabilir[101]. Öte yandan, sıcaklığın aşırı yükselmesi bazı bileşenlerin bozunmasına, reaktif fazların dengesiz oluşımasına ve sistemin genel reaktivitesinin düşmesine yol açabileceğinden, üretim süreçlerinde sıcaklık kontrolü zorunludur. Ayrıca yüksek sıcaklık uygulamaları, ilave enerji tüketimi ve özel ekipman ihtiya ı nedeniyle üretim maliyetlerini artırabilmektedir. Bu nedenle, yüksek sıcaklıkta üretim sırasında maliyet-etkinlik dengesi de göz önünde bulundurulmalıdır [102].

4. METERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada 42,5 Mpa dayanıma sahip portland çimentosu ve granüle yüksek fırın cürufu (YFC) birincil hammadde olarak kullanılmıştır. Malzemelerin fiziksel özellikleri, Blaine yüzey alanı YFC için 4400 cm²/g PÇ için 3600 cm²/g olarak ölçülmüştür. Özgül ağırlıkları ise sırasıyla 2,8 ve 3,13'tür. Tablo 1'de YFC ve PÇ'nin kimyasal bileşimi detaylı bir şekilde verilmiştir. YFC, %38,5 kalsiyum oksit (CaO) içeriğiyle öne çıkarak alkali aktivasyon sırasında kalsiyum-alüminosilikat-hidrat (C-A-S-H) jellerinin oluşumunda önemli bir rol oynamaktadır. PÇ'nin CaO oranı %64,1 olarak daha yüksek ölçülmüştür. Bu da onun erken hidrasyona girmesini ve suyun Ca(OH)₂ ile etkileşime girmesiyle betonun hızlı bir şekilde dayanım kazanmasının sağlar. YFC'nin amorf yapısını doğrulamak için X-ışını kırınımı (XRD) analizi, RIGAKU ULTIMA IV cihazı kullanılarak yapılmıştır. YFC'nin camsı fazların fazla olduğu gözlemlenmiş bu da YFC'yi alkali aktivasyon için ideal bir öncü yapmaktadır, çünkü reaktif bileşenlerinin çözünmesi artmaktadır. Katı öncüllerin yanı sıra, bir aktivatör karışımı olarak sodyum silikat (Na₂SiO₃) ve sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır[103]. Na₂SiO₃ çözeltisi, ağırlıkça %28 SiO₂, %13,5 Na₂O ve %58,4 H₂O içerirken, kullanılan NaOH peletleri %99 saflığa sahiptir. Bu aktivatörler, etkili jeopolimerleşme reaksiyonlarını sağlamak amacıyla istenen dozaj ve modül değerlerine ulaşacak şekilde karıştırılmıştır.

Tablo 1. YFC ve PÇ'nin kimyasal bileşimleri (ağırlıkça%)

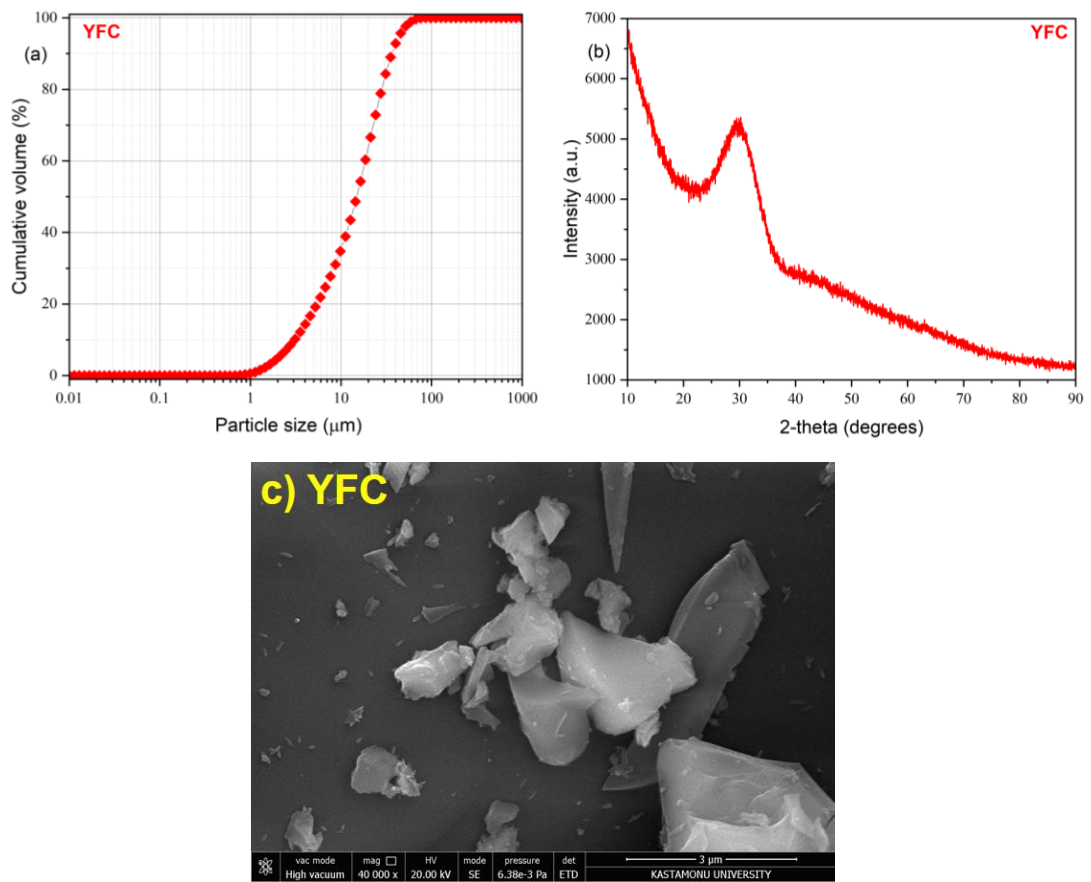
BİLEŞENLER	YFC	PÇ
SiO ₂	34,9	18,5
Al ₂ O ₃	15,8	4,4
Fe ₂ O ₃	0,7	3,1
CaO	38,5	64,1
MgO	8,6	1,2
SO ₃	<0,1	3,5
Na ₂ O	0,4	0,44
K ₂ O	0,5	0,78
LOI	<0,1	3,75

4.1. Kullanılan Malzemeler

4.1.1. Yüksek Fırın Cürufu

Çalışmamızda, ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılmıştır. Yüksek fırınlardan çıkan cüruf, demir-çelik endüstrisinde pik demir üretimi için mineral içerik olarak kullanılan bir endüstriyel atıktır. Demir cevherinden demir elde edebilmek için, "yüksek fırın" adı verilen fırınlarda yaklaşık 1600 °C'ye kadar ısıtılır ve bu işlem sırasında oksijen ile diğer yabancı bileşiklerden arındırılır. Cüruf, eridikten sonra atık olarak dışarı atılır. 1500°C civarındaki sıcaklıkta, yapısı amorf hale gelir ve yüksek miktarda alümina ile silika içerir. Cüruf soğumadan kullanılmaz [104]. Cürufun yapısal özellikleri, kullanılan soğutma yöntemine göre değişiklik gösterir. Genellikle hızlı bir soğutma işlemi, bol su ile uygulanır. Erimiş cüruf, hızlı bir şekilde soğutulduğunda hem granüler hem de camı (amorf) bir yapıya dönüşür. Bu hızlı soğuma sayesinde, kum tanelerine benzeyen parçacıklar (4mm'ye kadar) oluşur ve bu şekilde "granüle yüksek fırın cürufu" olarak bilinir. YFC, çok ince taneli hale getirilerek toz haline getirildiğinde, silisli ve alüminli amorf yapılarından dolayı puzolanik özellikler sergiler. Bu, çimento hidrasyon ürünleriyle su içinde reaksiyona girerek hidrolik bağlanma oluşturur. Ayrıca, doğrudan Portland cürufu çimento üretiminde ve betonda bileşen olarak kullanılabilir[104]. İnce öğütülmüş YFC'nin betona eklenmesi, hem taze hem de sertleşmiş betonun kalitesini artırabilir. YFC içeren beton, zorlu çevre koşullarına karşı, cürufsuz normal betona göre daha dayanıklıdır. Ancak, cürufun hidrasyon süreci, Portland çimentosuna (PÇ) göre daha yavaş gerçekleşir, bu da betonun mukavemet gelişimini yavaşlatır. Bu gecikme, cüruf oranı, PÇ su miktarı, cürufun kimyasal yapısı, çevre sıcaklıkları ve nem gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu nedenle, cürufu betonlar, normal Portland çimentosu içeren betonlardan daha uzun süre kürlenme gerektirir. Yapılan araştırmalar, cüruf katkılı betonların uygun şekilde kürlenmesi halinde geç yaş dayanımının, normal PÇ betonunun seviyesine ulaşabileceğini ya da onu geçebileceğini ortaya koymuştur. Ancak erken yaş mukavemeti, normal PÇ betonundan daha düşük olabilir. Çok ince öğütülmüş YFC, mineral katkı olarak kullanıldığında, taze betonun işlenebilirliğini artırır. Sonuç olarak, daha az su ile karıştırılabilir ve bu da su/bağlayıcı oranının azalmasını sağlar. Karışımdaki su miktarı azaldıkça betonun dayanımı da artar. YFC'nin kimyasal yapısı, hammadde kaynağına ve yüksek fırının çevresine bağlı olarak farklılık gösterebilir. YFC içindeki

oksitler arasında en yaygın olanlar kalsiyum oksit (CaO), silika (SiO_2) ve alümina (Al_2O_3)'dır. İnce öğütülmüş YFC, %30-40 oranında CaO içerdiğinde, bir miktar kendiliğinden bağlanma gösterir [105]. YFC kullanılarak yapılan betonlar, büyük nihai dayanım değerleri, düşük hidratasyon ısı ve yüksek dayanıklılık sağlar. Ayrıca, bu tür betonlar çevre açısından da faydalıdır. Çimento klinkeri kullanımının azaltılması, enerji tüketiminin düşmesine ve sera gazı emisyonlarının azalmasına yol açar. Çelik ve demir sektörlerinde ortaya çıkan endüstriyel atıkların değerlendirilmesi, çevre kirliliğini de önemli ölçüde azaltır [106].



Şekil 1. YFC Kümülatif Hacim b-) YFC yoğunluk c-) YFC SEM Görüntüsü

4.1.2. Portland Çimentosu

Dünya üzerinde sudan sonra beton, en çok kullanılan ikinci madde olup yıllık üretim hacmi 20 milyar tona ulaşmaktadır [107]. Beton bağlayıcı özelliğini portland çimentosundan alır. Dünya geneli kullanılan enerjinin %3'ü portland çimentosunun üretiminde

kullanılmaktadır [108]. Ayrıca üretim sırasında önemli miktarda CO₂ üretimine sebebiyet vermektedir. Dünyada ki CO₂ emisyonlarının yaklaşık %5-7'si çimento üretiminden kaynaklanmaktadır [109]. Portland çimento endüstrisi, yüksek emisyonları ve enerji tüketimi nedeniyle iklim değişikliğinin başlıca nedenlerinden biri olarak kabul edilmektedir ve küresel ısınmanın %65'inden fazlasından sorumlu bulunmaktadır [110]. Çimentonun yüksek maliyeti ve yarattığı çevresel etkiler nedeniyle, çimentoya alternatif bağlayıcı malzemelerin bulunması gerekmektedir. Geopolimer adı verilen yeni nesil bağlayıcılar, çimentonun yerine ikamet etmek üzere incelenmekte ve geliştirilmektedir. Alümina ve silikat içeren uçucu kül, silis dumanı, metakaolin ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu gibi atık malzemeler, alkali aktivatörler kullanılarak bağlayıcı özellikler kazanması sağlanmaktadır. Bu malzemelerin kullanılması hem atık madde birikimini azaltmakta hem de ekonomik avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca bu atık malzemelerin kullanılmasıyla, atmosfere salınan CO₂'nin oranında %26-45 azalma gözlemlenmektedir. Çimentonun yerini alabilecek malzemeler oluşturmak için farklı aktivatörler, çeşitli puzolanlarla birlikte denenmektedir [111-113]. Portland çimentosu, alçıtaşı(CaSO₄.2H₂O) ve klinkerin toz haline getirilmesiyle elde edilen hidrolik bir bağlayıcıdır. Portland çimentosu kolay ulaşılabilir bir malzeme olması ve dış etkilere karşı dayanımının yüksek olması sebebiyle günümüzde yoğun olarak tercih edilmektedir. Genel olarak sıva ve beton yapımında kullanılır.

Tablo 2. PÇ Kimyasal Bileşimi

Kimyasal Bileşimler	%
SiO ₂	18,48
Al ₂ O ₃	4,40
Fe ₂ O ₃	3,12
CaO	64,13
SO ₃	3,51
Na ₂ O	0,44
K ₂ O	0,78
Kızdırma kaybı	3,75
Özgül Ağırlık	3,10
Özgül Yüzey Alan(cm ² /g)	3490

4.1.3. Alkali Aktivatörler

Alman bilim insanı K hl, 1908 yılında alümina ve silika içeren toz malzemelerin alkali malzemeler ile etkileşime girerek yeni bağlayıcı madde olu turabilece ini keşfetti. Bu keşfi ile alkali aktivasyon olarak bilinen sürecin temellerini attı. Bu yöntemle geleneksel çimentodan farklı bir bağlayıcı malzeme geliştirmek için ilk adımı attı. Yaptığı bu çalışmayla alkali aktivasyonlu bu ürünlerin geleneksel çimentoya benzer özellikler gösterdiğini ortaya koymuştur. Buna istinaden yeni bağlayıcı türlerinin gelişiminin  n  açılmıştır. 1940'lı yıllarda Purdon, inşaat sektöründe alkali aktivasyonlu ba layıcılarla ilgili ilk bilimsel çalışmaları sunmuştur. Geopolimerizasyon reaksiyonunda bağlayıcı matrisin gelişimi, özellikle sodyum hidroksit (NaOH) gibi alkali çözeltilerin kullanımı ile ba lar. Bu reaksiyon, genellikle alüminyum ve silisli bileşenler arasındaki etkileşimlerle gerçekleşir. Ancak, NaOH yalnız başına bağlayıcı matrisin tam olarak gelişmesini sağlamaz. NaOH, alüminyum ve silika bileşiklerinin çözünürlüklerini artırır ve böylece reaksiyonun başlatılmasını sa lar. Ancak, Na₂SiO₃ gibi bir silikat kaynağı eklenmedi inde, OH⁻ iyonları yeterli değildir çünkü silika ve alüminyumun ba lanarak bir a  yapısının oluşması için silikat iyonlarına ihtiyaç vardır. Na₂SiO₃ gibi bir silikat kaynağı eklendiğinde, silika iyonları alüminyum iyonlarıyla etkileşime girer ve bu etkileşim sonucunda geopolimerler ( zellikle alüminosilikat a  yapıları) oluşur. Bu süreçte, NaOH sadece çözünürlük ve reaktiviteyi artırmakla kalmaz, aynı zamanda bağlayıcı matrisin formasyonuna da katkı sa lar.

4.1.3.1. Sodyum Hidroksit

Sodyum hidroksit diğer bir adıyla kostik soda olan NaOH sodyum karbonattan elde edilen bir kimyasal bileşiktir. Baziklik derecesi çok yüksektir. Beyaz renkte olan NaOH nem tutma özelliği ile ön plana çıkmaktadır. Suda ekzotermik olarak çözünmekte olup sabun gibi bir çözelti meydana getirir. Aynı zamanda laboratuvar ortamında serbest halde dolaşan CO₂ gibi asitlik derecesi yüksek olan gazları tutmak içinde kullanılır. Sodyum hidroksit, 13,5'lik yüksek pH değeri ve mükemmel su çözünürlüğü ile reaktif doğası sayesinde birçok farklı endüstriyel sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sodyum hidroksit, kağıt üretiminde, tarımda ilaçlama ürünlerinde, sabun yapımında, kağıt, boya, deterjan sanayide ve petrol rafinerisi gibi birden fazla kimyasal maddenin oluşumunda kullanılmaktadır.

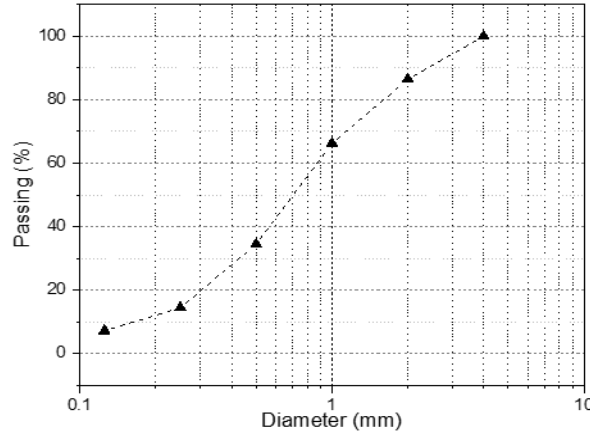
Sodyum hidroksit doğal olarak bulunmasa da, oldukça kolay bir şekilde üretilir. Normal sofr tuzunun elektroliziyle %50'lik bir çözeltinin elde edilmesiyle üretilir. Bu işlem sırasında klor gazı açığa çıkar. Çözeltideki su buharlaştığında katı kostik soda elde edilir. Kolay ulaşılabilir olması ve ekonomik olması önemli tercih sebeplerindendir. Geopolimer beton üretiminde yaygın olarak alkali aktivatör olarak kullanılmaktadır. Çimento hidratasyonunda priz hızlandırıcı olarak kullanılmaktadır. Ancak 7 ile 14 günlük basınç dayanım değerlerinde düşüşe sebep olmaktadır. Geopolimer beton üretiminde genellikle su içerisinde tam ayrıştırılmış haliyle kullanılmaktadır. Ancak ani sıcaklık değişimlerinin önüne geçebilmek için ayrışmamış halde bulunan sodyum hidroksit tanelerinin de tam anlamıyla ayrışmasının sağlanması gerekmektedir. Sulu bir ortamda, sodyum hidroksit kimyasal ayrışma geçirerek serbest hareket edebilen Na^+ ve OH^- iyonlarına ayrılır. Ardından, bu sulu ortamda karbondioksit (CO_2) gazı ile etkileşime girdiğinde karbonatlaşma adı verilen kimyasal süreç tetiklenir.

4.1.3.2. Sodyum Silikat

Su camı olarak bilinen sodyum silikat, $\text{Na}_2(\text{SiO}_3)_2\text{O}$ formülize edilir. Saf hali renksiz olmakla beraber, ticari olarak kullanılan türevlerinde yabancı maddeler nedeniyle yeşil ve ya mavi renkte de olabilir. Sodyum silikat, otomotiv uygulamaları, kereste işleme, tekstil, çimento ve refrakter malzemeler gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Sodyum silikat, silikon dioksit ve sodyum karbonatın tepkimesiyle elde edilir. Renksiz ve berrak bir malzeme olan sodyum silikat, kristal yapısına göre çeşitli gruplara ayrılır. Sınıflandırma yöntemi olarak X-ray kırınımı kullanılır. Su ile karışımıyla yoğun bir kıvam elde edilir. Bazı gruplara ait olan sodyum silikatlar suda hemen çözünmeyebilir. Bu bileşenleri çözmenin en etkili yolu basınç altında suyu ısıtmaktır. Silika jellerinin yapımında kullanılan ana bileşenlerden biri sodyum silikattır. Sodyum silikat, deterjan üretiminde, cam için çimento benzeri yapılar oluşturmakta, seramik ve çömlek yapımında, yanmaz kâğıt üretiminde, ahşap işleme ve çimento endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır. Beton üretiminde sodyum silikat en çok priz hızlandırıcı olarak tercih edilir. Püskürtme betonların en önemli özelliği olan hızlı priz almalarından dolayı sodyum silikat priz hızlandırıcı olarak püskürtme betonlarda priz hızlandırıcı olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir. Aynı zamanda çimento içerikli malzemelerde önemli bir alkali aktivatör olarak da kullanılır.

4.1.4. Agregalar

Bu çalışmada, maksimum tane boyutu 4 mm olacak şekilde dere agregası kullanılmıştır. Dere agregaları, doğal kökenli ince agregalar arasında yer almakta olup, genellikle nehir ve dere yataklarında suyun taşıyıcı etkisiyle taşınan ve yuvarlanarak doğal yollarla köşeleri aşınmış tanelerden oluşur. Bu tür agregalar, yüksek yuvarlaklık ve düzgün yüzey yapısı sayesinde betonun işlenebilirliğini artırmakta ve homojen bir karışım elde edilmesine katkı sağlamaktadır. Doğal agregalar; kum ocakları, alüvyon birikintileri, nehir yatakları ve kıyı şeritleri gibi doğal ortamlardan elde edilir. Bu tür agregaların fiziksel özellikleri, bulundukları çevresel koşullara ve kaynak kayacın türüne bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Doğal yollarla oluşan bu malzemeler, uzun yıllar süren jeolojik süreçlerin bir ürünü olup, inşaat sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir. Buna karşılık, yapay agregalar, doğrudan kullanım amacıyla endüstriyel yöntemlerle üretilen ve belirli bir tane dağılımı ile fiziksel özelliklere sahip olması hedeflenen agregalardır. Genellikle taş ocaklarında bulunan büyük kaya bloklarının konkasör (kıırma-eleme) tesislerinde çeşitli aşamalardan geçirilerek kırılmasıyla elde edilir. Bu işlem sırasında agregaların tane boyutu, şekli ve yüzey yapısı kontrol altına alınabilir. İnşaat mühendisliği uygulamalarında agregalar; beton, asfalt, temel tabakası, dolgu ve drenaj sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle beton üretiminde, agregaların özellikleri karışımın dayanımı, işlenebilirliği ve uzun vadeli performansı üzerinde doğrudan etkilidir. Kum ve çakıl gibi agregalar, doğada genellikle fiziksel ve kimyasal ayrışma süreçlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Yağmur, rüzgâr, sıcaklık farkları ve buzlanma gibi doğal etkenlerle ana kayaların zamanla parçalanması, bu tür agregaların oluşumunu sağlar. Ancak, ihtiyaç duyulan miktar ve kaliteyi karşılamak amacıyla bu malzemeler yapay olarak da üretilir. Daha önce de belirtildiği gibi, yapay agregalar, uygun kalite kontrol süreçlerinden geçirilerek konkasör tesislerinde üretilmektedir [114].



Şekil 2. Nehir agregalarının tane boyutu dağılımı

4.1.5. Doğal Su Kaynağı

Beton içerisinde kullanılan su; çimentonun hidratasyonu ve işlenebilirlik için kullanılır. Su ile çimento birleştiğinde kimyasal olaylar gerçekleşmeye başlar ve çimentonun tanecikleri su içerisinde çözünür, çözünen bileşenler değişik hızlarda tepkimeye girer ve ısı açığa çıkar, yeni ürünler oluşur. Oluşan yeni ürünler çimento hamurunun sertleşmesine ve agregaların çimento hamuru ile bağlanmasına neden olur. Beton karışımında kullanılan suyun temiz, berrak ve içilebilir kalitede olması gerekmektedir.

4.1.6 Sülfürik Asit (H_2SO_4)

Sülfürik asit formülü, H_2SO_4 kimyasal formülüyle gösterilen renksiz ve yağimsı bir sıvıdır. Sanayide oldukça önemli olan kuvvetli bir asittir. Suda çözünen ve kimya sanayinde en fazla kullanılan üründür. Akü asidi, zac yağı ya da zac asidi olarak da bilinir. Suyu karıştırdığında yüksek bir ısı açığa çıkmaktadır. Doğada saf olarak bulunmayan sülfürik asit, sanayi alanında değme yöntemiyle ya da kurşun odalar yoluyla üretilir. Konsantre sülfürik asit içeriğinde %96-98 oranında H_2SO_4 içermekte olup, özellikleri suya yakın olur. Temas halinde çok sayıda organik maddeden suyu çekmekte ve ısıveren tepkime oluşturmaktadır. Su ekzotermik tepkimeye yol açarak, asidin yüzeyinde kabarcıklar oluşturur ve aniden kaynar. Endüstride pek çok alanda kullanılan bu asidin özellikle gübre üretiminde, amonyum sülfat üretiminde, boya sanayisinde, patlayıcı yapımında ve petro kimya sanayisinde kullanıldığını görebilmek mümkündür.

4.1.7. Bazalt Elyaf

Bazalt, silika içeren ve ince tanelere sahip magmatik bir kaya türüdür. Dayanıklı yapısı ve dünyanın en yaygın ham maddelerinden biri olması, çeşitli sektörlerde kullanılmasını sağlar. Tarihsel kökenine bakıldığında 9 bin yılı aşkın süredir çeşitli yapılarda bazalt kullanıldığı görülür. Günümüzde ise daha avantajlı olmasından dolayı yapıların büyük kısmında bazalt elyaf tercih ediliyor. Elyaf lar insan eliyle üretilebildiği gibi doğal yollarla bulunması da mümkün olan malzemelerdir. Elyaf formatları, geçmişten bu yana alçı vb. yapı ürünlerine ilave edilmiş ve daha dayanıklı hâle gelmesi sağlanmıştır. Zamanla sentetik elyaflar da elde edilmiş ve farklı alanlarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Bazalt elyaf takviyeli polimerlerden üretilen bu yapı malzemeleri, alkali ve deniz ortamlarına karşı yüksek dirence sahiplerdir. Bazalt elyaf elde edilirken kullanılan malzemelerden biri, adından anlaşıldığı üzere bazalt, diğ eriyse polipropilen elyaf malzemedir. Her ikisi de yapı malzemelerine katkı sağlamak amacıyla kullanılır. Bazalt elyafların ham maddesi, volkanik püskürük kaya hâlinde bulunur ve kimyasal kararlığa sahiptir. Aynı zamanda doğal termal kararlılığı olduğundan dolayı sağ lığı riske atacak bir faktör taşımadığı da bilinir. Günümüzde karbon elyaf yerine geçmeye başlayan bazalt elyafların fiziksel özellikleri, inşaat sektöründe son derece avantajlıdır. Takviyeli kompozit olarak elde edilen bazalt elyafların kimyasal kararlılığı, 3 saatlik kaynatma sonrasındaki ağırsızlık olarak elde edilen sayısal verilerdir. Bu veriler, bazalt elyafların kimyasal kararlılığı sayesinde sağ lığı riske atmadığını kanıtlar. Bazalt elyaflar, güçlü ve dayanıklıdır. Yapı çalışmalarında beklentileri ve ihtiyaçları karşılayacak, neredeyse devrim niteliğinde özelliklerle hayatımıza girmiştir. Teknik donatı tekstilleri olarak karşımıza çıkan bu malzemeler, sanayi, inşaat, havacılık gibi birçok sektörde avantaj sağlar. Bu nedenle kullanım alanları da son derece geniştir. Seçilen bazı karışımlara ilave olarak takviye malzemesi olarak cam lifler (BF – basalt fiber yerine "basalt fiber" veya "boron fiber" ifadesi kullanıyorsanız belirtin, ancak burada "BF" genel olarak cam elyafları olarak ele alınmıştır) dâhil edilmiştir. Bu liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2’de özetlenmiştir. BF’ler 4840 MPa çekme dayanımı, 89 GPa elastik modül, –260°C ila +982°C arasında geniş bir servis sıcaklık aralığı, 1450°C erime noktası, 2,60–2,80 g/cm³ arasında özgül ağırlık, 9–23 µm çap aralığı ve ortalama 12 mm lif uzunluğu gibi üstün teknik özelliklere sahiptir. Bu karakteristikler, alkali-aktive harç sistemine çatlak köprüleme kapasitesi, kimyasal kararlılık ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi önemli katkılar sağlamaktadır.

Tablo 3. Bazalt lifin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellikler	Değer
Çekme dayanımı	4840 MPa
Elastic modül	89 GA
Servis sıcaklık aralığı	-260°C to +982°C
Erime noktası	1450°C
Özgül ağırlık	2,60–2,80 g/cm ³
Lif çapı	9–23 µm
Lif uzunluğu	12 mm

4.2. Karışım Oranları ve Numunelerin Hazırlanması

4.2.1. Karışım Oranları

Tablo 4. Karışım Oranları

Karışım adı	YFC	PC	kum	SS	SH	su
D8C0BF0	525	0	1444	209,4	17,71	114
D8C0BF3	525	0	1444	209,4	17,71	114
D8C0BF6	525	0	1444	209,4	17,71	114
D8C15BF0	447	79	1447	209,9	17,76	114,2
D8C15BF3	447	79	1447	209,9	17,76	114,2
D8C15BF6	447	79	1447	209,9	17,76	114,2
D12C0BF0	518	0	1424	309,8	26,21	52,03
D12C0BF3	518	0	1424	309,8	26,21	52,03
D12C0BF6	518	0	1424	309,8	26,21	52,03
D12C15BF0	441	78	1427	310,6	26,28	52,16
D12C15BF3	441	78	1427	310,6	26,28	52,16
D12C15BF6	441	78	1427	310,6	26,28	52,16

Hazırlanan hibrit alkali-aktive harçlara ait ayrıntılı karışım oranları Tablo 4’te sunulmaktadır. Bu tabloda, her bir karışım için kullanılan YFC, PC, nehir kumu, sodyum silikat (SS), sodyum hidroksit (SH) ve su miktarları verilmiştir. Karışım kodları, “D [alkali dozajı] C[PC oranı] BF[BF içeriği]” biçiminde tanımlanmıştır. Örneğin; D8C0BF0 kodu, %8 Na₂O dozajına, %0 PC ikamesine ve %0 cam lifi içeriğine sahip bir karışımı ifade ederken, D8C15BF6 kodu, %8 Na₂O dozajı, %15 PC ikamesi ve %0,6 BF içeriğine sahip karışımı göstermektedir.

4.2.2. Numunelerin Hazırlanışı

Numunelerimiz 50x50x50 mm boyutlarında küp şeklinde üretilmiş olup her bir karışım için üç adet örnek numune tasarlandı. YFC' u aktif hale getirmek için alkali aktivatörler kullanıldı. Karışımlarda kullanılan AD' ı %6, %8 ve %10 olarak belirlendi.

$$\text{Alkali Dozajı (\%)} = \frac{\text{Alkali Maddenin Kütlesi (g)}}{\text{Çözeltinin Toplam Kütlesi (g)}} \times 100 \quad (4.1)$$

Tüm malzemeler bir araya getirildikten sonra mutfak tipi karıştırıcı ile karıştırılıp harç haline getirildi. Hazırlanan numuneler özel olarak sipariş edilen 50x50x50 mm boyutundaki hazır kalıplara dökümü yapıldı. Numunelerin kalıplardan rahat ve pürüzsüz bir yüzeye sahip şekilde çıkarabilmek için döküm yapmadan önce kalıp yüzeyleri yağlandı. Kalıplara dökülen karışımlarda karışım içerisinde bulunan boşlukları minimum seviyeye indirmek için titreşim uygulandı. Hazırlanan numuneler 7, 28 ve 90 gün boyunca 0 °C de soğutucuda düşük sıcaklıkta kürlendi.

4.3. Gerçekleştirilen Deneyler

Bu deneysel çalışma, farklı üretim koşulları altında hazırlanan hibrit alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu (YFC) ve Portland çimentosu (PÇ) esaslı kompozit harçların mekanik ve dayanıklılık performanslarını değerlendirmek amacıyla planlanmıştır. Çalışma kapsamında uygulanan yöntemler ve deney prosedürleri, uluslararası standartlarla uyumlu olacak şekilde titizlikle belirlenmiş ve böylece elde edilen sonuçların güvenilirliği ve tekrarlanabilirliği garanti altına alınmıştır. Numune üretiminde kullanılan hammaddeler; granüle yüksek fırın cürufu (YFC), Portland çimentosu (PÇ), doğal dere kumu ve alkali aktivatörler olarak sodyum silikat ile sodyum hidroksitten oluşmuştur. Bu bileşenler, deneysel tasarımda belirlenen oranlara göre hassas bir şekilde tartılmış ve homojen bir karışım elde edilene dek karıştırılmıştır. Alkali aktivatör çözeltisi hazırlanırken, öncelikle sodyum hidroksit su içinde çözündürülmüş, bu çözelti oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra sodyum silikat ile karıştırılarak nihai aktivatör çözeltisi elde edilmiştir. Taze harç karışımları, mekanik performans testlerine uygun olarak 50 mm x 50 mm x 50 mm boyutlarındaki küp kalıplara dökülmüştür. Numunelerin içinde hava boşluğu oluşumunu en aza indirmek amacıyla titreşimli sıkıştırma yöntemi kullanılmıştır. Kalıplarda 24 saat

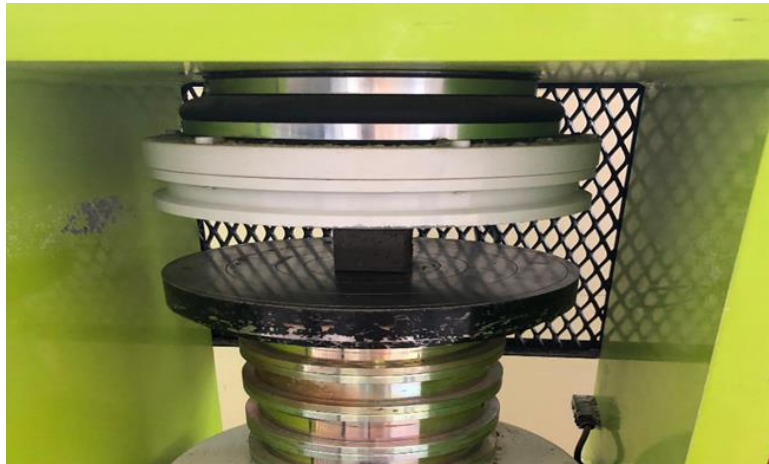
bekletilen numuneler daha sonra kalıptan çıkarılarak, soğuk hava koşullarını simüle eden 0°C sıcaklıktaki kontrollü bir kür ortamında kürlenmeye alınmıştır. Bu uygulama ile soğuk iklim koşullarında malzemenin davranışını değerlendirmek hedeflenmiştir. Üretilen harçların basınç dayanımları, ASTM C109/C109M [115] standardı esas alınarak 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda test edilmiştir. Bu testler için 0,9 kN/s yükleme hızına sahip hidrolik evrensel test makinesi kullanılmıştır. Dayanıklılık performansını daha ayrıntılı inceleyebilmek adına, numuneler ayrıca %5'lik sülfürik asit çözeltisine 90 gün boyunca daldırılmış ve bu süre zarfında meydana gelen basınç dayanımı değişimleri belirli aralıklarla ölçülmüştür. Numunelerin mikro yapısal özellikleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelenmiştir. SEM görüntülerinin kalitesini artırmak amacıyla örnekler altın kaplama işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan SEM analizlerinde numunelerin morfolojik yapısı, gözeneklerin dağılımı ve oluşan hidratasyon ürünleri detaylı biçimde gözlemlenmiştir (Tablo 5). Çalışmanın önemli bir çıktısı olan Şekil 3, hem malzeme tasarımıyla ilgili temel parametreleri (yalnızca YFC bazlı, %15 oranında Portland çimentosu katkılı ve bazalt fiberle takviye edilmiş hibrit harçlar), hem uygulanan testleri (mekanik özellikler, ultrases geçiş hızı – UPV, asit dayanımı testleri) hem de elde edilen başlıca bulguları özetlemektedir. Elde edilen dikkat çekici sonuçlardan biri; %8 alkali aktivatör dozajına ve %0,6 oranında bazalt fiber içeriğine sahip, Portland çimentosu içermeyen harçların hem basınç dayanımı hem de asit saldırısına karşı direncinin yüksek olmasıdır. SEM analizleri, bu tür harçlarda soğuk kürleme koşulları altında mikro yapının daha yoğun olduğunu ve lif-matris ara yüzeyinde güçlü bir bağlanma sağlandığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, özellikle agresif çevresel koşullar (asidik ortamlar, donma-çözülme, sülfat saldırısı vb.) altında yapı malzemelerinin performansının artırılmasına yönelik çalışmalar açısından büyük önem taşımaktadır. Soğuk hava koşullarında kürlenmiş, fiber takviyeli alkali aktive kompozit harçların hem mekanik hem de dayanıklılık açısından üstün özellikler sergilediği sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 5. Gerçekleştirilen testler

Test	Standard	Kullanılan numune
Basınç dayanımı	ASTM C109/C109M[116]	50x50x50 mm ³ küp (her test için3 adet)
UPV	ASTM C597[117]	50x50x50 mm ³ küp (her test için3 adet)
Eğilme dayanımı	ASTM C348 [118]	40x40x160 mm ³ prizma (her test için3 adet)
Asit saldırısı		50x50x50 mm ³ küp (her test için3 adet)
SEM		Altın kaplanmış numune

4.3.1. Basınç Deneyi

Beton, genel olarak yüksek basınç dayanımına sahip, ancak düşük çekme dayanımına sahip bir yapı malzemesidir. Betonun çekme dayanımı düşük olduğundan, bu özellik genellikle göz ardı edilmektedir. Betonun en önemli özelliği olan basınç dayanımı, eksenel yük altındaki dayanım olarak tanımlanır. Betonlardaki gerilme dayanımı, kırılma yükünün numune alanına bölünmesiyle hesaplanır ve birimi MPa olarak ifade edilir. Yapılan basınç deneylerinde basınç presi cihazı kullanılmıştır. Deney için 50x50x50 boyutlarına sahip numuneler üretilmiş olup deney gerçekleştirilmiştir. Her bir karışım için üç ayrı numune hazırlanmış olup sabit hıza sahip basınç ile deney yapılmıştır. Numuneler 7, 28 ve 90 gün bekletilerek iki basamak halinde gerçekleştirilmiştir. 1. Aşamada numuneler soğutucuda 0 C⁰ sıcaklıkta 7, 28 ve 90 gün bekletildikten sonra pres yardımı ile kırılarak basınç dayanımlarına bakılarak 2. Aşamada ise 0 C⁰ sıcaklıkta bekletildikten sonra 90 gün sülfat etkisine maruz bırakılmış olup pres yardımı ile basınç dayanımlarına bakılarak değerler MPa birimiyle kaydedilmiştir ve dayanımları belirlenmiştir.



Şekil 3. Basınç Dayanım Cihaz

4.3.2. Ultrases Hız Ölçümü (UPV)

Betonun mukavemetini ve gözenek yapısını belirlemenin tahribatsız bir yöntemi ultra ses ölçüm ekipmanı kullanmaktır. Ultrasonik sesi ölçen bir alet, ses dalgalarını numunenin bir yüzeyinden diğerine aktarmak için kullanılır. Ses dalgalarının verici ile alıcı arasında seyahat etmesinin aldığı süre, dalga hızını hesaplamak için kullanılır. Hesaplanan

ultrasonik dalga hızı ile betonun basınç mukavemeti ve diğer özellikleri arasında yaklaşık korelasyonlar bulunur. Proceq Pundit Lab markası, denemede kullanılan alettir. Ultrases hız ölçümü numuneler 7, 28 ve 90 gün sonlarında 3 ayrı aşama ile her 3 numune kendi gün sayılarını tamamlandıktan sonra UPV cihazı yardımı ile belirlenmiştir. Numunelerin ses geçiş hızları ölçülmeden önce yüzeyleri temizlenip jel sürülerek karşılıklı olan yüzeylerin birine ses alıcı probu diğer yüzeyine ise ses verici prob yerleştirilerek ölçülmüştür. Ölçülen değerler mikro saniye olarak hesaplanmıştır.

4.3.3. Kütle Değişimi

Üretilen numuneler 90 gün boyunca sülfat içeren kür havuzunda bekletilecektir. 90 gün akabinde numuneler kür havuzundan çıkartılıp hassas terazide tartılıp kür havuzuna koyulmadan önceki ağırlıklarıyla karşılaştırılacaktır.

4.3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Tunceli Munzur Üniversitesi Merkez Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne ait JSM-6510 markalı bir SEM cihazı kullanılarak, numunelerin SEM-EDX incelemesi gerçekleştirildi. Sputter coater olarak bilinen bir kaplama aracı kullanılarak, kırılmış numuneler analiz edilmek üzere düzgün bir şekilde kaplandı. Numune yüzeyi, elektron tabanlı yüksek çözünürlüklü görüntü edinme teknolojisi kullanan bir taramalı elektron mikroskobu kullanılarak üç boyutlu olarak görüntülenir. Numune yüzeyinin topografyası ve bileşimi hakkında bilgi taşıyan farklı sinyaller, numunedeki atomlarla etkileşime giren elektronlar tarafından üretilir. Elektron ışını, yüzeyi taramak için bir ızgara tarama deseni kullanır ve görüntü, ışının konumunun algılanan sinyalle karşılaştırılmasıyla üretilir.



Şekil 4. SEM cihazı[119]

4.3.5. Sülfürük Asit Saldırısı

90 gün boyunca 0 °C’de kürlenene numuneler, ardından 90 gün boyunca sülfürük asit çözeltisine maruz bırakılmıştır. Süre sonunda, numunelerin basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı (UPV), SEM görüntüleri ve kütle artışı gibi performans kriterleri tekrar incelenmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

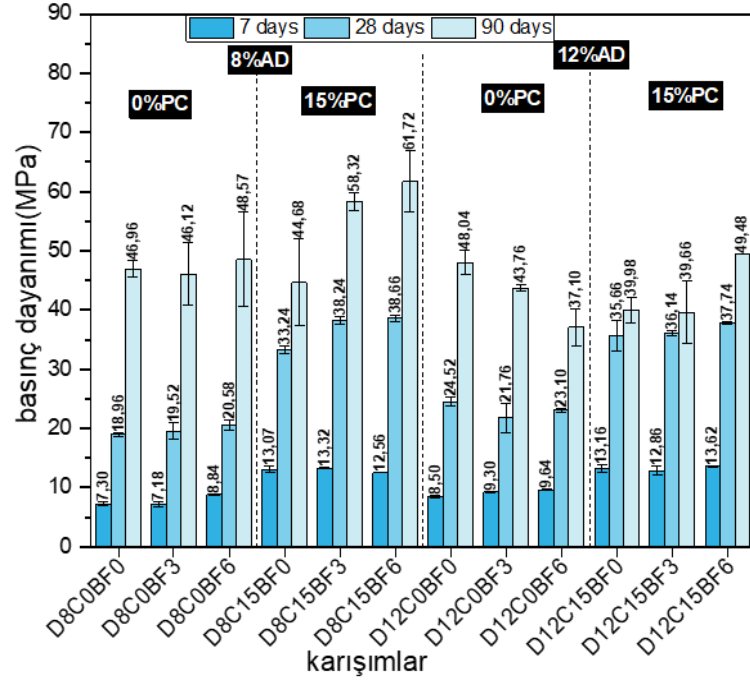
5.1. Basınç Dayanım Deneyi Sonuçları

Şekil 5’de sunulan deneysel sonuçlar, 0 °C’de 7, 28 ve 90 gün boyunca kürlenmiş hibrit alkali aktive slag/Portland çimento harçlarının basınç dayanımı gelişimini ayrıntılı ve sistematik bir biçimde ortaya koymaktadır. Soğuk ortamda gerçekleşen kimyasal reaksiyonların kinetik olarak yavaşlamasına rağmen, elde edilen dayanım verileri, hibrit bağlayıcı sistemlerin zamanla önemli mekanik gelişim gösterdiğini ve bu gelişimin temelinde çok yönlü reaksiyon mekanizmalarının bulunduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, iki ana reaksiyon grubu eş zamanlı olarak devam etmektedir: yüksek alkalili ortamda aluminosilikat minerallerin çözünmesi sonucu başlayan jeopolimerleşme reaksiyonları ve Portland çimentosunun hidratasyon reaksiyonları. Her iki reaksiyon da farklı tipte bağlayıcı jel oluşumuna yol açarak mikro yapının yoğunlaşmasına ve dayanım artışına katkıda bulunur[120, 121]. Jeopolimerleşme sürecinde, aktivatörün yüksek pH ortamı aluminosilikat minerallerin yüzeyinde bulunan silikat (SiO_4) ve alüminat (AlO_4) tetraedrlerinin çözünmesini hızlandırır. Bu iyonlar serbest hale geldikten sonra, polikondensasyon reaksiyonları sonucu C-A-S-H (kalsiyum alüminyum silikat hidrat) tipi bağlayıcı jel oluşur. Bu jel, harcın mikro yapısında gözenekleri doldurur ve sıkı bir bağlayıcı ağ yaratır. Aynı zamanda, Portland çimentosunun hidratasyonu ile açığa çıkan C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) jelleri, geleneksel çimentolu sistemlerde dayanımı sağlayan başlıca bağlayıcı fazlardır. Bu iki jel fazının birlikte varlığı, matrisin yoğunlaşmasını sağlar ve gözenekliliği önemli ölçüde azaltır, böylece mekanik dayanım gelişir [122, 123]. Düşük sıcaklıklarda reaksiyon kinetiği yavaş olduğu için, erken yaş dayanımları görece düşük olsa da, 90 güne kadar devam eden reaksiyonlar sayesinde dayanımda önemli bir artış yaşanmaktadır. %8 aktivatör dozajı ile Portland çimentosu içermeyen, tamamen YFC’den oluşan alkali aktive harçlarda, 7 gün sonunda basınç dayanımı 7,30–8,87 MPa aralığında ölçülmüştür. Bu erken yaş dayanımı, jeopolimerleşme reaksiyonlarının düşük sıcaklıklardaki yavaş ilerleyişinin bir yansımasıdır. Ancak, 28. gün sonunda dayanım yaklaşık iki kat artarak 18,96–20,58 MPa seviyelerine ulaşmıştır. 90. gün sonunda ise bu

değerler 46,12–48,57 MPa gibi yüksek seviyelere yükselmiştir. Bu kademeli ve düzenli artış, aluminosilikat minerallerin çözünmesi ve polikondensasyonun devam ettiğinin açık bir göstergesidir [124-126]. Aynı zamanda, bu sistemlerde kullanılan bazalt liflerin katkısı da uzun vadede önemli ölçüde belirgindir. Lifler, mikroyapıda oluşabilecek çatlakların büyümesini engelleyen köprüleme etkisi ile mekanik dayanımı artırmaktadır. Mikro çatlakların ilerleyişini durdurarak yük transferini optimize eder ve böylece yapısal bütünlüğün korunmasına yardımcı olur [127, 128]. Ancak, soğuk kürleme koşullarında reaksiyon hızı düşük olduğu için, liflerin erken yaşta sağladığı mekanik katkı sınırlı kalmaktadır. Hibrit sistemlerde, %15 Portland çimentosu içeren (%85 YFC) harçlar, hem erken hem de uzun vadede belirgin dayanım artışı sağlamıştır. 7. gün sonunda lifsiz ve %0,3 ile %0,6 basalt lif içeren karışımlarda basınç dayanımları sırasıyla 13,07, 13,32 ve 12,56 MPa olarak ölçülmüştür. 28. günde bu dayanımlar önemli ölçüde artarak sırasıyla 33,24, 38,24 ve 38,66 MPa'ya yükselmiş, 90. gün sonunda ise 44,68, 58,32 ve 61,72 MPa seviyelerine ulaşmıştır. Bu sonuçlar, Portland çimentosunun soğuk ortamda da uzun süreli hidrasyon reaksiyonlarının devam ettiğini ve böylece C-S-H jellerinin giderek yoğunlaştığını göstermektedir. Hidrasyonun ilerlemesiyle, mikro yapı daha sıkı ve yoğun hale gelirken, jeopolimerleşme ürünleri de bu yapı ile entegre olarak dayanıklılığı artırmaktadır [38, 129]. Ayrıca, liflerin %0,3 ve %0,6 oranlarında kullanımı, mikro çatlakların kontrolünü sağlamış ve liflerin köprüleme etkisi sayesinde dayanım üzerinde pozitif bir etki yaratmıştır[41]. Lifler, yük altında mikro çatlakların oluşumunu geciktirir, gerilmeleri dağıtır ve böylece hem dayanıklılık hem de yapısal bütünlük artar. Aktivatör dozajı %12'ye çıkarıldığında, PC içermeyen karışımlar daha yüksek erken ve orta yaş dayanımları göstermiştir. 28. gün dayanımı 24,52 MPa'ya, 90. gün dayanımı ise 48,04 MPa'ya yükselmiştir. Ancak lif katkısının etkisi bu durumda farklılaşmıştır. 7 ve 28. günlerde lif eklenmesi küçük dayanım artışları sağlarken, 90. gün dayanımında %0,3 ve %0,6 lif içeren karışımlarda dayanımlar sırasıyla 43,76 MPa ve 37,10 MPa'ya düşmüştür. Bu durum, yüksek alkali konsantrasyonunun liflerin harç içindeki homojen dağılımını engellemesi, liflerin kümelenmesi ve ara yüzeyde kimyasal bozulmaların meydana gelmesi ile açıklanabilir. Bu olaylar mikro yapının heterojenleşmesine ve yerel gerilme yoğunlaşmalarına neden olarak mekanik performansı düşürür. Ayrıca, yüksek alkalilik, geç dönem jel oluşumunu olumsuz etkileyerek otojen büzülme ve mikro çatlakların ortaya çıkmasına sebep olabilir[130, 131]. %15 Portland çimentosu ve %12 aktivatör dozajı içeren karışımlar daha dengeli ve stabil bir mekanik performans sergilemiştir. Erken yaş

dayanımları (%7 gün) 12,86–13,62 MPa aralığında olup, %8 aktivatör dozajlı sistemlere yakındır. 28 ve 90. günlerde ise %0 ve %0,3 lif içeren karışımlarda dayanımlar 35–40 MPa arasında kalırken, %0,6 lif içeren karışımda 90. gün dayanımı 49,48 MPa'ye yükselmiştir. Bu, lif takviyesinin Portland çimentosu içeren sistemlerde daha olumlu bir etkiye sahip olduğunu ve lif-matris bağının yüksek alkalilikte bile korunduğunu göstermektedir. Portland çimentosu, yüksek alkalilikteki ortamda erken dönemde yapı bütünlüğünü sağlayarak lif-matris etkileşimini güçlendirmekte ve böylece PC içermeyen sistemlerde görülen lif kaynaklı olumsuzlukları azaltmaktadır. Hibrit bağlayıcı sistemi, jeopolimerleşme ile hidrasyon reaksiyonlarının eş zamanlı ve dengeli ilerlemesiyle yüksek dayanım ve dayanıklılık elde edilmesini mümkün kılar. Aktivatör dozajının %8'den %12'ye yükseltilmesi, jeopolimerleşme reaksiyonlarının kinetiğini hızlandırmakta ve erken yaş dayanımlarında iyileşme sağlamaktadır. Ancak uzun vadede, özellikle lif ve Portland çimentosu içeren karışımlarda, %8 aktivatör dozajı ile elde edilen mekanik dayanımlar daha yüksek ve tutarlıdır. En iyi performans, %8 aktivatör dozajı, %15 Portland çimentosu ve %0,6 basalt lif içeren karışımlarda görülmüş, 61,72 MPa gibi yüksek bir basınç dayanımı elde edilmiştir. Bu formülasyon, kimyasal reaksiyonların dengeli ilerlemesi, hidrasyon ve jeopolimerleşme ürünlerinin birlikte oluşması ve lif takviyesi ile mikro çatlak kontrolünün etkin olmasının sonucudur [132]. Öte yandan, %12 aktivatör dozajlı sistemlerde bileşim optimizasyonu gereklidir; aksi takdirde liflerin dağılım bozukluğu, bağ zayıflığı ve mikro yapı heterojenliği gibi sorunlar uzun vadede dayanımı azaltabilir. Düşük sıcaklıklarda alkali aktive harçların mekanik performansı, aktivatör konsantrasyonu, bağlayıcı bileşen oranları ve lif takviyesinin karmaşık etkileşimleri ile belirlenmektedir. Bu parametreler, mikro yapının homojenliği, gözeneklilik seviyesi ve reaksiyon kinetiği üzerinde kritik rol oynar. Yüksek alkalilik erken yaş reaksiyonlarını desteklerken, liflerin kimyasal ve fiziksel stabilitesi ile Portland çimentosu içeriğinin bağlayıcı sistemle uyumu başarıyı belirler. Orta seviyede Portland çimentosu içeriği ve optimal lif dozajı ile %8 aktivatör dozajının kullanımı, soğuk iklimlerde dayanıklı, yüksek performanslı ve uzun ömürlü alkali aktive harçların geliştirilmesinde etkili, ekonomik ve sürdürülebilir bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Sonuç olarak, bu araştırma düşük sıcaklıklarda hibrit alkali aktive harçların mekanik ve mikro yapısal gelişimlerini kapsamlı biçimde ortaya koymuş, farklı aktivatör dozajlarının, Portland çimentosu içeriğinin ve lif takviyesinin birbirleriyle olan etkileşimlerini detaylandırmıştır. Bu sayede, özellikle soğuk iklim bölgelerinde kullanılmak üzere, yüksek dayanımlı ve dayanıklı yapısal malzemelerin

tasarımında rehberlik edecek önemli veriler sunulmuştur. Ayrıca, jeopolimer ve hibrit sistemlerin sürdürülebilir beton teknolojileri alanındaki potansiyeli bir kez daha doğrulanmıştır.



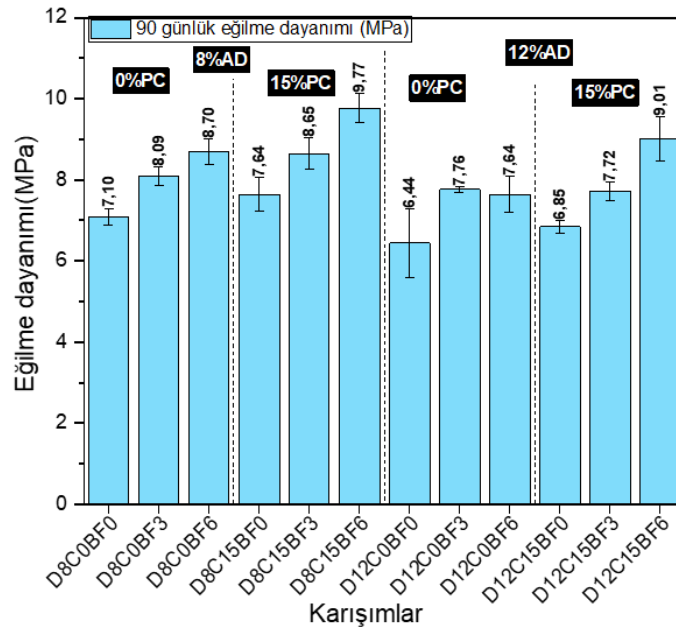
Şekil 5. Karışımların basınç dayanımı sonuçları

5.2. Eğilme Dayanımı

Şekil 6, farklı bağlayıcı bileşimlerine, alkali aktivatör dozajlarına ve lif içeriklerine sahip hibrit alkali ile aktive edilmiş harçların, 0 °C sabit sıcaklık altında 90 günlük kür süresi sonunda gösterdiği eğilme dayanımı performansını sunmaktadır. Araştırmada kullanılan parametreler arasında granüle yüksek fırın cürufu (YFC), portland çimentosu (PC), bazalt fiber (BF) ve alkali aktivatör dozu (%8 ve %12 AD) yer almaktadır. Elde edilen veriler, hem bağlayıcı matrisin kompozisyonunun hem de lif içeriğinin, eğilme dayanımı üzerinde doğrudan etkili olduğunu; ayrıca bu etkilerin, aktivatör çözeltisinin alkalinite seviyesine bağlı olarak pozitif ya da negatif yönde değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur. %8 AD seviyesinde, özellikle PC içermeyen yani yalnızca %100 YFC kullanılan karışımlarda, bazalt fiber ilavesi ile eğilme dayanımında kademeli ve istikrarlı bir artış gözlemlenmiştir. Bu artış, fiberin katkı miktarına bağlı olarak sırasıyla 7,10 MPa (%0 BF), 8,09 MPa (%0,3 BF) ve 8,70 MPa (%0,6 BF) olarak ölçülmüştür. Bu eğilim, fiberin özellikle çatlak

köprüleme etkisi ve kırılma enerjisini absorbe etme kapasitesine bağlı olarak açıklanmaktadır. Lifler, mikro çatlakların oluşumunu geciktirerek veya ilerlemesini sınırlayarak yapının daha sünek davranmasını sağlar. Benzer şekilde, bağlayıcısında %15 oranında portland çimentosu içeren (%85 YFC + %15 PC) karışımlar da lif miktarı arttıkça artan eğilme dayanımı değerleri göstermiştir: 7,64 MPa (%0 BF), 8,65 MPa (%0,3 BF) ve 9,77 MPa (%0,6 BF). Lif takviyesine ek olarak PC'nin bağlayıcı sistemde bulunması, hidrasyon tepkimeleri sonucunda C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) jeli oluşumunu teşvik ederek, alkali aktivasyon sürecinde gelişen C-A-S-H (kalsiyum alüminat silikat hidrat) jel yapısını desteklemekte, böylelikle daha yoğun, daha bütünlüklü ve çatlaklara karşı dirençli bir matrisin oluşmasına katkı sağlamaktadır [133]. Bu bağlamda, %8 AD ile aktive edilmiş, %15 PC içeren ve %0,6 BF takviyesi yapılan karışım, tüm sistemler arasında en yüksek eğilme dayanımına sahip olmuş ve hem mekanik hem de mikro yapısal açıdan optimum performansı sağlamıştır. Bu başarı, alkali aktivasyon, çimento hidrasyonu ve fiber takviyesinin sinerjik etkileriyle açıklanabilir. Bu tür çok yönlü katkılar, malzemenin hem erken hem de uzun vadeli dayanım performansını artırmada kritik rol oynamaktadır. Aktivatör dozajı %12'ye çıkarıldığında, yani sistem daha yüksek derecede alkaline hale getirildiğinde, genel olarak eğilme dayanımında düşüş yaşandığı gözlemlenmiştir. PC içermeyen karışımlarda, lif katkısı yapılsa dahi önceki seviyelere ulaşmak mümkün olmamıştır. Eğilme dayanımı değerleri sırasıyla 6,44 MPa (%0 BF), 7,76 MPa (%0,3 BF) ve 7,64 MPa (%0,6 BF) olarak ölçülmüştür. İlginç bir şekilde, %0,6 BF içeriğinde, %0,3 BF'ye göre bir azalma meydana gelmiştir. Bu durum, yüksek alkalilik ortamının liflerin yüzey özelliklerini olumsuz etkileyerek fiber-matris ara yüzeyinde bağlanmayı zayıflatabileceğini düşündürmektedir. Ayrıca yüksek AD seviyeleri, matrisin gözenekliliğini ve mikro yapısal heterojenliğini artırarak mukavemeti sınırlayıcı bir etki oluşturabilir. PC katkılı karışımlar, %12 AD koşullarında dahi daha kararlı bir eğilme dayanımı sergilemiş; bu bağlamda sırasıyla 6,85 MPa (%0 BF), 7,72 MPa (%0,3 BF) ve 9,01 MPa (%0,6 BF) değerlerine ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, PC'nin hidrasyon ürünleri aracılığıyla matrisin bağlayıcılık kapasitesini ve mikroyapı dayanıklılığını artırdığını, özellikle fiber katkısıyla birlikte bu olumlu etkinin daha belirgin hale geldiğini göstermektedir. Ancak yine de bu sistemlerde elde edilen maksimum eğilme dayanımı, %8 AD ile elde edilen değerlere göre daha düşüktür. Elde edilen sonuçlar, sistemin toplam dayanım performansının yalnızca bağlayıcı ve lif içeriğine değil, aynı zamanda aktivatör çözeltisinin konsantrasyonuna da doğrudan bağlı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. %8

AD, hem matrisin içyapı kararlılığı hem de fiber-matris etkileşimi açısından daha uygun bir ortam sağlamaktadır. Orta düzeydeki alkalinite, fiberin kimyasal olarak zarar görmeden işlevini yerine getirebilmesine olanak tanırken, matrisin daha kontrollü ve homojen bir yapıya kavuşmasına da yardımcı olmaktadır. Diğer yandan %12 AD gibi yüksek alkalilik seviyeleri, özellikle PC içermeyen sistemlerde mikroyapı bozulmasına, artan poroziteye ve liflerin performansını sınırlandıran kimyasal bozunmalara neden olmaktadır. Bu da daha düşük ve tutarsız eğilme dayanımı değerleri ile sonuçlanmaktadır. Bu bulgular, hibrit alkali ile aktive edilmiş harçların yüksek performans gösterebilmesi için yalnızca lif ve bağlayıcı içeriklerinin değil, aynı zamanda aktivatör çözeltisinin dozajının da dikkatle optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir. %8 AD, %15 PC ve %0,6 BF içeren karışım, özellikle soğuk iklim koşullarında (0 °C) en uygun performansı sergilemiş; hem yüksek eğilme hem de basınç dayanımı ile dikkat çekmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, ileri düzey yapı malzemeleri geliştirme çalışmalarında, yalnızca maksimum mukavemet değil, aynı zamanda dayanıklılık, çatlak kontrolü ve mikroyapı bütünlüğü gibi parametrelerin de dikkate alınması gerektiği önerilmektedir. Lif katkısı ile elde edilen çatlak köprüleme etkisi ve PC katkısıyla sağlanan ilave C-S-H jel oluşumu, gelecekteki sürdürülebilir yapı malzemeleri tasarımı için önemli avantajlar sunmaktadır.

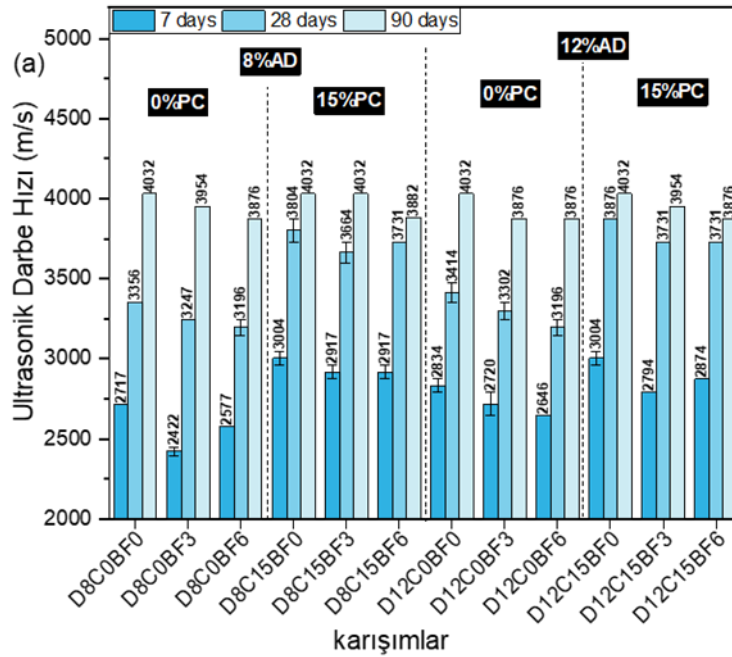


Şekil 6. Eğilme dayanımı sonuçları

5.3. Ultrasonik Ses Hız Ölçümü

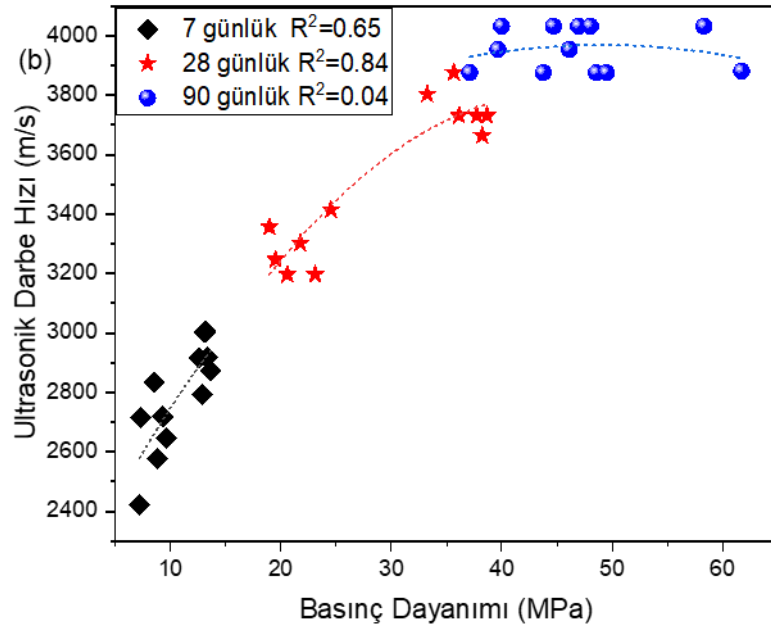
Şekil 7.'de 0 °C sıcaklıkta 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinin ardından, hibrit alkali ile aktive edilmiş cüruf/Portland çimentosu esaslı harçların ultrasonik nabız hızı (UPV) performansını göstermektedir. Bu yöntem, karışım içi homojenlik, mikro yapı yoğunluğu ve süreksizliklerin tespit edilmesine olanak sağlayan tahribatsız bir testtir. Elde edilen sonuçlar, hem bağlayıcı bileşimi hem de kür süresinin matris yapısındaki gelişimi doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır. %8 alkali aktivatör dozajında (AD), Portland çimentosu içermeyen karışımlar (%100 granüle yüksek fırın cürufu - YFC), kür süresi boyunca UPV'de istikrarlı bir artış göstermiştir. Bu artış, matrisin giderek daha yoğun bir yapıya ulaşmasını sağlayan sürekli jeopolimerizasyon süreçlerinin bir göstergesidir. Bu bağlamda, 7 günlük kür süresi sonunda, %0, %0,3 ve %0,6 oranlarında bazalt fiber (BF) içeren karışımlarda sırasıyla 2717, 2422 ve 2577 m/s UPV değerleri elde edilmiştir. 28 gün sonra bu değerler 3356, 3247 ve 3196 m/s'ye yükselmiş; 90. günde ise sırasıyla 4032, 3954 ve 3876 m/s olarak ölçülmüştür. Bu veriler, fiber katkısının erken yaşlarda UPV üzerinde sınırlı bir iyileştirici etki sunduğunu, ancak daha yüksek fiber içeriklerinde UPV değerlerinde hafif bir düşüş gözlemlendiğini göstermektedir. Bu durumun temel nedeni, fiberlerle matris arasındaki arayüzeylerde oluşan boşluklar nedeniyle sistemde meydana gelen ara yüzey porozitesinin artması olabilir. Aynı aktivatör dozajı altında, karışımlara %15 oranında Portland çimentosu (PC) eklendiğinde, her kür yaşında elde edilen UPV değerleri, PC içermeyen eşdeğer karışımlardan daha yüksek çıkmıştır. 7 günlük kür sonunda %0, %0,3 ve %0,6 BF içeren karışımlarda UPV değerleri sırasıyla 3004, 2917 ve 2917 m/s olarak ölçülmüştür. 28 günlük kür süresi sonucunda bu değerler 3804, 3664 ve 3731 m/s'ye yükselmiş ve 90 günlük kür sonrasında ise sırasıyla 4032, 4032 ve 3882 m/s olarak kaydedilmiştir. Bu gelişme, Portland çimentosu hidratasyon ürünleri olan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jelinin, YFC'nin alkali aktivasyonu ile oluşan C-A-S-H jel yapısıyla sinerjik bir etkileşim oluşturarak matrisin sürekliliğini ve yoğunluğunu artırmasına bağlanmaktadır [133]. Özellikle 90. gün itibarıyla, lif ilavesinin UPV üzerinde ek bir gelişme sağlamadığı gözlemlenmiştir. Bu da, belirli bir noktadan sonra fiber takviyesinin ultrasonik tepkiye olumlu katkı sunmadığını ve ultrasonik enerji iletiminde bir doygunluk noktasına ulaşıldığını düşündürmektedir. Daha yüksek bir aktivatör dozajı olan %12 AD koşullarında da benzer genel eğilimler gözlemlenmiştir, ancak bu durumda yapısal gelişim farklı bir seyir izlemiştir. PC içermeyen (%100 YFC) karışımlarda, 7 günlük kür süresi

sonunda UPV değerleri %0, %0,3 ve %0,6 BF için sırasıyla 2834, 2720 ve 2646 m/s olarak belirlenmiştir. 28. günde bu değerler 3414, 3302 ve 3196 m/s'ye yükselmiş ve 90. gün itibarıyla ise sırasıyla 4032, 3876 ve 3876 m/s seviyelerine ulaşmıştır. Bu gelişme, daha yüksek alkali içeriğinin YFC'nin çözünmesini hızlandırarak jel fazlarının daha hızlı oluşmasına olanak tanınmasıyla açıklanabilir. Ancak, bu avantaj zamanla dengelenmiş, özellikle fiber içeren karışımlarda, yüksek alkali konsantrasyonu nedeniyle oluşan mikroyapısal heterojenlikler ve otogen büzülme kaynaklı bozulmalar, UPV'deki ilerlemeyi sınırlandırmıştır. %12 AD içeren ve %15 PC ilave edilmiş karışımlar, erken yaşlarda PC'siz karışımlara kıyasla daha iyi UPV değerleri sunmuştur. 7 günlük kür sonunda %0, %0,3 ve %0,6 BF içeren karışımlarda sırasıyla 3004, 2794 ve 2874 m/s UPV değerleri elde edilmiştir. 28. günde bu değerler sırasıyla 3876, 3731 ve 3731 m/s'ye yükselmiş; 90. gün sonunda ise sırasıyla 4032, 3954 ve 3876 m/s olarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, PC katkısının yüksek alkalilikten kaynaklanan olası olumsuz etkiler karşısında matrisin stabilizasyonuna katkı sunduğunu ve daha sağlıklı mikroyapı oluşumunu teşvik ettiğini göstermektedir. Ancak, %8 AD sistemlerinde olduğu gibi burada da %0,3 BF'nin üzerindeki lif katkısının UPV üzerinde kayda değer bir iyileştirme sağlamadığı ve ultrasonik geçiş yollarını olumsuz etkileyebilecek bir lif eşiği bulunduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 7. Ultrases Hız Ölçüm Grafiği

Bu bulguların yorumlanması, karışımların mikroyapısal gelişim mekanizmalarıyla ilgili önemli eğilimleri ortaya koymaktadır. Kür süresi, tüm karışımlarda baskın bir etki oluşturmuş; zaman ilerledikçe oluşan jel fazları ve azalan porozite, UPV'nin sistematik biçimde artmasını sağlamıştır. YFC'nin kısmen Portland çimentosu ile ikame edilmesi, özellikle erken yaşlarda, hidrasyon sürecinin hızlanması ve oluşan C-S-H jelinin, C-A-S-H yapılarıyla birlikte matris bütünlüğünü artırması sayesinde UPV'de belirgin yükselişlere neden olmuştur. BF ilavesi, başlangıçta yalnızca sınırlı bir katkı sunmuş; daha yüksek oranlarda ise UPV'yi hafifçe azaltmış ya da sabit kalmasına neden olmuştur. Bu durum, liflerin mekanik dayanımı artırmasına rağmen, ultrasonik dalgaların yayılımını engelleyebilecek minör heterojenlikler oluşturduğunu göstermektedir. Ayrıca, yüksek aktivatör dozajı (%12 AD), erken yaşlarda jeopolimerizasyonu hızlandırarak UPV'yi artırmış olsa da, uzun vadede mikro çatlak oluşumu ve alkali kaynaklı porozite artışı gibi olumsuzluklar nedeniyle bu gelişmeyi sınırlamıştır. Bu nedenle, yüksek performanslı hibrit harçlar tasarlanırken, aktivator dozajı, fiber içeriği ve PC oranı arasında dikkatli bir optimizasyon yapılması gerekmektedir. Karışımlarda elde edilen en yüksek UPV değerleri (~4032 m/s), kür süresi ya da lif içeriği fark etmeksizin, PC içeren sistemlerde 90. günde tutarlı biçimde gözlemlenmiştir. Bu bulgu, soğuk kür koşullarında dahi Portland çimentosunun matrisin yoğunlaşmasına ve uzun vadeli yapısal bütünlüğüne olan katkısının altını çizmektedir. Şekil 8, 0 °C'de 7, 28 ve 90 gün kürlenmiş karışımların basınç dayanımı ile ultrasonik nabız hızı (UPV) arasındaki korelasyonu göstermektedir. Bu ilişki, erken yaşlarda güçlü bir pozitif korelasyon sergilemiştir (7. günde $R^2 = 0,65$ ve 28. günde $R^2 = 0,84$); bu durum, matrisin yoğunlaşması ile dayanım ve UPV'nin birlikte artması ile açıklanmaktadır. Ancak 90. günde bu korelasyon önemli ölçüde zayıflamış ($R^2 = 0,04$), bu da mikroyapısal iyileşmelerin ilerleyen yaşlarda, özellikle lif takviyesi yapılan ve yüksek alkali içeren sistemlerde, dayanım artışı ile ultrasonik dalga yayılımı arasındaki doğrudan ilişkiyi ortadan kaldırdığını göstermektedir.



Şekil 8. Ultrases Hız Ölçüm Ve Basınç Dayanım Arasındaki Korelasyon Grafiği

5.4. Sülfirik Asit Etkisi Sonrası Deney Sonuçları

5.4.1. Basınç Dayanımı

Şekil 9, alkali aktivatör dozajlarının (AD) %8 ve %12 Na₂O eşdeğeri olarak bağlayıcı kütlesi başına uygulandığı durumlarda, bazalt fiber (BF) içeriklerinin %0, %0,3 ve %0,6 seviyelerinde değiştirildiği, ayrıca granüle yüksek fırın cürufunun (YFC) bir kısmının %0 ve %15 oranında Portland çimentosu (PC) ile ikame edildiği farklı hibrit alkali-aktivasyonlu harç karışımlarının, 0 °C’de 90 gün süreyle kürlendikten sonra %5’lik sülfirik asit çözeltisinde ilave 90 gün boyunca maruz kalmaları sonucu elde edilen basınç dayanımı değerlerini kapsamlı biçimde göstermektedir. Şekil 9 b ise, bu asit maruziyeti sonrası elde edilen dayanım sonuçlarının, maruziyetten önceki 90 günlük referans basınç dayanımlarıyla karşılaştırılarak, görelî (bağıl) basınç dayanımı değişim oranlarını görsel olarak ifade etmektedir. Bu iki grafik birlikte, asidik çevre koşullarının etkisi altında farklı bağlayıcı sistemlerinin ve takviye seviyelerinin mekanik performans üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde değerlendirme imkânı sunmaktadır. İlk olarak, %8 AD seviyesinde ve hiç Portland çimentosu içermeyen (%100 YFC) karışımlar ele alındığında, %0, %0,3 ve %0,6 oranlarında bazalt fiber içeren örneklerde, sülfirik asit etkisi sonrası sırasıyla %23,0, %37,2 ve %42,7 oranlarında önemli dayanım artışları gözlemlenmiştir. Bu artış, yalnızca

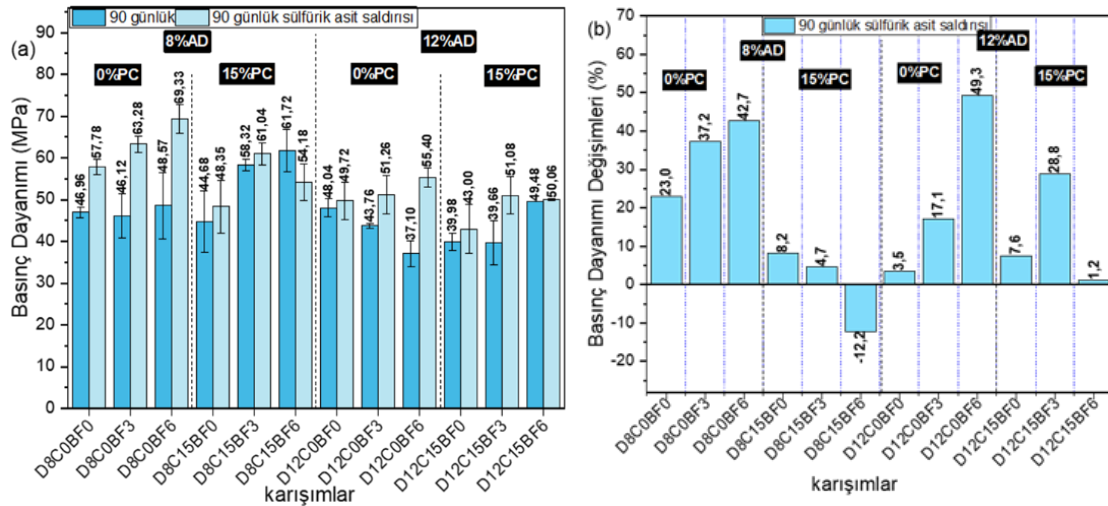
alkali aktivasyonun değil, sülfürik asit etkisiyle tetiklenen ikincil jeopolimerizasyon süreçlerinin matris yapısını daha yoğun ve kompakt hale getirdiğini göstermektedir. Bu süreçlerin etkisiyle oluşan C-A-S-H (kalsiyum-alüminyum-silikat-hidrat) jel fazları, asit ortamlarına karşı yüksek kimyasal direnç gösteren yapılar olup, matrisin hem mekanik bütünlüğünü hem de uzun vadeli dayanım kapasitesini ciddi şekilde artırmıştır. Söz konusu karışımlarda BF oranı arttıkça gözlenen ilave dayanım kazanımı, yalnızca bu kimyasal reaksiyonlara bağlı değildir. Bazalt fiberlerin varlığı, harç içindeki mikro çatlakların etkin şekilde köprülenmesini, gerilme noktalarının yayılımının sınırlandırılmasını ve asidin matrise nüfuz etme yollarının daraltılmasını mümkün kılmıştır. Bu, mikro yapıda porozitenin düşmesi, boşlukların azalması ve matrisin genel sıkılaşması anlamına gelmektedir. Liflerin bu şekilde hem fiziksel engelleyici hem de yapısal bütünlüğü destekleyici çift yönlü rolü, matrisin asit etkilerine karşı daha dirençli hale gelmesini sağlamıştır. Öte yandan, yine %8 AD dozajında, ancak bu kez %15 oranında Portland çimentosu içeren hibrit karışımlarda asit saldırısı sonrasında daha karmaşık ve olumsuz eğilimler gözlemlenmiştir. Bu karışımlarda, %0 BF içeren numunelerde %8,2 oranında, %0,3 BF içerenlerde %4,7 oranında dayanım artışı gözlenmişken, %0,6 BF içeren karışımda ise %12,2 oranında ciddi bir dayanım kaybı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, özellikle yüksek lif içeriği ile birlikte PC katkısının, bazı durumlarda yapısal bozulmayı tetiklediğini göstermektedir. Bu zıt eğilimlerin temel nedeni, PC'nin hidratasyonu sonucu oluşan kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) bileşiğinin, sülfürik asit ortamında kimyasal olarak oldukça zayıf ve tepkimeye açık olmasıdır. Asitle temas eden $\text{Ca}(\text{OH})_2$, hızla çözünerek jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve etrenjit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) gibi hacimce genişleyen, gözenekliliği artıran ve matris iç yapısında iç gerilmeler oluşturan ikincil ürünlere dönüşür. Bu ürünlerin aşırı miktarda birikimi, hem mikro çatlakların gelişmesine hem de liflerin etkili şekilde görev yapamamasına neden olur. Ayrıca, bu genleşme ürünleri fiber-matris arayüzlerinde zayıflık noktaları yaratır ve çatlak ilerlemesini hızlandırabilir. Özellikle yüksek BF içeriğinde (%0,6) görülen dayanım kaybı, bu etkileşimin daha da belirgin hale geldiğini göstermektedir. Liflerin normal şartlarda sunduğu mekanik bağlayıcılık ve çatlak kontrolü avantajları, asit ortamında PC kaynaklı kimyasal bozulmalarla birlikte tam aksine zayıf noktalara dönüşebilmekte, bu da fiber katkısının optimumdan fazla olması durumunda dayanımda azalma yaratmaktadır[134, 135]. Ayrıca, yüksek fiber oranlarında arayüzey boşluklarının ve kusurların oluşması, asidin bu bölgelerden daha kolay nüfuz etmesine yol açarak kimyasal bozulmayı hızlandırmaktadır. %12 AD (alkali aktivatör

dozajı) seviyesinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, Portland çimentosu (PC) içermeyen karışımlar, farklı bazalt fiber (BF) oranlarında belirgin düzeyde basınç dayanımı artışları sergilemiştir. Spesifik olarak; %0, %0,3 ve %0,6 BF içeriğine sahip örneklerde sırasıyla %3,5, %17,1 ve %49,3 oranlarında dayanım artışı kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, yüksek alkali içeriğinin özellikle erken yaşlarda granüle yüksek fırın cürufunun (YFC) çözünmesini büyük ölçüde hızlandırarak, daha fazla miktarda alkali-aktivasyon jeli (özellikle C-A-S-H) oluşumunu teşvik ettiğini ve buna bağlı olarak matrisin yoğunluk ve sıklık düzeyinde artış sağladığını ortaya koymaktadır. Daha kompakt hale gelen bu mikro yapı, dış ortamdan gelen sülfürik asidin penetrasyonunu sınırlayarak, kimyasal bozulma süreçlerine karşı daha etkili bir direnç sunmaktadır. Ancak, %0 ve %0,3 BF içeren numunelerde gözlenen dayanım artışlarının, aynı fiber içeriklerine sahip ancak %8 AD dozajıyla hazırlanmış eşdeğer karışımlara kıyasla daha düşük seviyelerde kalması, bazı önemli mikroyapısal olumsuzluklara işaret etmektedir. Bu durum, yüksek alkali aktivatör dozajının mikro yapı içerisinde fazla miktarda sodyum (Na) içeren C-A-S-H jel fazlarının oluşumuna neden olarak, sistemde kimyasal olarak daha az kararlı ve heterojen yapılar ortaya çıkardığını düşündürmektedir. Bu tür Na-zengin C-A-S-H fazları, asidik ortamlarda Ca-zengin muadillerine göre daha kolay bozulabilir nitelikte olup, uzun vadeli kimyasal direnç üzerinde sınırlayıcı bir etki oluşturabilir. Buna karşın, %0,6 BF içeren ve PC içermeyen karışımda gözlemlenen %49,3'lük olağanüstü dayanım artışı, özellikle dikkat çekicidir. Bu sonuç, yüksek alkali içeriğinin potansiyel olumsuzluklarının, optimum seviyede uygulanan fiber takviyesi ile telafi edilebildiğini açıkça göstermektedir. Liflerin mikro çatlakları köprüleme yeteneği, matris içi boşlukların azalması, asit difüzyon yollarının kısıtlanması ve fiber-matris arayüzündeki mekanik bütünlüğün artması sayesinde, matris dayanıklılığı ve çatlak direnci dramatik biçimde iyileştirilmiştir. Bu, hem fiziksel hem de kimyasal bağlayıcılık yönünden BF katkısının sistem üzerinde çok katmanlı bir iyileştirici etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Diğer taraftan, aynı %12 AD seviyesinde fakat %15 PC içeren karışımlarda, dayanım gelişmeleri daha karmaşık bir tablo ortaya koymuştur. Lif içeriğine bağlı olarak, sırasıyla %0 BF ile %7,6, %0,3 BF ile %28,8 ve %0,6 BF ile yalnızca %1,2 oranında dayanım artışları elde edilmiştir. Bu bulgular, PC içeren sistemlerde orta düzeyde fiber ilavesinin (özellikle %0,3 BF) matris üzerinde olumlu bir takviye etkisi oluşturduğunu ve PC'nin getirdiği kimyasal zayıflıkları kısmen dengeleyebildiğini göstermektedir. Ancak, %0,6 BF içeriğindeki oldukça düşük dayanım artışı, aşırı miktarda fiber kullanımının mikro yapısal süreksizlikler ve yerel

zayıflık bölgeleri yarattığını, bu durumun ise matrisin kimyasal ve mekanik bütünlüğünü zedeleyerek asit saldırılarına karşı direncini ciddi şekilde düşürdüğünü göstermektedir. Bu veriler, fiber içeriğinin asit dayanımı üzerindeki kritik rolünü açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle orta düzeyde BF kullanımı, mikro çatlakların etkili şekilde köprülenmesi, porozitenin azalması ve dış ortamdan gelen asitlerin matrise girişinin engellenmesi yoluyla matrisin bütünlüğünü ve uzun vadeli performansını anlamlı biçimde güçlendirmektedir. Öte yandan, lif oranının aşırı yükseltilmesi, harç içerisinde fiber birikimi ve düzensiz dağılım gibi olumsuzluklara yol açarak, mikro ölçekte boşluk ve süreksizliklerin oluşmasına, bu da lokal zayıflık merkezleri aracılığıyla asit bozulmasının başlatılmasına neden olmaktadır. Portland çimentosu içeriğinin etkisi ise çift yönlü bir yapıya sahiptir. Bir yandan, PC katkısı sayesinde erken yaşta C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) jellerinin hızlı biçimde oluşumu teşvik edilmekte ve bu durum kısa vadede dayanım kazanımına katkı sağlamaktadır. Diğer yandan, PC hidratasyonunun bir yan ürünü olan kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2), sülfürik asit gibi güçlü asitlerle kimyasal reaksiyona girerek jips ve etrenjit gibi genişleyen ve zararlı ikincil ürünlerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu ürünler zamanla matriste hacimsel artış, çatlak oluşumu ve iç gerilim gelişimi gibi bozulma mekanizmalarını tetiklemektedir. Özellikle uzun süreli maruziyet koşullarında, Ca(OH)_2 'nin varlığı, sistemin kimyasal stabilitesini ciddi ölçüde zayıflatmakta ve PC içeren karışımların uzun dönemli asit dayanımı açısından zayıf performans göstermesine yol açmaktadır [134]. Alkali aktivatör dozajının artırılmasının (örneğin %8'den %12'ye yükseltilmesi), özellikle soğuk kürlleme koşulları altında hazırlanan alkali-aktif harç sistemlerinde, erken yaşlarda jeopolimerizasyon kinetiğini hızlandırdığı ve bu sayede C-A-S-H (kalsiyum-alüminyum-silikat-hidrat) jel oluşumunu yoğunlaştırdığı belirlenmiştir. Bu daha yoğun ve bağlantılı jel ağı, başlangıçta matrisin daha az gözenekli ve daha homojen hale gelmesini sağlayarak, asidin penetrasyon yollarını sınırlar ve asit saldırısına karşı mekanik koruma katmanı oluşturur. Bu etkinin sonucunda, kısa vadeli asit dayanımı üzerinde ılımlı düzeyde olumlu bir etki gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, alkali aktivatör oranının aşırı yüksek seviyelere çıkarılması, yalnızca erken yaş dayanımı artırmakla kalmayıp aynı zamanda reaksiyon ortamında sodyum (Na) içeriği yüksek olan ikincil fazların oluşmasına da neden olabilmektedir. Bu fazlar çoğunlukla Na-zengin C-A-S-H türevleri veya N-A-S-H (sodyum-alüminyum-silikat-hidrat) jel yapıları olarak tanımlanmakta olup, asit ortamında çözünürlüğü yüksek, kimyasal stabilitesi düşük ve bağlayıcılık kapasitesi zayıf bileşenlerdir. Bu nedenle, uzun vadeli dayanım üzerinde

potansiyel olarak olumsuz etkiler oluşturabilirler. Ayrıca, yüksek alkali dozajı, mikroyapısal homojenliği bozarak lokal alkali birikimlerine ve heterojen faz ayrışmalarına neden olabilir. Bu da, özellikle fiber içermeyen sistemlerde, çatlak oluşumuna yatkın mikro bölgeler yaratarak dayanım kaybını hızlandırabilir. Bu veriler ışığında, alkali aktivatör dozajının dikkatli şekilde optimize edilmesi, yalnızca hızlı aktivasyonun ve erken yaş dayanımının sağlanması açısından değil, aynı zamanda servis süresi boyunca kararlı mikro yapının korunması açısından da büyük önem taşımaktadır. Optimal aktivatör miktarı, erken reaktivite ile uzun vadeli kimyasal dayanıklılık arasında dengeli bir ilişki kurularak belirlenmelidir. Aksi takdirde, ilk etapta elde edilen yüksek mekanik performans, zamanla kimyasal bozulma, asit çözünmesi ve mikroyapısal zayıflama gibi olumsuzluklarla hızla kaybedilebilir. Öte yandan, çalışmada elde edilen önemli bir bulgu da, sülfürik asit maruziyetinin, özellikle Portland çimentosu (PC) içermeyen sistemlerde matris içi kimyasal evrimi tetikleyerek ilave jeopolimerizasyonu desteklemesidir. Bu durum, asidin sadece tahrip edici bir unsur olmanın ötesinde, düşük kalsiyumlu sistemlerde reaktif amorf fazları harekete geçirerek ikincil jel oluşumunu teşvik edebileceğini ortaya koymaktadır. Asidin bu şekilde jeopolimerizasyonu yeniden aktive etmesi, matrisin gözenek yapısında kısmi kapanmalara, mikro çatlakların iyileştirilmesine ve sistem içi yeniden yapılandırmalara yol açabilir. Bu da, iyi tasarlanmış ve optimize edilmiş alkali-aktive bağlayıcı sistemlerin, yalnızca agresif çevresel koşullara karşı dayanıklı olmakla kalmayıp, aynı zamanda bu koşullara maruz kaldıkça kendi kimyasal yapılarını evrimleştirme potansiyeline sahip olduklarını göstermektedir. Başka bir deyişle, bu tür sistemler belirli sınırlar dahilinde "reaktif uyarlanabilirlik" sergileyebilir; yani zamanla daha dayanıklı hale gelerek servis ömürlerini uzatabilirler. Bu durum, özellikle PC içermeyen, optimal alkali ve fiber içerikli alkali-aktive harçların, zorlu koşullar altındaki altyapı uygulamaları, atık su tesisleri, kimyasal endüstri zeminleri gibi ortamlarda kullanılmaları için önemli bir stratejik avantaj sunduğunu göstermektedir [136]. Tüm karışımlar arasında, %8 AD ve %0,6 BF içeren PC içermeyen harç, sülfürik asit maruziyeti sonrası en belirgin dayanım artışını sergileyerek, matriks yoğunlaşması, çatlak direnci ve kimyasal stabilite arasında ideal bir denge sağlamıştır. Bu da, uygun dozda fiber takviyesi yapılmış tamamen alkali-aktivasyonlu sistemlerin, Portland çimento içeren hibrit sistemlere kıyasla aşırı agresif ortamlarda uzun dönem dayanıklılık ve mekanik performans açısından üstünlük sağladığını ortaya koymaktadır. Bu bulgular, fiber içeriği, aktivatör dozajı ve PC ikame seviyesinin dikkatle kontrol edilmesinin, alkali-aktivasyonlu harçların agresif ortam şartları için

tasarlanırken hem mekanik dayanıklılığını hem de kimyasal direncini maksimize etmek için ne denli önemli olduğunu vurgulamaktadır.



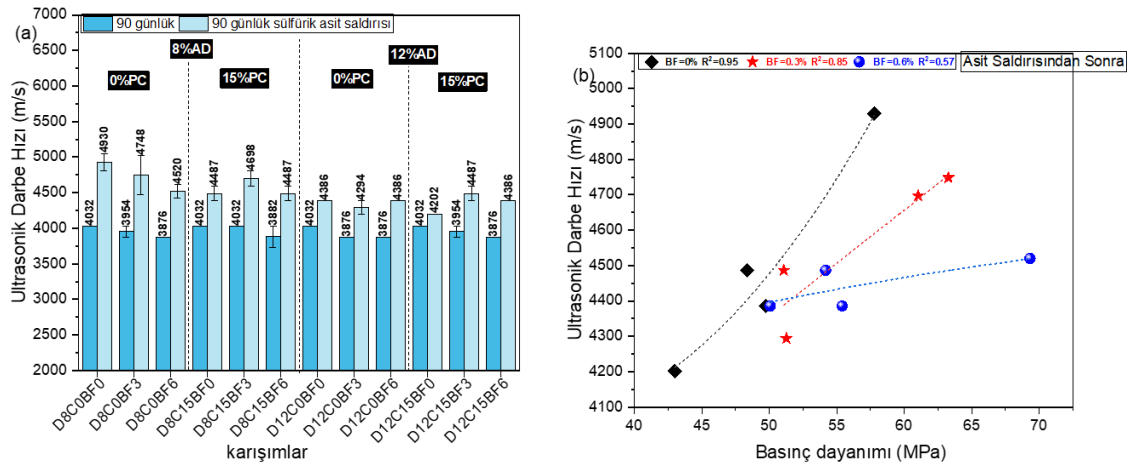
Şekil 9. a) 90 günlük Sulfirik asit Etkisi Sonrası Basınç Dayanımı b-) SES Sonrası Basınç Dayanım Değişimi

5.4.2. Ultrasonik Hız Ölçümü (UPV)

Şekil 10 a, hibrit alkali-aktivasyonlu cüruf/Portland çimentosu (PC) harçlarının 0 °C'de 90 gün kürlendikten sonra ve ardından 5% sülfirik asit ortamına 90 gün boyunca maruz kalmaları sonrası ultrasonik ses hızlarını (UPV) göstermektedir. Ultrasonik pulse hızı, malzemenin iç yapısal dayanıklılığı, yoğunluğu ve homojenliği hakkında önemli bilgiler sunan, malzemenin içinden geçen elastik dalgaların hızını ölçen nondestrüktif bir test yöntemidir. Bu test, özellikle harç ve beton gibi gözenekli ve heterojen yapıların mekanik özelliklerini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. UPV sonuçları, mikro yapısal gelişimlerin yanı sıra, asit gibi agresif kimyasal etkenlerin malzeme üzerindeki etkilerini incelemek için oldukça faydalıdır. %8 AD dozunda, PC içermeyen (%100 YFC) karışımlar, 0 °C'de 90 gün kürlendikten sonra %0, %0,3 ve %0,6 BF içeriklerinde sırasıyla 4032, 3954 ve 3876 m/s UPV değerleri göstermiştir. Bu değerler, düşük sıcaklıkta kütleme sonrasında gelişen görece homojen ve kompakt mikro yapıyı yansıtmaktadır. Ardından, asit maruziyeti sonrasında UPV değerleri önemli ölçüde artarak sırasıyla 4930, 4748 ve 4520 m/s'ye yükselmiştir. Bu artış, sülfirik asit etkisi altında matriks içindeki ikincil jel oluşumlarının devam ettiğini ve bunun sonucunda matriks yoğunluğunun ve faz

sürekliliğinin arttığını göstermektedir. İkincil jel fazlarının başlıca C-A-S-H (kalsiyum-alüminyum-silikat-hidrat) ve benzeri yapılar olduğu bilinmekte olup, bunlar kimyasal dayanıklılık ve mekanik bütünlük açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle daha yüksek fiber içeriklerine sahip karışımlarda gözlenen belirgin UPV artışı, bazalt fiberlerin (BF) sadece mekanik çatlak direncini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda asit saldırısına bağlı kimyasal bozunmayı da engelleyerek ultrasonik dalga iletimini desteklediğini ortaya koymaktadır. Bazalt fiberler, matriks içinde mikro çatlakların köprülenmesi ve kapanmasında önemli rol oynar. Bu sayede, ultrasonik dalgaların yayılım yolu sürekliliği korunur, böylece UPV değerleri artar. Ayrıca, fiberlerin yüksek elastik modülü ve kimyasal dirençleri, özellikle asitli ortamlarda malzemenin dayanıklılığını artıran önemli faktörlerdendir. %8 AD dozajında ve %15 PC içeren karışımlarda ise, başlangıç UPV değerleri %0, %0,3 ve %0,6 BF seviyelerinde sırasıyla 4032, 4032 ve 3882 m/s olarak ölçülmüştür. Asit maruziyeti sonrası bu değerler sırasıyla 4487, 4698 ve 4487 m/s'ye yükselmiştir. Her ne kadar genel olarak UPV artışı gözlenmiş olsa da, PC içeren karışımların UPV değerlerindeki artış, PC içermeyenlere kıyasla daha sınırlıdır. Bunun nedeni, Portland çimentosunun hidratasyonu sonucu oluşan kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) sülfürik asitle reaksiyona girerek jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve etrengit gibi genişleyen ürünler oluşturmaktır. Bu genişleyen fazlar matriks içinde gerilme ve mikro çatlaklara yol açarak yapının sürekliliğini bozar. Bu kimyasal bozunmalar, ultrasonik dalgaların yayılımını olumsuz etkileyerek UPV artışını sınırlar ve mekanik dayanımı da azaltır [136, 137]. Bu durum, PC katkısının asit ortamında uzun vadede yapısal bütünlüğü zayıflatabileceğini göstermektedir. %12 AD dozunda PC içermeyen karışımlar, 0%, 0,3% ve 0,6% BF seviyelerinde sırasıyla 4032, 3876 ve 3876 m/s UPV değerleri göstermiştir. Asit maruziyeti sonrası bu değerler sırasıyla 4386, 4294 ve 4386 m/s'ye yükselmiştir. UPV artışı belirgin olmasına rağmen, %8 AD dozajındaki karışımlara göre daha düşüktür. Bu da yüksek alkali dozlarının matrikste mikro yapısal heterojenliklere neden olabileceğini ve böylece asit maruziyeti sırasında matriksin yoğunlaşmasını sınırladığını düşündürmektedir. Yüksek alkali konsantrasyonları, alkali zengin ikincil fazların (örneğin Na-zengin C-A-S-H jel) oluşumuna yol açabilir. Bu fazlar tipik C-A-S-H jellerine kıyasla daha düşük kimyasal stabiliteye sahip olabilir, dolayısıyla ultrasonik dalga iletimi üzerindeki olumlu etkileri sınırlanır. Aynı koşullarda %15 PC içeren karışımların başlangıç UPV değerleri sırasıyla 4032, 3954 ve 3876 m/s olup, asit maruziyeti sonrası 4202, 4487 ve 4386 m/s'ye yükselmiştir. Burada, %0,3 BF içeren karışım en yüksek UPV artışını

göstermiştir. Bu durum, orta derecede fiber takviyesinin hibrit sistemlerde bile çatlak kontrolünü ve jel sürekliliğini artırdığını doğrulamaktadır. Ancak, %0,6 BF içeren karışımlardaki UPV artışının görece düşük olması, PC içeren matrislerde aşırı fiber kullanımının lokal matriks kusurlarına neden olarak asit maruziyeti altındaki ikincil yoğunlaşmanın faydasını azalttığını göstermektedir. Fiberlerin yoğunluğu arttıkça, fiber-matriks ara yüzeylerinde boşluklar ve mikro yapısal heterojenlikler ortaya çıkabilir; bu da ultrasonik dalga yayılımını olumsuz etkiler. Genel olarak, sülfürik asit maruziyeti, özellikle PC içermeyen ve optimize edilmiş fiber içerikli hibrit alkali-aktivasyonlu harçların UPV değerlerini artırmıştır. Bu artış, devam eden jeopolimerizasyon reaksiyonları, ikincil jel büyümesi ve asit kaynaklı gözenek küçülmesi gibi mikro yapısal değişimlerin sonucudur. Bu süreçler, faz sürekliliğini artırmakta ve elastik özellikleri iyileştirmektedir. Öte yandan, PC içeren sistemlerde asidin tetiklediği jips oluşumu ve mikro çatlaklanma gibi lokalize bozulmalar, tam matriks yoğunlaşmasını engelleyerek UPV artışını sınırlar. Ayrıca, daha yüksek alkali dozajları, agresif asit ortamında daha az stabil jel fazlarının oluşumunu teşvik ettiğinden UPV iyileşmesini azaltır. Bu nedenle, optimum mekanik dayanım ve ultrasonik hız artışı için aktivatör dozu, PC içeriği ve fiber takviyesinin dikkatle dengelenmesi gerekir. Bu kapsamda, orta doz alkali ve kontrollü fiber içeriğine sahip PC içermeyen matrisler, uzun vadeli asidik saldırılara karşı en uygun performansı göstermiştir. Şekil 10 b, sülfürik asit maruziyetinden sonra hibrit karışımların basınç dayanımı ile UPV arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bazalt fiber içermeyen karışımlarda (%0 BF) güçlü pozitif bir korelasyon ($R^2 = 0,95$) ve %0,3 BF içeriğinde de yüksek bir korelasyon ($R^2 = 0,85$) bulunmuştur. Bu, asit maruziyetinin matriks yoğunlaşmasını teşvik ederek mekanik ve elastik yanıtları güçlendirdiğini göstermektedir. Ancak %0,6 BF içeriğinde korelasyonun zayıflaması ($R^2 = 0,57$), aşırı fiber eklemesinin mikro yapısal heterojenliklere yol açtığını ve dayanım gelişimi ile ultrasonik dalga yayılımı arasındaki doğrudan ilişkiyi bozduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, aşırı fiber kullanımının yarattığı boşluk ve heterojenliklerin, ultrasonik testlerin mekanik dayanımla birebir örtüşmesini engellediğini işaret eder. Bu da, fiber dozajının dikkatle kontrol edilmesi gerektiğini vurgular.



Şekil 10. a) 90 gün kürlenme sonrası ve ardından 90 gün sülfürik asit ortamına maruziyet sonrası Ultrasonik Pulse Hızı (UPV) sonuçları. b) Sülfürik asit maruziyetinden sonra basınç dayanımı ile UPV arasındaki ilişki grafiği.

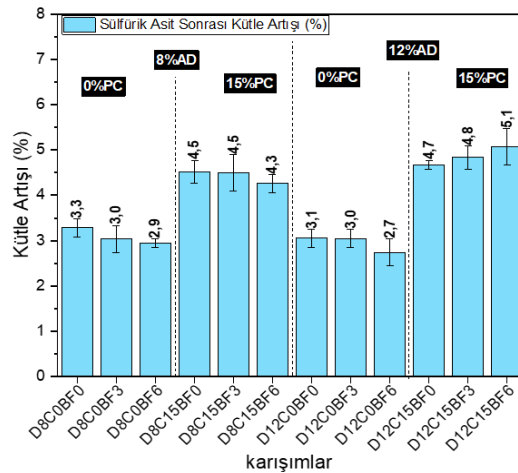
5.4.3. Kütle Artışı

Şekil 11, hibrit alkali-aktif sistemlerin, yani granüle yüksek fırın cürufu (YFC) ve Portland çimentosu (PC) bileşiminden oluşan harçların, %5 derişime sahip sülfürik asit çözeltisine 90 gün boyunca maruz bırakılması sonucunda oluşan kütle artış oranlarını ayrıntılı bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu deneysel bulgular, yalnızca sayısal değerler sunmakla kalmayıp, aynı zamanda harç sistemlerinin kimyasal çevresel dayanıklılığı açısından nasıl performans gösterdiğini anlamaya yönelik kapsamlı bilgiler de sunmaktadır. Özellikle alkali aktivatör dozajı (AD), bağlayıcı bileşimindeki PC oranı ve kullanılan bazalt fiber (BF) miktarının bu tür agresif ortamlarda mikro yapı stabilitesi ve dayanıklılık üzerindeki etkilerinin çok boyutlu olarak değerlendirilmesi açısından son derece değerli sonuçlar elde edilmiştir. İlk değerlendirme, 8% alkali aktivatör dozajı (Na_2O eşdeğeri) ile aktive edilen ve tamamen Portland çimentosu içermeyen (%100 YFC bazlı) harç karışımlarına odaklanmıştır. Bu karışımlar, 0%, 0,3% ve 0,6% bazalt fiber oranları ile çeşitlendirilmiş ve her bir karışım için sülfürik asit ortamında 90 gün sonunda oluşan kütle artışları sırasıyla %3,3, %3,0 ve %2,9 olarak tespit edilmiştir. Bu bulgular, sülfürik asidin harç matrisine sınırlı düzeyde nüfuz ettiğini ve reaksiyon ürünlerinin oluşumuna bağlı kütle kazancının düşük seviyelerde gerçekleştiğini göstermektedir. Söz konusu düşük kütle artışı oranları, YFC bazlı alkali-aktif sistemlerin kimyasal olarak yüksek stabiliteye sahip olduklarını, özellikle de asidik ortamlarda bile bozulmaya karşı dirençli bir yapı

sergilediklerini ortaya koymaktadır. Bu dirençlilik, esasen, YFC'nin aktivasyonu sonucu meydana gelen ve kimyasal olarak kararlı bir bağlayıcı faz olan kalsiyum-alüminyum-silikat-hidrat (C-A-S-H) jellerinin matris içinde etkin şekilde oluşmasından kaynaklanmaktadır. Bu C-A-S-H fazları, harç içindeki boşlukları doldurarak mikro yapının yoğunlaşmasını sağlamakta ve asidik çözeltilerin matris içine sızmasını sınırlamaktadır. Dahası, fiber içeriğinin artırılmasıyla birlikte kütle artışında meydana gelen hafif düşüş, bazalt fiberlerin mikro çatlak oluşumunu engelleyici etkisini ve matris içinde çatlaksız, kompakt bir mikro yapı oluşumuna katkı sağladığını göstermektedir. Liflerin bu çatlak köprüleme işlevi sayesinde, hem asit nüfuzu azalmakta hem de reaksiyon ürünlerinin gözenekli bölgelerde birikimi sınırlanmakta, dolayısıyla kütle kazanımı minimum seviyelerde tutulmaktadır. Bu durum, yalnızca fiziksel bir engelleme değil, aynı zamanda mikro yapının mekanik bütünlüğünü koruyan yapısal bir katkı olarak değerlendirilmektedir. Lifli sistemlerde gözlenen bu avantaj, agresif kimyasal ortamlara karşı tasarlanan alkali-aktif sistemlerin performansını artırmak için önemli bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Diğer yandan, aynı alkali aktivatör dozajında, yani %8 Na₂O eşdeğerinde AD (alkali aktivatör dozajı) ve aynı oranlarda bazalt fiber katkısıyla hazırlanan karışımların içeriğine bu kez %15 oranında Portland çimentosu (PC) dahil edilmiştir. Bu PC içeren karışımların 90 gün süresince %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılmasının ardından gerçekleştirilen ölçümlerde, elde edilen kütle artış oranları sırasıyla %4,5, %4,5 ve %4,3 olarak kaydedilmiştir. Bu değerler, PC içermeyen karşıt gruplara kıyasla belirgin biçimde daha yüksek olup, Portland çimentosunun hibrit alkali-aktif sistemlere eklenmesinin kimyasal dayanıklılık açısından olumsuz etkiler doğurduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu negatif etki, esas olarak Portland çimentosunun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksit (Ca(OH)₂) bileşiğiyle doğrudan ilişkilidir. Sülfürik asit gibi güçlü bir asit çözeltisiyle temas ettiğinde, bu bileşik kolayca reaksiyona girerek kimyasal olarak daha hacimli, genleşen ve düşük dayanıklılığa sahip ikincil ürünlerin oluşmasına yol açar. Söz konusu ikincil ürünler arasında en önemlileri jips (CaSO₄·2H₂O) ve ettringit (Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂·26H₂O) olarak tanımlanır. Bu bileşikler, kimyasal reaksiyonlar sonucunda harç matrisinde birikerek hacimsel artışlara, iç gerilmelere, mikro çatlakların oluşumuna ve nihayetinde matrisin mikro yapısal bütünlüğünün bozulmasına neden olurlar. Özellikle jips oluşumu, sülfürik asidin kalsiyum içeriği yüksek bölgelerle temas etmesiyle başlar ve gözenekli yapının içinde daha önce bulunmayan kristalin fazlar meydana getirir. Bu yeni oluşan fazlar, mevcut matrisin mikroyapısında ekstra yükler ve

genleşmeler oluşturarak çatlakların başlangıç noktalarını teşkil eder. Benzer şekilde, ettringit kristalleri de sülfat iyonlarının alüminyum içerikli C-A-S-H ya da C-S-H jel fazlarıyla reaksiyona girmesi sonucu oluşur ve yine hacimsel olarak büyüyen, gözenekleri genişleten ve iç basınç oluşturan yapılar olarak tanımlanır. Bu süreçler, özellikle suya doygun, düşük pH'lı ortamlar altında daha da hız kazanır ve harç sisteminin bütünlüğünü zamanla zayıflatır [136-138]. Ayrıca, PC varlığı, kimyasal reaksiyonların kinetiğini hızlandırarak asidin matrise daha kolay nüfuz etmesine imkan sağlamaktadır. Alkali aktivatör dozajı 12% AD seviyesine çıkarıldığında ise, PC içermeyen karışımlarda kütle artışları biraz daha düşmüştür; 0%, 0,3% ve 0,6% BF oranlarında sırasıyla %3,1, %3,0 ve %2,7 olarak ölçülmüştür. Bu veriler, yüksek alkali konsantrasyonunun daha yoğun ve sıkışık bir matris oluşturduğunu, böylece açık gözenek hacminin azaldığını ve dolayısıyla asit penetrasyonunun kısıtlandığını göstermektedir. Daha yoğun mikro yapı, asidin harca girişini zorlaştırarak ikincil genleşen ürünlerin oluşumunu sınırlar ve böylece kütle artışını azaltır. Ancak, kütle artışındaki bu azalma, aşırı alkali aktivatör kullanımının kimyasal dayanıklılık üzerinde sınırsız bir olumlu etkisi olmadığını da ortaya koymaktadır. Bu noktada, yüksek alkali konsantrasyonunun mikroyapısal homojenliği bozabilecek heterojen fazların oluşumunu tetikleyebileceği ve bunun da kimyasal stabiliteyi olumsuz etkileyebileceği belirtilmelidir. Aynı dozaj ve PC katkısına sahip (%15 PC, 12% AD) karışımlar ise kütle artışında tüm gruplar arasında en yüksek değerleri vermiştir: %4,7, %4,8 ve %5,1 olarak sıralanmıştır. Bu sonuç, PC'nin ve yüksek lif oranlarının birlikte matris içinde geçirgenliği artırarak asidin daha derinlere nüfuz etmesini kolaylaştırdığını, böylece kütle artışına sebep olan ikincil ürünlerin yoğunluğunu artırdığını göstermektedir. Ayrıca, liflerin aşırı miktarda kullanılması, matris içinde mikroyapısal zayıflıklar, boşluklar ve çatlaklar oluşturabilir; bu da asit penetrasyonunu daha da kolaylaştırır. Bu artan geçirgenlik, agresif kimyasal ortama maruz kalan harcın dayanıklılığını olumsuz etkileyerek kütlede belirgin artışlar ile kendini gösterir. Uzun vadede, bu durum iç yapıda ilerleyici hasar mekanizmalarının (örneğin Ca(OH)_2 'nin çözünmesi ve jips oluşumu) gelişimine yol açar [139]. Bu veriler ışığında, kütle artışının doğrudan harçların kimyasal bileşimi ve mikro yapısal özelliklerinden etkilendiği net şekilde ortaya çıkmaktadır. PC içermeyen alkali-aktif karışımlar, kimyasal olarak stabil C-A-S-H jellerinin baskınlığı sayesinde agresif asit ortamlarında daha dayanıklıdır ve kütle artışı minimize edilmiştir[140]. Buna karşılık, PC katkısı, özellikle Ca(OH)_2 içeriğinin artması nedeniyle, asit saldırısına karşı zayıflık oluşturarak kütle artışına sebep olan ikincil ürünlerin yoğun

bir şekilde oluşmasını tetikler. Ayrıca, lif içeriğinin optimum seviyede tutulması, özellikle PC içermeyen karışımlarda, matrisin dayanıklılığını artırırken, yüksek lif dozları özellikle PC içeren sistemlerde geçirgenliği artırarak olumsuz etki yaratmaktadır. Öte yandan, alkali aktivatör dozajının artırılması, erken dönemde mikro yapı sıkışmasını ve dolayısıyla asit penetrasyonuna karşı bariyer etkisini iyileştirse de, uzun süreli asit maruziyetinde PC kaynaklı zayıflıkları gidermeye yetmemektedir. Bu nedenle, agresif ortam koşullarına dayanıklı harç sistemleri tasarlanırken, alkali dozajı, PC miktarı ve lif katkısı dikkatlice optimize edilmelidir. Sonuç olarak, en ideal performansın, orta doz alkali aktivatör içeren, PC katkısı olmayan ve kontrollü miktarda lif ilavesi yapılan saf alkali-aktif harçlarda sağlandığı görülmektedir. Bu tür sistemler, kimyasal dayanıklılığı maksimize ederken, uzun vadede kütle artışını ve dolayısıyla iç yapısal bozulmayı minimuma indirmektedir. Agresif asit koşullarında güvenilir ve dayanıklı yapılar için bu parametrelerin hassas ayarlanması büyük önem taşımaktadır.



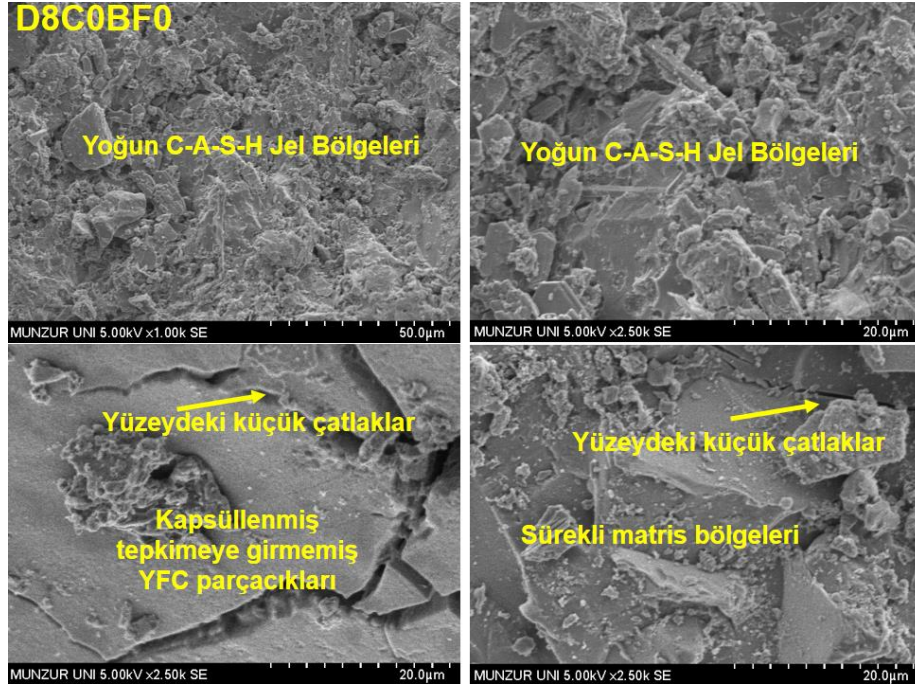
Şekil 11. 90 Günlük Sülfürik Asit Maruziyeti Sonrası Kütle Artışlar

5.4.4. Sülfürik Asit Saldırısı Sonrası SEM Gözlemleri

D8C0BF0 karışımının asit saldırısı sonrası SEM gözlemleri, %8 alkali aktivatör dozajı (Na_2O eşdeğeri) ile aktive edilmiş, %100 yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılarak (yani %0 oranında Portland çimentosu (PC) ikamesi ve bazalt lifi (BF) içermeyen (%0 BF) üretilmiş olan D8C0BF0 karışımının, 90 gün boyunca sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılması sonrası elde edilen SEM görüntüleri (Şekil 12), oldukça yoğun ve tutarlı bir matris mikroyapısı ortaya koymaktadır. Bu mikroyapısal yapı, asit saldırısının ardından bile

sağlamlığını büyük ölçüde korumuş, çökme veya dağılma belirtileri göstermemiştir. Yüzeylerde gözlemlenen kompakt ve iç içe geçmiş jel fazları, sınırlı düzeyde görülebilen porozite ile birlikte, matrisin zamanla belirgin şekilde yoğunlaştığını ve asidik ortamda ikincil jel oluşumlarının meydana geldiğini açıkça göstermektedir[141]. Bu gözlemler, asit maruziyeti sırasında matrisin içinde hala mevcut olan reaktif türlerin, devam eden geopolymerizasyon reaksiyonlarını desteklediğini ve bunun sonucunda ek C-A-S-H (kalsiyum-alüminyum-silikat-hidrat) jel fazlarının oluştuğunu düşündürmektedir. Bu ikincil jel fazları, mikro gözenekleri doldurarak matrisin gözeneklilik seviyesini düşürmekte, porlar arası bağlantıyı zayıflatmakta ve bu sayede hem su geçirgenliğini azaltmakta hem de mekanik dayanımı önemli ölçüde artırmaktadır. Ortaya çıkan bu mikroyapısal sıkılaşma, yalnızca kimyasal dayanıklılığı değil, aynı zamanda uzun süreli mekanik stabiliteyi de desteklemektedir. Elde edilen bu yoğun ve homojen mikroyapı, numunenin 90 günlük asit saldırısından sonra elde edilen yüksek basınç dayanımı (57,78 MPa) ile birebir örtüşmekte ve karışımın agresif kimyasal koşullara karşı gösterdiği olağanüstü dayanımı doğrulamaktadır. Bu yüksek dayanım, matriste meydana gelen faydalı mikroyapısal evrimlerin, makroskobik mekanik performansa doğrudan yansıdığını ortaya koymaktadır. Daha düşük büyütmede (yaklaşık 50 µm ölçeğinde), elde edilen SEM görüntüleri, matrisin büyük ölçüde sürekliliğini koruduğunu ve yaygın kimyasal bozulma belirtilerine rastlanmadığını göstermektedir. Bu ölçekte, çökme, ayrışma, büyük gözenek oluşumu veya yüzeyde pullanma gibi yaygın asit etkisi bulguları gözlenmemektedir. Bu durum, Portland çimentosu türevli kalsiyum hidroksit içermeyen, tamamen YFC bazlı bir bağlayıcı sistemin, asit saldırılarına karşı oldukça dirençli olduğunu ortaya koymaktadır[141]. Numaralı çalışmada belirtildiği gibi, PC içeren sistemlerde sıkça rastlanan jips ve etrenjit gibi genleşen reaksiyon ürünlerinin oluşumu, çatlak oluşumuna ve matrisin parçalanmasına neden olurken; burada gözlenen yapı, bu tür zararlı ürünlerin oluşumunu büyük ölçüde engellemektedir. Ayrıca, geniş çaplı mikro çatlaklara veya büyük boşluklara rastlanmaması, C-A-S-H jel ağının dayanıklılığını ve sürekliliğini koruduğunu göstermektedir. Bu durum, matrisin yapısal bütünlüğünü sürdürdüğünü ve mekanik olarak çözülmediğini doğrulamaktadır. 50 µm seviyesindeki düzgün ve nispeten pürüzsüz yüzey dokusu, matrisin büyük ölçüde jel fazları tarafından domine edildiğini, zayıf bağlı veya tepkimeye girmemiş partiküllerin bu yapıda önemli bir yer kaplamadığını ortaya koymaktadır. Daha yüksek büyütmelerde (yaklaşık 20 µm ölçeğinde) ise, mikroyapıda bazı küçük yüzey çatlakları ve yerel düzeyde mikro kusurlar gözlenmiştir. Ancak bu çatlaklar

genellikle dar, süreksiz ve düzensiz biçimde dağılmıştır. Bu sınırlı çatlak gelişimi, asit etkisiyle ortaya çıkan hacim değişimleri veya kurumaya bağlı iç gerilmelerin, matrisin genel mekanik yapısını bozacak ölçüde yaygın çatlaklara neden olmadığını göstermektedir. Çatlakların bağlantılı yollar oluşturmaması, asit geçişinin büyük ölçüde engellendiğini ve matrisin geçirimsizliğini koruduğunu desteklemektedir. Yoğun jel kümeleri olarak tanımlanan bölgeler, yüksek kimyasal etkileşim alanlarını temsil etmektedir. Bu alanlarda, asit saldırısı sırasında YFC partiküllerinin çözünmeye devam ettiği, çözeltideki iyonların yeniden çökelerek yeni jel fazlarını oluşturduğu anlaşılmaktadır. Bu süreç, mikroyapının daha da yoğunlaşmasına katkı sağlamıştır. Jel matrisinin içine gömülmüş, kısmen tepkimeye girmiş YFC partiküllerinin varlığı ise, her ne kadar bazı artık cüruf taneleri reaktif kalmış olsa da, bu parçacıkların kararlı ve koruyucu jel fazları tarafından çevrelendiğini ve çevresel etkilerden izole edildiğini göstermektedir. Bu, zamanla gerçekleşebilecek olası bozulmaların büyük ölçüde engellendiğini ortaya koymaktadır. Aynı zamanda, sürekli matris bölgeleri ve yoğun jel fazları, başlangıçtaki alkali aktivasyon sürecinin oldukça başarılı olduğunu ve kimyasal olarak dayanıklı bir bağlayıcı yapı oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Sistemde Portland çimentosu kullanılmaması büyük avantaj sağlamış; çünkü kalsiyum hidroksit gibi asitlere karşı zayıf fazların ortadan kaldırılması, C-A-S-H bazlı jel ağının çevresel etkilere karşı daha stabil kalmasını mümkün kılmıştır. Bu durum, kimyasal dayanımın artmasında temel faktörlerden biridir. Mikroyapı incelemeleri ile mekanik test sonuçları arasında gözle görülür bir tutarlılık bulunmaktadır. Asit maruziyetine rağmen basınç dayanımı yalnızca korunmamış, aynı zamanda matrisin yoğunlaşması sayesinde artmıştır. Bu, harç sisteminin asidik ortamlarda bile zamanla olumlu yapısal değişimler geçirebildiğini göstermektedir. Sonuç olarak, yapılan SEM analizleri, D8C0BF0 karışımının sülfürik asit saldırısı sonrasında da yüksek kimyasal dayanıklılığa ve mekanik bütünlüğe sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Bu üstün performans, yoğun ve birbirine bağlı C-A-S-H jel fazlarının oluşumu, asit ile tepkimeye giren zararlı fazların yok denecek kadar az olması ve etkili çatlak kontrolü sayesinde mümkün olmuştur. Gözlemlenen mikroyapı, sülfürik asit gibi agresif ortamlara karşı üstün dayanım sağlayan, geçirimsiz ve kimyasal olarak kararlı bir matris yapısını temsil etmektedir. Bu da D8C0BF0 karışımını, kimyasal olarak zorlu koşullarda uzun süreli dayanıklılık gerektiren uygulamalar için son derece uygun ve gelecek vadeden bir yapı malzemesi haline getirmektedir.

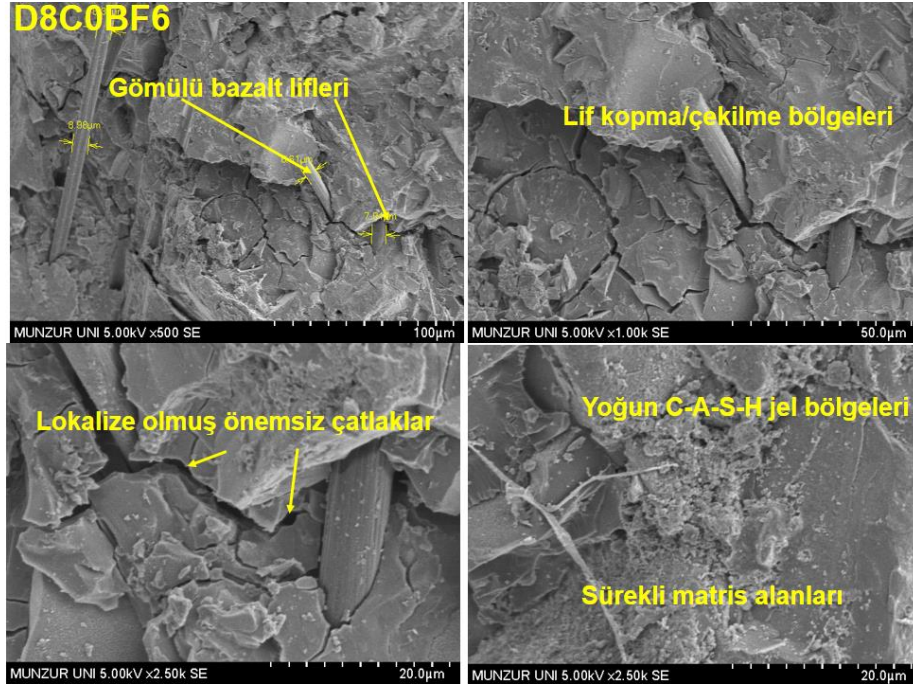


Şekil 12. Sülfürik asit maruziyeti sonrası M1.4D6P0 karışımına ait SEM görüntüsü

D8C0BF6 karışımının sülfürik asit saldırısı sonrası SEM gözlemleri, Bu çalışma kapsamında %8 alkali aktivatör dozajı (Na_2O eşdeğeri) kullanılarak aktive edilmiş, tamamen yüksek fırın cürufuna (YFC) dayalı ve Portland çimentosu (PC) içermeyen bir bağlayıcı sistemi esas alan, ayrıca %0,6 oranında bazalt lifi içeren D8C0BF6 kodlu harç karışımı incelenmiştir. Bu karışım, kimyasal dayanım performansını değerlendirmek üzere 90 gün boyunca sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılmıştır. Bu agresif çevresel koşullar altında elde edilen taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri, numunenin mikroyapısında dikkat çekici değişimlerin meydana geldiğini ve bu değişimlerin dayanım açısından olumlu sonuçlar doğurduğunu göstermektedir. Özellikle görüntüler, mikroyapının oldukça yoğun, sıkı bir biçimde paketlenmiş olduğunu ve bazalt liflerinin matris içinde homojen bir şekilde dağıldığını ortaya koymaktadır (Şekil 13). Bu yapı, hem mikroskobik geçirimsizliği artırmakta hem de çatlak kontrolü yoluyla mekanik dayanımı güçlendirmektedir. Yapılan testler sonucunda, D8C0BF6 karışımı, sülfürik asit saldırısına maruz kalan tüm karışımlar arasında en yüksek basınç dayanımına ulaşmıştır: 69,33 MPa. Bu oldukça yüksek değer, yalnızca dayanım açısından değil, mikroyapısal stabilite açısından da önemli bir bulgudur. Bu sonuç, bazalt liflerinin, özellikle asit gibi agresif ortamlarda bağlayıcı matrisin bütünlüğünü korumada ve çatlak gelişimini sınırlandırmada oynadığı temel rolü vurgulamaktadır. Liflerin çekme dayanımına katkısı ve çatlak

durdurma etkileri sayesinde yapı sistemi, dış etkilere karşı daha dirençli hale gelmiştir. Ayrıca, bu tür liflerin kimyasal kararlılığı, uzun süreli çevresel saldırılarda yapı sisteminin dayanım kaybını minimize etmektedir. Bu bağlamda bazalt lifleri, alkali-aktivasyonlu bağlayıcı sistemlerde yalnızca takviye elemanı değil, aynı zamanda reaksiyon zonlarının stabilizasyonuna katkı sunan mikroyapı bileşenleri olarak da değerlendirilebilir. SEM analizinde kullanılan daha düşük büyütme ölçekleri (100 µm ve 50 µm ölçekleri), bazalt liflerinin jel matrisi içerisinde bütünlüğünü koruyarak yer aldıkları gözlemlenmiştir. Bu lifler, çevreleyen matris ile etkili bir şekilde bağ yapmış olup herhangi bir ayrışma ya da bozulma belirtisi göstermemektedir. Bu durum, fiber ile matris arasında güçlü bir ara yüzey etkileşiminin bulunduğunu ve liflerin, matris içinde yalnızca fiziksel olarak yer almakla kalmayıp, mekanik yük aktarımı açısından da aktif bir rol oynadığını göstermektedir. Liflerin bu şekilde sağlam bir şekilde gömülmüş olması, çatlakların yön değiştirmesini veya durmasını sağlayan mikro-köprüleme etkisinin etkinliğini artırmaktadır. Ayrıca bu yapı, kimyasal saldırı ortamlarında lif-matris arayüzünün zayıflamadığını ve bağlayıcının dayanımının korunduğunu göstermektedir. Bazalt liflerinin matris içerisindeki dağılımı, mikroyapı boyunca oldukça homojendir. Bu homojen dağılım, çatlakların oluştuğu noktalarda liflerin bir köprü görevi üstlenerek çatlak uçlarını birleştirmesini ve çatlak ilerlemesini sınırlamasını sağlamaktadır. Bu tür çatlak köprüleme davranışı, özellikle çekme yükleri altında etkili olmakta ve çatlakların matris boyunca yayılmasını engellemektedir. Sonuç olarak lifler, yalnızca gerilmelerin kontrol altına alınmasına katkı sunmakla kalmaz, aynı zamanda çatlak oluşum eşiğini artırarak yapının daha uzun süre dayanım göstermesine yardımcı olur. Bu mekanizma, sülfürik asit gibi agresif iyonların çatlaklardan ilerleyerek bağlayıcı sistemin içine nüfuz etmesini de önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. Daha yüksek büyütme ölçeklerinde (20 µm ölçeğinde) elde edilen görüntüler, matrisin büyük ölçüde yoğun C-A-S-H (kalsiyum-alüminyum-silikat-hidrat) jel fazlarından oluştuğunu göstermektedir. Bu fazlar, bağlayıcı sistemin temel dayanım sağlayıcı bileşenleri olup kimyasal saldırıya karşı önemli direnç sağlarlar. Mikroyapı içinde yerel bazı mikro çatlaklar gözlenmiş olsa da, bu çatlaklar yaygın değildir ve genellikle belirli bölgelerde lokalize olarak bulunur. Bu durum, sistemin makro düzeyde dayanımını zayıflatmayacak, kontrol edilebilir çatlak oluşumlarının varlığını işaret etmektedir. Gözlemlenen mikro çatlakların genellikle bazalt liflerine yakın bölgelerde yer alması, liflerin çatlak gelişimini durdurmada ne kadar etkili olduğunu göstermektedir. Liflerin bulunduğu bölgelerde çatlakların uç noktalarının yön değiştirdiği ya da tamamen sona

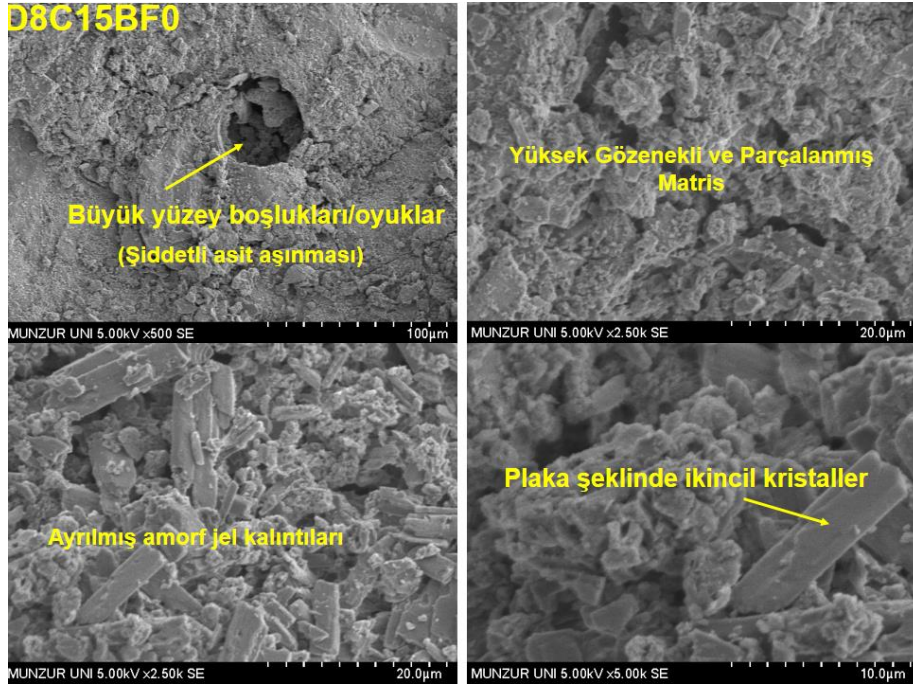
erdiği görülmüştür. Bu etki, çatlakların devam ederek daha büyük bozulmalara neden olmasının önüne geçmekte ve özellikle sülfat ya da asit iyonlarının çatlak yoluyla ilerlemesini engelleyerek kimyasal dayanımı artırmaktadır. Çatlakların genişlememesi, liflerin sistem içinde yük taşıma davranışını da desteklemekte ve yapının çekme dayanımını artırmaktadır. Yüzey görüntüleri, matrisin büyük kısmının kompakt ve geçirimsiz jel fazlarıyla dolu olduğunu göstermekte; bu fazların arasında ise tam olarak tepkimeye girmemiş bazı YFC partiküllerinin varlığı dikkat çekmektedir. Bu cüruf partikülleri, yoğun jel fazları tarafından kapsüllenmiş olup çevresel etkilere karşı izole hale getirilmiştir. Bu yapı, sülfürik asit gibi dışsal agresif ajanların matrise nüfuz etmesini büyük oranda engelleyen bir mikro bariyer görevi görmektedir ve bağlayıcı sistemin kimyasal bütünlüğünü korumaktadır. Bazı SEM görüntülerinde, bazalt liflerinin matristen kısmen çekilmiş olduğu (pull-out) izlerine rastlanmaktadır. Bu durum, lif-matris ara yüzeyinde yüksek bağ kuvvetlerinin olduğunu ve liflerin yük taşıma sırasında matrise mekanik direnç sunduğunu göstermektedir. Aynı zamanda ara yüzeyde gözlemlenen yoğunlaşmalar (densifikasyon), matrisin lifleri sararak kimyasal reaksiyon ürünlerini çevrelerinde yoğunlaştırdığını göstermektedir. Bu da bağlayıcının mekanik dayanımının daha da artmasını sağlamaktadır. SEM analizlerinde yaygın matris bozulması, yapının ayrışması ya da bazalt liflerinde korozyona dair bir belirtiye rastlanmamıştır. Bu bulgular, bazalt liflerinin sülfürik asit ortamında kimyasal olarak kararlı olduğunu ve çevresel etkilerden zarar görmediğini doğrulamaktadır. Aynı zamanda matris sisteminin, bazalt lifleriyle oluşturduğu hibrit yapının da uzun süreli kimyasal stabilite sağladığını ortaya koymaktadır. Genel olarak yapılan mikroyapısal analizler, D8C0BF6 karışımının sülfürik asit saldırısı sonrası gösterdiği üstün mekanik performansı doğrulamaktadır. Bu performans, iki ana bileşenin sinerjik etkileşimiyle ortaya çıkmıştır: yoğun ve geçirimsiz C-A-S-H jel fazlarının oluşumu ve etkili bazalt lifi takviyesi. Bu iki unsur birlikte çalışarak, asit kaynaklı mikroyapı hasarını minimuma indirmiş ve matrisin bütünlüğünü uzun süre boyunca korumuştur. Böylelikle, D8C0BF6 karışımı agresif çevresel koşullarda yüksek dayanım sunabilecek ileri düzey bir bağlayıcı sistemi olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 13. Sülfürik asit maruziyeti sonrası D8C0BF6 karışımına ait SEM görüntüsü

D8C15BF0 karışımı, %8 alkali aktivatör dozajı (Na_2O eşdeğeri) ile hazırlanmış olup, bağlayıcı bileşeni olarak %85 yüksek fırın cürufu (YFC) ve %15 Portland çimentosu (PC) içermektedir. Bazalt lifi takviyesi ise bulunmamaktadır (%0 BF). Sülfürik asit ortamında 90 günlük maruziyet sonrası yapılan SEM analizleri, bu karışımın mikroyapısında ciddi bozulmalar ve yüksek porozite ortaya koymaktadır. Bu bulgular, karışıma ait mekanik testlerde tespit edilen ve grup içinde asit saldırısı sonrası en düşük basınç dayanımı olan 48,35 MPa ile doğrudan ilişkilidir. Bu durum, asidik ortamın özellikle PC içeren bağlayıcılar üzerinde yarattığı olumsuz etkilerin mikroyapısal düzeyde somut kanıtlarını sunmaktadır. SEM görüntülerinin düşük büyütme düzeyinde ($100\ \mu\text{m}$ ölçeğinde), yüzeyde belirgin ve geniş bir boşluk ya da çukur gözlemlenmiştir. Bu yapı, asidin matrise karşı oluşturduğu lokalize ve şiddetli aşındırma etkisini açıkça göstermektedir. Bu tür boşluklar, asit ile temas eden bölgelerde bağlayıcının kimyasal olarak çözünmesi ve yerel olarak yapısal malzemenin kaybına işaret eder. Bu aşamada, yüzeyde meydana gelen geniş boşluklar malzemenin dayanımını doğrudan zayıflatmaktadır. Bu gözlemler, özellikle Portland çimentosu içeren sistemlerde yaygın olarak görülen kimyasal reaksiyon süreçlerini yansıtmaktadır. Sülfürik asit ortamında, Portland çimentosuna özgü kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) fazlarının çözünmesi gerçekleşir ve bunun sonucunda alçıtaşı (jips)

gibi genişleyen yan ürünler oluşur. Bu genişleyen ürünler, yapı içinde iç gerilmeler oluşturur, bu da çatlakların açılmasına, yapısal kütlede kütle kaybına ve sonunda mikroyapısal parçalanmaya yol açar. Bu süreç, D8C15BF0 karışımındaki belirgin yüzey boşluklarının ve çatlakların temel nedenlerinden biridir. Orta büyütme seviyelerinde (20 μm ölçeğinde) yapılan incelemeler, bağlayıcı matrisin önemli ölçüde parçalandığını, gözenekliliğin arttığını ve jel fazlarının birbirleriyle zayıf bağlantılar kurduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, bağlayıcı ağına ciddi anlamda bozulduğunu, asit etkisiyle bağlayıcı fazların yıkıma uğradığını ve matriste sürekliliğin kaybedildiğini göstermektedir. Matrisin bu durumdaki yapısı, mekanik stabilitenin azalmasına ve bağlayıcı bileşenin etkinliğinin düşmesine neden olur. Gözlemlenen mikro yapısal bozulmalar, asitlerin bağlayıcı bileşenleri çözerek bağlayıcı ağına parçalama etkisinin somut göstergesidir. Asidik iyonların matrise nüfuz etmesiyle jel fazları ayrışmakta, kalsiyum, alüminyum ve silikat bağları zayıflamakta, bu da matrisin sürekliliğinin ve dolayısıyla yapısal bütünlüğün kaybına neden olmaktadır. Bu süreç, bağlayıcı sistemin mukavemetini olumsuz etkileyerek çatlak oluşumu ve ilerlemesini hızlandırır. Yüksek büyütme (10 μm ölçeğinde) görüntülerde, yüzey alanında tabakamsı kristalin çökelti ve amorf jel artıklarının hakim olduğu görülmektedir. Bu oluşumlar, orijinal C-A-S-H (kalsiyum-alüminyum-silikat-hidrat) ve C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) jel yapıların bozulması ve yıkımı sonucu ortaya çıkan ikincil reaksiyon ürünlerinin çökelti olarak yorumlanabilir. Özellikle jips benzeri yapılar ve diğer sülfat bileşikler bu tabakamsı kristalin yüzeylerde yoğunlaşmıştır. Bu tür ikincil ürünler, bağlayıcının yapısal bütünlüğünü daha da zayıflatmakta ve kırılganlığını artırmaktadır. Bahsi geçen bu kırılgan ve birbirinden kopuk kristalin yapılar, matrisin yük taşıma kapasitesini olumsuz yönde etkileyerek mekanik dayanımın azalmasına neden olmaktadır. Sürekli yapının bozulması ve bu tür gevrek ürünlerin birikimi, mikro çatlakların genişlemesine ve birleşmesine zemin hazırlamaktadır. Bu da özellikle basınç ve çekme altında malzemenin daha kolay kırılmasına sebep olmaktadır. D8C15BF0 karışımında bazalt lifi takviyesinin olmaması, önemli bir eksiklik olarak öne çıkmaktadır. Bazalt liflerinin olmadığı bu durumda, matris içinde gelişen mikro çatlaklar herhangi bir fiziksel engelle karşılaşmadan kolayca yayılabilmektedir. Liflerin, çatlakların ilerlemesini durduran köprüleme etkisi yoktur; bu nedenle çatlaklar birleşerek daha büyük hasar alanları oluşturmuş ve asit iyonlarının matrise daha derin nüfuz etmesine olanak tanımıştır. Sonuç olarak, asidik ortamın zararlı etkileri daha hızlı ve şiddetli biçimde ortaya çıkmıştır.

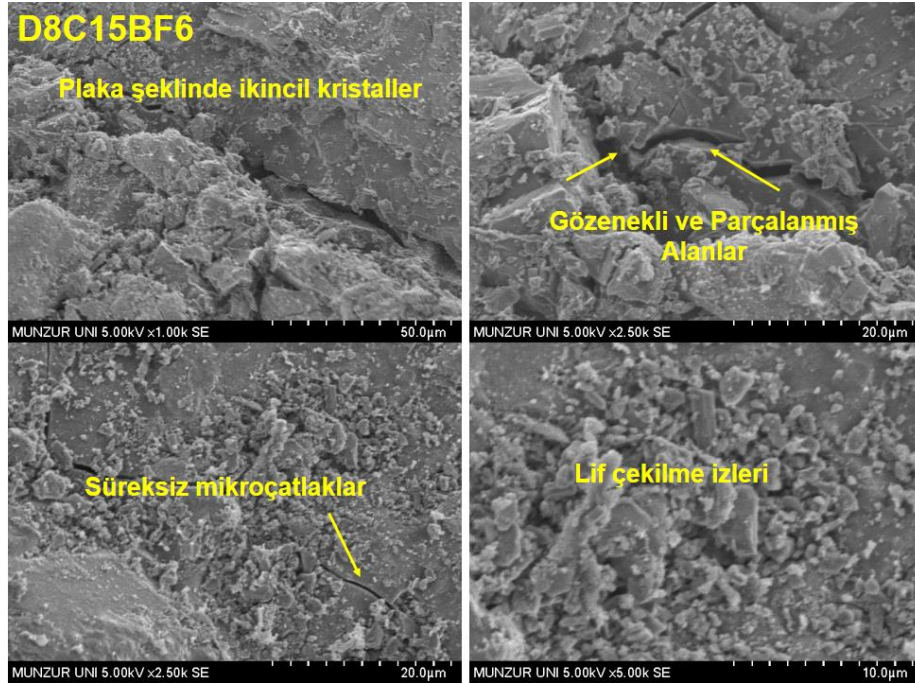


Şekil 14. Sülfürik asit maruziyeti sonrası D8C15BF0 karışımına ait SEM görüntüsü.

D8C15BF6 karışımının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri, bu karışımın %8 alkali aktivatör dozu (Na_2O eşdeğeri), %85 YFC, %15 Portland çimentosu (PC) ikamesi ve %0,6 bazalt lif içeriği kullanılarak üretildiğini göstermektedir. Bu karışım 90 gün boyunca sülfürik aside maruz bırakıldıktan sonra elde edilen mikro yapısal incelemelerde, heterojen bir görünüm sergilemekle birlikte, kısmi olarak yoğunlaşmış bölgelerin varlığı dikkat çekmektedir (Şekil 15). Bu mikro yapı, genel olarak karışımın kimyasal direncinin ve mekanik dayanımının asit ortamında ne ölçüde korunduğuna dair önemli ipuçları vermektedir. Asit saldırısı sonrası yapılan mekanik testlerde, bu karışımın 54,18 MPa seviyesinde bir basınç dayanımı gösterdiği belirlenmiştir. Bu değer, tamamen PC içeren ve lif takviyesi yapılmamış sistemlere kıyasla mekanik performansın belirgin şekilde iyileştiğini göstermektedir. Ancak, tamamen alkali aktive edilmiş ve bazalt liflerle takviye edilmiş karışımlarla karşılaştırıldığında bu dayanım seviyesinin daha düşük kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, hem lif katkısının hem de alkali aktivasyonun mekanik dayanımı artırmadaki rollerinin önemini ortaya koymaktadır. SEM görüntülerinin düşük büyütme seviyelerinde (50 μm ve 20 μm ölçeklerinde) matris üzerinde liflerin neden olduğu çatlak kontrol mekanizmasına bağlı olarak lokal olarak yoğunlaşmış bölgeler açıkça görünmektedir. Bu yoğunlaşmış alanlar, bazalt liflerinin matris içinde etkin bir

şekilde dağıldığını ve bu sayede matris sürekliliğinin özellikle liflerin çevresinde iyileştiğini işaret etmektedir. Bazalt liflerinin, matriste oluşabilecek mikro çatlakların ilerlemesini engellemede kritik rol oynadığı ve lokal mekanik dayanıklılığı artırdığı net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Ancak, aynı zamanda geniş alanlarda gözenekli ve parçalanmış yapılar da görülmektedir. Bu gözenekli yapılar özellikle Portland çimentosunun hidratasyon ürünlerinin etkisi altında kalan bölgelerde yoğunlaşmıştır ve asit kaynaklı kimyasal bozulmanın bir göstergesidir. Bu alanlar, asidin matrise zarar verdiğini, matris fazlarının ayrıştığını ve yapı bütünlüğünün zayıfladığını göstermektedir. Daha yüksek büyütme seviyelerinde (10–20 μm ölçeklerinde), mikro yapı içinde süresiz ve düzensiz mikro çatlaklar, matrise bağlı jel kalıntılarının kopmuş ve yer değiştirmiş parçaları ile liflerin matristen çekildiğine dair izler tespit edilmiştir. Bazalt liflerinin varlığı, bu mikro çatlakların daha fazla ilerlemesini durdurarak kısmi bir yapısal bütünlük sağlamıştır. Bununla birlikte, uzun süreli asit maruziyeti lif-matris arayüzlerinin zayıflamasına yol açmış, bu da liflerin matrisle bağını zayıflatarak mekanik takviyenin etkinliğini düşürmüştür. Lif çekilme izleri ve liflerle matris arasındaki boşluklar, liflerin lokal olarak ayrıştığını ve bağlayıcılığın azaldığını göstermektedir. Buna rağmen, liflerin çevresindeki matris bölgeleri lif içermeyen bölgelere kıyasla daha sıkı ve yoğun bir yapı sergilemektedir. Bu da liflerin, asit saldırısına karşı lokal bazda bir direnç sağladığını ancak bu direncin tam kapsamlı veya eksiksiz bir koruma anlamına gelmediğini ifade etmektedir. Karışımda gözlemlenen baskın bozulma mekanizmaları, Portland çimentosunun içerdiği kalsiyum bileşenlerine yönelik asit saldırısıyla doğrudan ilişkilidir. Bu asit etkisi, jips gibi genleşen ya da suda çözünebilen kimyasal ürünlerin oluşumuna neden olmaktadır. Oluşan bu bozulma ürünleri ve beraberinde gelişen mikro çatlak yayılımı, matrisin sürekliliğinin kısmen kaybedilmesine sebep olmuştur [142]. Ancak, bu olumsuzluklara rağmen, bazalt lifleri mikro çatlakları köprüleyerek matris bütünlüğünün daha geniş çaplı yıkımını geciktirmiştir. Lifler, gerilmelerin daha eşit dağılımına katkı sağlamış ve bu mekanizma, karışımın orta düzeyde basınç dayanımını korumasına olanak vermiştir [45]. Genel değerlendirme yapıldığında, SEM analizleri bazalt liflerinin asit saldırısının yol açtığı mikro yapısal bozulmaların bir kısmını hafiflettiğini açıkça ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, kısmi Portland çimentosu ikamesi içeren hibrit matris, tamamen alkali aktive edilmiş sistemlere kıyasla kimyasal dayanıklılık açısından daha zayıf kalmıştır. D8C15BF6 karışımı, çift yönlü bir davranış sergilemiştir; burada lif takviyesi çatlak direncini ve lokal yoğunlaşmayı artırırken, Portland çimentosuna bağlı kimyasal zayıflıklar ise uzun vadeli

kimyasal stabiliteyi sınırlandırmıştır. Bu bulgular, hibrit alkali aktive sistemlerin asit dayanıklılığını ve mekanik kalıcılığını artırmak için Portland çimentosu içeriğinin dikkatle kontrol edilmesi ve lif dağılımının optimize edilmesinin kritik önemini vurgulamaktadır.

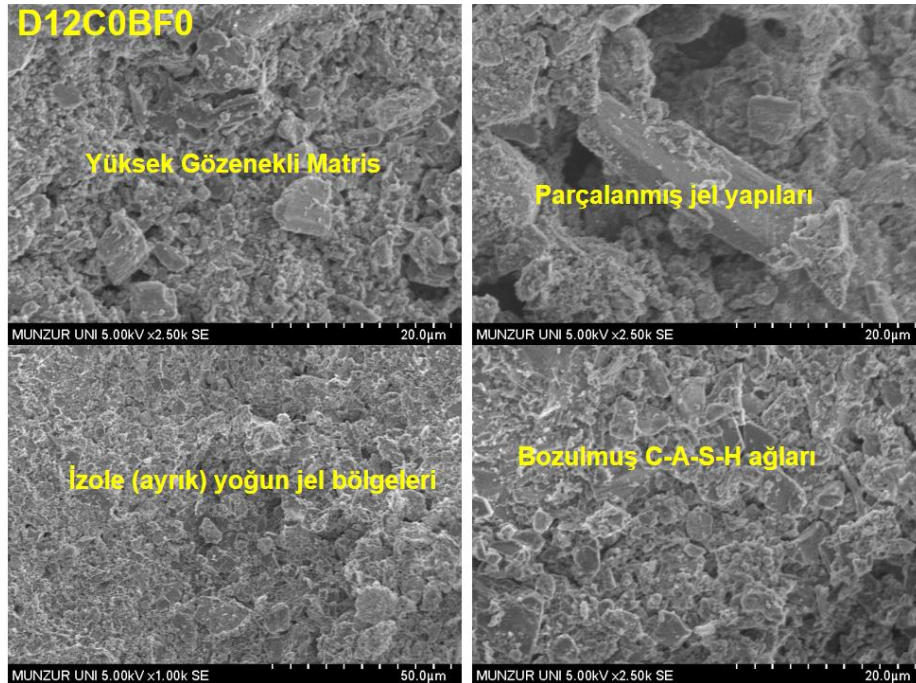


Şekil 15. Asit maruziyeti sonrası D8C15BF6 karışımının SEM görüntüsü

D12C0BF0 karışımının, %12 alkali aktivatör dozu kullanılarak hazırlanmış, %100 YFC (granüle yüksek fırın cürufu) içeriğine sahip ve bazalt fiber takviyesi olmaksızın üretilmiş haliyle, 90 gün boyunca sülfürik asit gibi agresif bir kimyasal ortama maruz bırakılması sonrası elde edilen SEM (Tarayıcı Elektron Mikroskobu) görüntüleri detaylı olarak incelendiğinde, bu karışımın mikro yapısının oldukça gevşek ve yüksek oranda gözenekli olduğu açıkça ortaya çıkmaktadır. Bu mikro yapısal durum, mekanik özellikler açısından da gözlemlenen 49,72 MPa'lık basınç dayanımı değeriyle tam bir uyum içindedir; zira bu değer, aynı kategorideki diğer %12 alkali aktivatör dozlu ve %100 YFC içerikli karışımlar arasında en düşük performans olarak kayıtlara geçmiştir (Şekil 16). Düşük büyütmelerde, yani 50 mikrometre (μm) ve 20 mikrometre ölçeklerinde yapılan incelemelerde, matrisin yüzeyinin büyük ölçüde gözenekli ve sürekli olduğu dikkat çekmektedir. Bu özellikler, özellikle C-A-S-H (kalsiyum-alüminyum-silikat-hidrat) jel ağının, sülfürik asit saldırısı

sonucu önemli oranda bozulduğunu ve yapısal bütünlüğünün ciddi şekilde zedelendiğini göstermektedir [143]. Söz konusu jel ağının bozulması, mekanik dayanımın temelini oluşturan bağlayıcı fazın zayıflamasına ve matrisin yapısal zayıflamasına neden olmaktadır. Önemle belirtmek gerekir ki, karışımdaki önemli bir matris sıkışmasının gerçekleşmemesi ve mikroskobik düzeyde yaygın, sürekli boşlukların varlığı, yüksek alkali dozu sayesinde ilk aşamada yeterli aktivasyon sağlanmış olsa bile, uzun vadeli kimyasal dayanıklılık ve asit direnci açısından bu matriste zayıflık olduğunu ortaya koymaktadır. Yapılan daha yüksek büyütme (örneğin 10–20 µm ölçeğinde) incelemelerde ise, matris içerisinde belirgin şekilde parçalanmış jel yapıları ve birbirinden ayrılmış, bağlantısız reaksiyon fazları gözlemlenmiştir. Bu durum, agresif sülfürik asit ortamında meydana gelen ciddi kimyasal bozunmanın mikroyapısal yansımasıdır. Söz konusu bozunma mekanizmasında, özellikle Portland çimentosundan (PC) bağımsız olarak alkali aktivasyonla oluşan C-A-S-H jel yapısının zayıf direnç göstermesi önemli bir faktörken; asit ortamının etkisiyle kalsiyum ve silikat içeren bileşenlerin çözünmesi sonucunda jel yapısının çökmesi meydana gelmektedir. Bu çözünme olayı, mikroskobik boşlukların (mikro gözeneklerin) oluşumuna ve gelişimine yol açarak, matrisin mekanik dayanımında gözle görülür bir azalmayı tetiklemektedir. İncelemeler sırasında bazı yoğun ve nispeten sıkışmış bölgeler izole şekilde tespit edilmiş olsa da, bu alanlar matrisi destekleyici sürekli ve sağlam bir ağ oluşturacak şekilde yaygın değildir. Bu da, matrisin genel yapısal dayanıklılığının büyük ölçüde zarar gördüğünü ve mekanik destek açısından yetersiz kaldığını göstermektedir. Daha da önemlisi, karışımda bazalt fiberlerinin tamamen bulunmaması, mikro çatlakların ilerleyişini engelleyecek veya sınırlayacak herhangi bir köprüleme (fiber köprüleme) mekanizmasının eksik olduğu anlamına gelmektedir. Fiberlerin yokluğunda, iç yapıda meydana gelen gerilmeler eşit şekilde dağıtılamamakta ve çatlaklar kolayca büyüyerek yayılmaktadır. Bu durum, sülfürik asidin matrise daha hızlı ve derin nüfuz etmesine imkan vermiştir. Böylece, asit kaynaklı kimyasal bozunma hızlanmış ve matriste birbirine bağlı geniş çaplı mikro çatlak ağlarının oluşumu desteklenmiştir. Fiber takviyesinin bulunmaması, matrisin hem mekanik hem de kimyasal açıdan daha savunmasız hale gelmesine doğrudan katkıda bulunmuş, yüksek alkaliniteye rağmen matris kompozisyonu asit saldırısına karşı dirençsiz kalmıştır. Bu faktörler bir araya geldiğinde, D12C0BF0 karışımının sülfürik asit maruziyeti sonrası basınç dayanımında yaşanan kayıplar önemli boyutlara ulaşmıştır. SEM analizlerinden elde edilen bulgular ayrıca şunu doğrulamaktadır ki, %12 oranında alkali aktivasyonun başlangıç

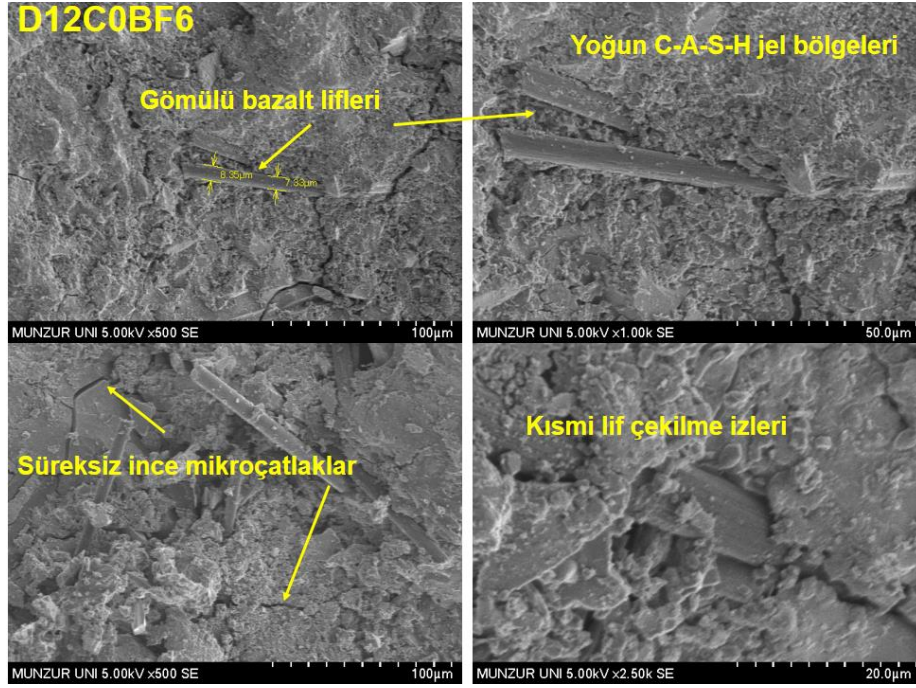
aşamasında cürufun çözünmesini ve jel fazlarının oluşumunu teşvik ettiği doğrudur. Ancak, bu kimyasal reaksiyonların sonucunda ortaya çıkan ürünlerin, yeterli düzeyde matris sıkışması ve fiber takviyesiyle desteklenmemesi halinde, asit etkisine karşı zayıf bir direnç oluşturduğu ve gözeneklerin artışına sebep olduğu da gözlemlenmiştir. Bu durum, özellikle uzun süreli asit maruziyetinde yapının dayanıklılığını ciddi şekilde azaltmaktadır. Sonuç olarak, D12C0BF0 karışımının sülfürik asit gibi agresif ve aşındırıcı bir kimyasal çevrede dayanıklılığının düşük olduğu net bir biçimde ortaya konmuştur. Bu durum, alkali aktive sistemlerde kimyasal ve mekanik stabilitenin korunması için mikro yapısal sıkışmanın artırılmasının ve mutlaka fiber takviyesinin uygulanmasının kritik önem taşıdığını vurgulamaktadır. Ayrıca, bu bulgular, agresif çevresel koşullara maruz kalan alkali aktif karışımların tasarımında, fiber içeriklerinin optimize edilmesi ve matristeki gözenekliliğin minimize edilmesi gerektiğini, aksi halde yapıların dayanım ve bütünlüğünün önemli ölçüde zayıflayacağını açıkça göstermektedir. Böylece, D12C0BF0 karışımının asidik ortamlarda karşılaştığı zorluklar, özellikle fiber takviyesi olmayan ve matris sıkışması yetersiz olan sistemlerde yapısal dayanıklılığın sürdürülebilir olmadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 16. Asit maruziyeti sonrası D12C0BF0 karışımının SEM görüntüsü

D12C0BF6 karışımının, %12 alkali aktivatör dozu (Na_2O eşdeğeri), %100 YFC, %0 Portland çimentosu ve %0,6 bazalt fiber içeriği ile hazırlanarak 90 gün boyunca sülfürik asit etkisine maruz bırakılmış haliyle elde edilen SEM (Tarama Elektron Mikroskobu) görüntüleri, mikro yapısal olarak oldukça önemli detaylar sunmaktadır. Bu görüntüler, karışımın kimyasal saldırı sonrasında gösterdiği dayanıklılığın altında yatan mikro yapısal özellikleri ayrıntılı biçimde ortaya koyar. Görüntülerde, genel olarak sıkı ve yoğun bir matris yapısı ile birlikte, bazalt fiberlerin mikro yapıya sağladığı güçlendirme etkisi net biçimde gözlemlenmektedir (Şekil 17). Bu karışımın asit saldırısı sonrasında ulaştığı 55,40 MPa basınç dayanımı, özellikle %12 alkali aktivatör dozu ve %100 YFC içeren ve fiber takviyesi bulunmayan benzer karışımlarla karşılaştırıldığında kayda değer bir üstünlük sergilemektedir. Bu durum, bazalt fiberlerin mekanik dayanımı artırmadaki etkisini kuvvetle desteklemektedir. Aynı zamanda, bu karışımın asidik ortamlarda maruz kaldığı kimyasal ve fiziksel bozulmaların diğerlerine kıyasla daha sınırlı olduğunu da göstermektedir. Bu bağlamda, bazalt fiberlerin mikro çatlakların oluşumunu engelleme, ilerlemesini sınırlama ve matris yapısının bütünlüğünü koruma konusundaki işlevleri çok önemli birer koruyucu mekanizma olarak karşımıza çıkmaktadır. Daha detaylı incelendiğinde, düşük büyütme ölçeklerinde ($100\ \mu\text{m}$ ve $50\ \mu\text{m}$ ölçeklerinde), mikro yapının oldukça homojen olduğu, bazalt fiberlerin matrise sağlam biçimde gömülü olduğu ve fiberlerin matris içinde düzenli dağıldığı görülmektedir. Fiberlerin matris içindeki bu homojen dağılımı, mikro yapının tamamında çatlak oluşumunu ve ilerlemesini önleyen kritik bir rol üstlenir. Fiberler, sanki bir ağ gibi matris içindeki mikro çatlakları köprüleyerek bir yandan çatlakların genişlemesini engellerken diğer yandan da matrisin kimyasal bozulmaya karşı direncini artırmaktadır. Bu mekanizma sayesinde, asidin matrise nüfuzu kısıtlanmakta, böylece hem kimyasal bozunma hem de mekanik hasar minimize edilmektedir. Yüksek büyütme ölçeklerinde ($20\ \mu\text{m}$ ölçeğinde), mikro yapının daha detaylı özellikleri ortaya çıkar. Burada, yoğun ve sıkı C-A-S-H jel tabakaları dikkat çekmektedir. Bu jel tabakaları, alkali aktivasyonun bir sonucu olarak oluşmuş ve matrisi sıkılaştıran bağlayıcı fazlar olarak işlev görür. Bu bölgelerde, ince ve süreksiz mikro çatlaklar gözlemlenmekle birlikte, bunların büyüklükleri ve yaygınlıkları oldukça sınırlıdır. Mikro çatlakların varlığı, matrisin tamamen hasarsız olmadığını gösterirken, fiberlerin bu çatlakları köprüleyerek genişlemelerini engellediği görülmektedir. Ayrıca, bu büyütmede kısmi olarak fiber çekilme izleri (fiber pull-out) de tespit edilmiştir. Fiber çekilme, fiber ile matris arasındaki mekanik bağın bir göstergesi olup, burada fiberlerin asit ortamındaki

dayanıklılığına rağmen bazı bölgelerde zayıflama yaşandığını işaret etmektedir. Ancak, bu zayıflama tamamen fiber takviyesinin etkinliğini ortadan kaldırmamış, fiberlerin çatlak kontrolündeki rolü devam etmiştir. Fiber çevresindeki matrisin diğer bölgelere kıyasla daha sıkı ve kompakt görünmesi, burada meydana gelen ikincil geopolimerleşme reaksiyonlarına bağlanabilir. Bu reaksiyonlar, asidin yol açtığı kimyasal bozunmaya karşı yeni jel oluşumlarıyla matrisin yerel olarak güçlendirilmesini sağlar. Böylece, fiber çevresinde oluşan bu ek jel tabakası, fiber-matris ara yüzeyindeki mekanik kilitlenmeyi artırarak fiberlerin matrisle bağını güçlendirmiş ve asit direncini yükseltmiştir. Bu durum, fiber takviyesinin sadece fiziksel olarak değil, kimyasal ortamda da desteklendiğinin önemli bir göstergesidir. Daha genel bir değerlendirme yapıldığında, bazalt fiberlerin D12C0BF6 karışımının mekanik dayanımının korunmasında kritik bir işlev gördüğü söylenebilir. Fiberler, çatlak büyümesini hem fiziksel hem de kimyasal olarak kontrol altına alarak, matrise daha uzun ömürlü bir dayanıklılık kazandırmıştır. Ayrıca, mikro yapısal sıkışmayı teşvik ederek asidin matrise nüfuzunu yavaşlatmış ve böylece asit kaynaklı hasarın geniş çaplı olmasını engellemiştir. Bu durum, asidik ortamlarda maruz kalacak yapı malzemeleri için önemli bir avantaj sağlamaktadır [144]. Sonuç olarak, D12C0BF6 karışımının SEM analizleri, bazalt fiber ilavesinin hem mekanik takviyeyi artırmada hem de mikro yapısal dayanıklılığı sağlamada vazgeçilmez olduğunu göstermektedir. Karışımın kimyasal saldırı sonrası gösterdiği üstün performans, fiberlerin sağladığı mekanik destek, mikro yapısal sıkışma ve çatlak kontrolünün bir kombinasyonu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, agresif kimyasal ortamlarda kullanılacak alkali aktive sistemlerde bazalt fiber takviyesi uygulanmasının önemi bir kez daha teyit edilmiştir. Fiber dağılımının optimize edilmesi ve matris kompozisyonunun dikkatli kontrolü ile birlikte, hem asit direnci artırılabilir hem de yapısal dayanıklılık uzun vadede sürdürülebilir hale getirilebilir. Bu bulgular, ileri teknoloji yapı malzemeleri tasarımında fiber destekli alkali aktive sistemlerin kullanımının yaygınlaştırılması için önemli bir referans teşkil etmektedir.



Şekil 17. Asit etkisi sonrası D12C0BF6 karışımının SEM görüntüsü

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, sülfürik asit etkisine maruz bırakılan ve soğuk kür koşullarında sertleştirilen hibrit alkali aktive harçların mekanik performansı ve asit direnci üzerinde; alkali aktivatör dozu (AD), granüle yüksek fırın cürufunun (YFC) kısmen Portland çimentosu (PC) ile ikamesi ve bazalt fiber (BF) içeriğinin etkilerini sistematik olarak incelemiştir. Deneysel bulgulara dayanarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- a. Bağlayıcı kütesine göre %8'den %12'ye çıkarılan alkali aktivatör dozu (Na_2O eşdeğeri), erken yaş aktivasyonunu ve matrisin yoğunlaşmasını artırmıştır. Ancak, fiber takviyesinin bulunmadığı karışımlarda daha yüksek alkali içeriği, daha fazla mikro yapısal heterojenliğe ve düşmüş asit direncine neden olmuştur. Aşırı alkali içeriği, asit saldırısına karşı kimyasal olarak daha az kararlı olan alkali açısından zengin ikincil fazların oluşumunu teşvik etmiştir.
- b. YFC'nin %15 oranında PC ile kısmi ikamesi, soğuk kür koşullarında hidrasyon ürünlerinin oluşması sayesinde erken yaş basınç dayanımında artış sağlamıştır. Bununla birlikte, PC içeren karışımlar, %100 YFC içeren sistemlere kıyasla sülfürik asit ortamına karşı daha düşük kimyasal direnç göstermiştir. Bu durum, özellikle kalsiyum hidroksitin asitle çözünmeye karşı hassasiyeti ve ikincil genleşen fazların (jips, etrenjit) oluşumu ile ilişkilidir.
- c. Bazalt fiber takviyesi, harçların mekanik dayanıklılığını ve asit direncini önemli ölçüde artırmıştır. Fiberler, çatlak köprüleme görevi görerek mikro çatlakların yayılmasını sınırlamış ve asit maruziyeti sırasında matris bütünlüğünün korunmasına katkı sağlamıştır. En uygun fiber içeriği %0.6 olarak belirlenmiş olup, bu oranda PC içermeyen ve %8 AD ile aktive edilmiş karışımda en yüksek asit sonrası basınç dayanımı (69,33 MPa) elde edilmiştir.
- d. Asit etkisi sonrası kütle artışı, PC içermeyen ve fiber ile takviye edilmiş karışımlarda daha az belirgin olup, bu durum üstün kimyasal stabiliteyi ve asit girişine karşı daha düşük hassasiyeti göstermektedir. Ultrasonik darbe hızı (UPV)

ölçümleri, fiber takviyesinin ve PC'siz kompozisyonların, asit saldırısı sonrasında daha yoğun ve elastik matrislerin oluşmasına neden olduğunu doğrulamıştır.

- e. SEM analizleri, mekanik bulguları destekleyerek fiber katkısının mikro yapısal bozulmayı sınırladığını, jel sürekliliğini koruduğunu ve lokal yoğunlaşmayı artırdığını ortaya koymuştur. Buna karşın, PC içeren matrisler, asit etkisi altında yaygın mikro çatlama, boşluk oluşumu ve jel parçalanması göstermiştir.

Sonuç olarak, orta düzeyde alkali aktivatör kullanımı, Portland çimentosunun tamamen çıkarılması ve bazalt fiber takviyesi ile birlikte uygulanan tasarım stratejisi, soğuk kür koşullarında sertleşen alkali aktive harçların agresif asidik ortamlarda uzun vadeli mekanik ve kimyasal dayanıklılığını önemli ölçüde iyileştirebilmektedir. Gelecekteki çalışmalar, fiber-matris etkileşimlerinin optimize edilmesi ve hibrit fiber sistemlerinin araştırılması yönünde yoğunlaştırılarak, bu tür alkali aktive malzemelerin zorlu çevresel koşullardaki altyapı uygulamalarında dayanımının daha da artırılması hedeflenmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] Barna LA., Seman PM., Korhonen C., Energy-efficient approach to cold-weather concreting, *J Mater Civil Eng* (2011); 23(11),1544-1551.
- [2] Yu K., Jia M., Yang Y., Liu Y., A clean strategy of concrete curing in cold climate: Solar thermal energy storage based on phase change material, *Applied Energy* (2023); 331,120375.
- [3] Liu Y., Sun F., Yu K., Yang Y., Experimental and numerical research on development of synthetic heat storage form incorporating phase change materials to protect concrete in cold weather, *Renewable Energy* (2020); 149,1424-1433.
- [4] Zhang H., Ai J., Ren Q., Zhu X., He B., Jiang Z., Understanding the strength evolution of alkali-activated slag pastes cured at subzero temperature, *Cement Concrete Composites* (2023); 138,104993.
- [5] Ju C., Ye R., Wu Y., Sun P., Liu Y., Yang Y., Effect of alkali cation on performance of alkali-activated slag mortar in cold environments, *Renewable Energy* (2022); 9(12),450.
- [6] Demirboğa R., Karagöl F., Polat R., Kaygusuz MA., The effects of urea on strength gaining of fresh concrete under the cold weather conditions, *Construction Building Materials* (2014); 64,114-120.
- [7] Yasien A., Bassuoni M., Abayou A., Ghazy A., Nano-Modified Concrete as Repair Material in Cold Weather, *ACI Materials Journal* (2021); 118(2).
- [8] Zhang G., Yang H., Ju C., Yang Y., Novel selection of environment-friendly cementitious materials for winter construction: Alkali-activated slag/Portland cement, *Journal of cleaner production* (2020); 258,120592.
- [9] Haque MA., Chen B., Research progresses on magnesium phosphate cement: A review, *Construction building materials* (2019);211,885-898.
- [10] Wang S., Jian L., Shu Z., Wang J., Hua X., Chen L., Preparation, properties and hydration process of low temperature nano-composite cement slurry, *Construction Building Materials* (2019); 205,434-442.

- [11] Zhang H., Sarker PK., Wang Q., He B., Jiang Z., Strength and toughness of ambient-cured geopolymer concrete containing virgin and recycled fibres in mono and hybrid combinations, *Construction Building Materials* (2021); 304,124649.
- [12] Koksall F., Bayraktar OY., Bodur B., Benli A., Kaplan G., Insulating and fire-resistant performance of slag and brick powder based one-part alkali-activated lightweight mortars, *Struct Concrete* (2023); 24(3),3128-3146.
- [13] Bodur B., Bayraktar OY., Benli A., Kaplan G., Tobbala DE., Tayeh BJJBE., Effect of using wastewater from the ready-mixed concrete plant on the performance of one-part alkali-activated GBFS/FA composites: Fresh, mechanical and durability properties, (2023); 76,107167.
- [14] Zhang H., Shi X., Wang Q., Effect of Curing Condition on Compressive Strength of Fly Ash Geopolymer Concrete, *ACI Materials Journal* (2018); 115(2).
- [15] Amran M., Murali G., Khalid NHA., Fediuk R., Ozbakkaloglu T., Lee YH., Haruna S., Lee YY., Slag uses in making an ecofriendly and sustainable concrete: A review, *Construction Building Materials* (2021); 272,121942.
- [16] Arslan S., Öz A., Benli A., Bayrak B., Kaplan G., Aydın AC., Sustainable use of silica fume and metakaolin in slag/fly ash-based self-compacting geopolymer composites: fresh, physico-mechanical and durability properties, *Sustainable Chemistry Pharmacy* (2024); 38,101512.
- [17] Yuan X., Xu W., AlAteah AH., Mostafa SA., Evaluation of the performance of high-strength geopolymer concrete prepared with recycled coarse aggregate containing eggshell powder and rice husk ash cured at different curing regimes, *Construction Building Materials* (2024); 434,136722.
- [18] Xu D., Tang J., Hu X., Yu C., Han F., Sun S., Deng W., Liu J., The influence of curing regimes on hydration, microstructure and compressive strength of ultra-high performance concrete: A review, *Journal of Building Engineering* (2023); 76,107401.
- [19] Nodehi M., Ozbakkaloglu T., Gholampour A., Mohammed T., Shi X., The effect of curing regimes on physico-mechanical, microstructural and durability properties of alkali-activated materials: A review, *Construction building materials* (2022); 321,126335.
- [20] Dener M., Altunhan U., Benli A., A green binder for cold weather applications: enhancing mechanical performance of alkali-activated slag through modulus, alkali dosage, and Portland cement substitution, *Archives of Civil Mechanical Engineering* (2024); 24(3),176.

- [21] Alzaza A., Ohenoja K., Illikainen M., Enhancing the mechanical and durability properties of subzero-cured one-part alkali-activated blast furnace slag mortar by using submicron metallurgical residue as an additive, *Cement Concrete Composites* (2021); 122,104128.
- [22] Zhang G., Yang Y., Li H., Calcium-silicate-hydrate seeds as an accelerator for saving energy in cold weather concreting, *Construction building materials* (2020); 264,120191.
- [23] Xiao L., Zhang C., Zhang H., Jiang Z., Optimization of alkali-activated slag for cold region construction: influence of primary parameters on its performance at subzero temperatures, *J Build Eng* (2025); 106,112556.
- [24] Fang S., Lam ESS., Li B., Wu B., Effect of alkali contents, moduli and curing time on engineering properties of alkali activated slag, *Construction Building Materials* (2020); 249,118799.
- [25] Bayraktar OY., Yakupoglu U., Benli A., Slag/diatomite-based alkali-activated lightweight composites containing waste andesite sand: mechanical, insulating, microstructural and durability properties, *Archives of Civil Mechanical Engineering* (2023); 23(4),230.
- [26] Bayraktar OY., Benli A., Bodur B., Öz A., Kaplan G., Performance assessment and cost analysis of slag/metakaolin based rubberized semi-lightweight geopolymers with perlite aggregate: Sustainable reuse of waste tires, *Construction Building Materials* (2024); 411,134655.
- [27] Ahıskalı A., Benli A., Ahıskalı M., Bayraktar OY., Kaplan G., Sustainable geopolymer foam concrete with recycled crumb rubber and dual fiber reinforcement of polypropylene and glass fibers: A comprehensive study, *Construction Building Materials* (2025); 474,141137.
- [28] Bayrak B., Öz A., Benli A., Kavaz E., Kaplan G., Aydın AC., Physico-mechanical and shielding properties of alkali-activated slag composites incorporating cement clinker aggregate: effect of high temperature and particle size, *Journal of Building Engineering* (2023);67,105982.
- [29] Alcan HG., Benli A., Öz A., Bayrak B., Kaplan G., Aydın AC., Effective utilization of silica fume and waste colemanite in eco-sustainable prepacked geopolymers, *Construction Building Materials* (2024); 457,139438.
- [30] Bayrak B., Benli A., Alcan HG., Çelebi O., Kaplan G., Aydın AC., Recycling of waste marble powder and waste colemanite in ternary-blended green geopolymer composites: mechanical, durability and microstructural properties, *J Build Eng* (2023); 73,106661.

- [31] Wongs A., Boonserm K., Waisurasingha C., Sata V., Chindaprasirt P., Use of municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash in high calcium fly ash geopolymer matrix, *J Clean Prod* (2017);148, 49-59.
- [32] Yang KH., Cho AR., Song JK., Effect of water–binder ratio on the mechanical properties of calcium hydroxide-based alkali-activated slag concrete, *Construction Building Materials* (2012); 29,504-511.
- [33] Detphan S., Hanjitsuwan S., Pangdaeng S., Phoo-ngernkham T., N. Damrongwiriyanupap, A. Wongs, P. Sukontasukkul, P. Chindaprasirt, Hybrid alkali-activated fly ash-Portland cement binders with modified polymer as patch repair, *Construction Building Materials* (2024); 436,136776.
- [34] Xue L., Zhang Z., Walkley B., Liu H., Jiang Y., Wang H., Retarding effect of gypsum for hybrid alkali-activated cements (HAACs) at ambient temperature, *Mater Today Commun* (2023); 35,106182.
- [35] Tao JC., Wang XZ., Yao B., Pei WW., Jiren G., He WQ., Li L., Comparison of rheology and durability of geopolymer and Portland cement concrete at the same strength levels, *Construction Building Materials* (2025); 461,139958.
- [36] Benli A., Bayraktar OY., Karataş M., Bodur B., Yılmazoğlu MU., Kaplan G., Dunite powder as a green precursor in one-part alkali-activated composites: Effects on mechanical and durability properties, *Sustainable Chemistry Pharmacy* (2025); 44,101964.
- [37] Xue L., Zhang Z., Wang H., Hydration mechanisms and durability of hybrid alkaline cements (HACs): A review, *Construction Building Materials* (2021); 266,121039.
- [38] Garcia-Lodeiro I., Fernández-Jiménez A., Palomo A., Hydration kinetics in hybrid binders: Early reaction stages, *Cement Concrete Composites* (2013); 39,82-92.
- [39] Angulo-Ramírez DE., de Gutiérrez RM., Puertas F., Alkali-activated Portland blast-furnace slag cement: Mechanical properties and hydration, *Construction Building Materials* (2017); 140,119-128.
- [40] Qu B., Martin A., Pastor J., Palomo A., Fernández-Jiménez A., Characterisation of pre-industrial hybrid cement and effect of pre-curing temperature, *Cement Concrete Composites* (2016); 73,281-288.
- [41] Bodur B., Benli A., Bayraktar OY., Alcan HG., Kaplan G., Aydın AC., Impact of attapulgite and basalt fiber additions on the performance of pumice-based foam concrete: mechanical, thermal, and durability properties, *Archives of Civil Mechanical Engineering* (2025); 25(2),74.

- [42] Koksall F., Yıldırım MS., Benli A., Gencil O., Hybrid effect of micro-steel and basalt fibers on physico-mechanical properties and durability of mortars with silica fume, *Case Studies in Construction Materials* (2021); 15,e00649.
- [43] Koksall F., Kocabeyoglu ET., Gencil O., Benli A., The effects of high temperature and cooling regimes on the mechanical and durability properties of basalt fiber reinforced mortars with silica fume, *Cement Concrete Composites* (2021); 121,104107.
- [44] Bayraktar OY., Kaplan G., Gencil O., Benli A., Sutcu M., Physico-mechanical, durability and thermal properties of basalt fiber reinforced foamed concrete containing waste marble powder and slag, *Construction Building Materials* (2021); 288,123128.
- [45] Gencil O., Nodehi M., Bayraktar OY., Kaplan G., Benli A., Gholampour A., Ozbakkaloglu T., Basalt fiber-reinforced foam concrete containing silica fume: An experimental study, *Construction Building Materials* (2022); 326,126861.
- [46] Bayraktar OY., Yazar G., Benli A., Kaplan G., Gencil O., Sutcu M., Kozłowski M., Kadela M., Basalt fiber reinforced foam concrete with marble waste and calcium aluminate cement, *Struct Concrete* (2023); 24(1),1152-1178.
- [47] Wu R., Gu Q., Gao X., Luo Y., Zhang H., Tian S., Ruan Z., Huang J., Effect of basalt fibers and silica fume on the mechanical properties, stress-strain behavior, and durability of alkali-activated slag-fly ash concrete, *Construction Building Materials* (2024); 418,135440.
- [48] Raza A., Alashker Y., Azab M., Abdallah M., Barakat O., Elhadi KM., Development of eco-friendly alkali-activated nanocomposites comprising micro-fibers at ambient curing conditions, *Case Studies in Construction Materials* (2022); 17,e01540.
- [49] Shoaie P., Ghassemi P., Ameri F., Musaei HR., Ban CC., Ozbakkaloglu T., Comparative study on the effect of fiber type and content on the fire resistance of alkali-activated slag composites, *Construction Building Materials* (2021); 288,123136.
- [50] Kılıç D., Öz A., Benli A., Tortum A., Kaplan G., Aydın AC., Integration of reclaimed asphalt aggregates into glass fiber-reinforced alkali-activated composites: Mechanical performance and durability, *Construction Building Materials* (2025); 458,139645.
- [51] Benli A., Öz A., Kılıç D., Tortum A., Yıldız İ., Kaplan G., Sustainable fly ash-based geopolymer composites: The influence of RAP aggregates and silica fume on strength, durability, and microstructural properties, *Struct Concrete* (2025).
- [52] Öz A., Kılıç D., Benli A., Tortum A., Kaplan G., Aydın AC., Sustainable use of waste marble powder and reclaimed asphalt pavement as aggregates in slag/metakaolin-based

self-compacting geopolymer composites: Properties and durability, *Sustainable Chemistry Pharmacy* (2024); 42,101876.

[53] Rivera O., Long W., Weiss Jr C., Moser R., Williams B., Torres-Cancel K., Gore E., Allison P., Effect of elevated temperature on alkali-activated geopolymeric binders compared to portland cement-based binders, *Cement Concrete Research* (2016); 90,43-51.

[54] Provis JL., Alkali-activated materials, *Cement concrete research* (2018); 114,40-48.

[55] Davidovits J., *Geopolymer chemistry and applications*, Geopolymer Institute 2008.

[56] Glukhovskiy V., Rostovskaja G., Rumyna G., High strength slag-alkaline cements, *Proceedings of the seventh international congress on the chemistry of cement*, (1980); pp. 164-168.

[57] Gebregziabihier BS., Thomas R., Peethamparan S., Very early-age reaction kinetics and microstructural development in alkali-activated slag, *Cement concrete composites* (2015); 55,91-102.

[58] Provis JL., Alkali-activation of calcined clays—past, present and future, *Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete*, Springer, (2017); pp. 372-376.

[59] Nuryadı H., Özşahin B., Çelik ve Karma Taşıyıcı Sistemli Sanayi Bina Örneklerinin Kaba Yapım Maliyetlerinin Trakya Bölgesi için Karşılaştırılması, *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi* (2023); 9(2),418-442.

[60] Habert G., Miller SA., John VM., Provis JL., Favier A., Horvath A., Scrivener KL., Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries, *Nature Reviews Earth Environmental Research*(2020); 1(11),559-573.

[61] Krausmann F., Lauk C., Haas W., Wiedenhofer D., From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900–2015, *Global environmental change* (2018); 52,131-140.

[62] Provis JL., Bernal SA., Geopolymers and related alkali-activated materials, *Annual Review of Materials Research* (2014); 44(1),299-327.

[63] Yurt Ü., Bekar F., Comparative study of hazelnut-shell biomass ash and metakaolin to improve the performance of alkali-activated concrete: A sustainable greener alternative, *Construction Building Materials* (2022); 320,126230.

- [64] Lian C., Wang Y., Liu S., Hao H., Hao Y., Experimental study on dynamic mechanical properties of fly ash and slag based alkali-activated concrete, *Construction Building Materials* (2023); 364,129912.
- [65] Provis JL., Van Deventer JSJ., *Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications*, Elsevier 2009.
- [66] Balun B., Alkalilerle aktive edilmiş bitlis yöresi pomzası içeren hibrit bağlayıcıların üretilebilirliğinin incelenmesi, (2019).
- [67] Chiossi I., Argille calcinate ad attivazione alcalina per lo sviluppo di nuovi leganti idraulici a basso impatto ambientale.
- [68] Garcia-Lodeiro I., Palomo A., Fernández-Jiménez A., An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders, *Handbook of alkali-activated cements, mortars concretes* (2015); 19-47.
- [69] Shi C., Roy D., Krivenko P., *Alkali-activated cements and concretes*, CRC press 2003.
- [70] Fernández-Jiménez A., Palomo J., Puertas F., Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour, *Cement concrete research* (1999); 29(8),1313-1321.
- [71] Aydın S., Baradan B., Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars, *Composites Part B: Engineering* (2014); 57,166-172.
- [72] Bilim C., Karahan O., Atiş CD., Ilkentapar S., Influence of admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars subjected to different curing conditions, *Materials Design* (2013); 44,540-547.
- [73] Collins F., Sanjayan JG., Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete, *Cement concrete research* (1999); 29(3),455-458.
- [74] Fernandez-Jimenez A., Flores E., Maltseva O., Garcia-Lodeiro I., Palomo A., Hybrid alkaline cements: Part III. Durability and industrial applications, *Romanian Journal of Materials* (2013); 43(2),68-73.
- [75] Bernal SA., De Gutiérrez RM., Pedraza AL., Provis JL., Rodriguez ED., Delvasto S., Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes, *Cement concrete research* (2011); 41(1),1-8.
- [76] Awoyera P., Adesina A., Durability properties of alkali activated slag composites: short overview, Springer, 2020.

- [77] Ye H., Chen Z., Huang L., Mechanism of sulfate attack on alkali-activated slag: The role of activator composition, *Cement concrete research* (2019); 125,105868.
- [78] Carabba L., Moricone R., Scarponi GE., Tugnoli A., Bignozzi MC., Alkali activated lightweight mortars for passive fire protection: A preliminary study, *Construction building materials* (2019); 195,75-84.
- [79] Rovnaník P., Bayer P., Rovnaníková P., Characterization of alkali activated slag paste after exposure to high temperatures, *Construction Building Materials* (2013); 47,1479-1487.
- [80] Bakharev T., Sanjayan J., Cheng YB., Resistance of alkali-activated slag concrete to carbonation, *Cement Concrete Research* (2001); 31(9),1277-1283.
- [81] He J., Gao Q., Wu Y., He J., Pu X., Study on improvement of carbonation resistance of alkali-activated slag concrete, *Construction Building Materials* (2018); 176,60-67.
- [82] Pacheco-Torgal F., Abdollahnejad Z., Camões A., Jamshidi M., Ding Y., Durability of alkali-activated binders: a clear advantage over Portland cement or an unproven issue?, *Construction Building Materials* (2012); 30,400-405.
- [83] Shahrajabian F., Behfarnia K., The effects of nano particles on freeze and thaw resistance of alkali-activated slag concrete, *Construction building materials* (2018); 176,172-178.
- [84] Sevim UK., Colemanite ore waste concrete with low shrinkage and high split tensile strength, *Materials Structures* (2011); 44,187-193.
- [85] Hajjaji W., Andrejkovičová S., Zanelli C., Alshaaer M., Dondi M., Labrincha J., Rocha F., Composition and technological properties of geopolymers based on metakaolin and red mud, *Materials Design* (2013); 52,648-654.
- [86] Bingöl Ş., Çavdar A., A new nomogram proposal to determine concrete compressive strength by combined nondestructive testing methods, *Research in Nondestructive Evaluation* (2018); 29(1),1-17.
- [87] Büchel KH., Moretto HH., Werner D., *Industrial inorganic chemistry*, John Wiley & Sons 2008.
- [88] Fifinatasha S., Al Bakri AM., Kamarudin H., Zarina Y., Rafiza A., Liyana J., Reviews on the different sources materials to the geopolymer performance, *Adv. Environ. Biol* (2013); 7(12),3835-3842.

- [89] Pacheco-Torgal F., Castro-Gomes J., Jalali S., Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products, *Construction building Materials* (2008); 22(7),1305-1314.
- [90] van Deventer JS., Provis JL., Duxson P., Lukey GC., Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products, *J Hazard Mater* (2007); 139(3),506-13.
- [91] Rashad AM., Mosleh YA., Gharieb M., Preparatory Study about Effect of Feldspar on properties of Alkali-activated slag concrete, *ACI Materials Journal* (2023); 120(2),53-63.
- [92] Liu M., Zhang Y., Wang C., Ma Z., Reusing thermoactivated waste paste/concrete powder for sustainable alkali-activated materials: Effects of thermoactivated temperature, *Construction Building Materials* (2024); 437,136973.
- [93] Ouellet-Plamondon C., Habert G., Life cycle assessment (LCA) of alkali-activated cements and concretes, *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*, Elsevier (2015); pp. 663-686.
- [94] Kumar KA., Shetty KK., Selvaraj R., Vinayagam R., Samanth A., Manganese metal ion removal from aqueous solution using industrial wastes derived geopolymer, *Environmental Nanotechnology, Monitoring Management* (2024); 22,100999.
- [95] Provis JL., Bernal SA., Geopolymers and related alkali-activated materials, *Annual Review of Materials Research* (2014); 44(1),299-327.
- [96] Siddique R., Klaus J., Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review, *Appl Clay Sci* (2009); 43(3-4),392-400.
- [97] Kop M., Yazıcıoğlu S., Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cüruf Esaslı Geopolimer Harçların Isıl Kür Ortamında Mekanik Özellikleri, *Gazi University Journal of Science Part C: Design Technology* (2023); 11(3),756-765.
- [98] Balçıkanlı M., Özbay E., Türker HT., ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ HARÇLARIN ÇEKİP ÇIKARMA VE AŞINMA DİRENÇLERİNİN BELİRLENMESİ, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* (2015); 4(2),87-98.
- [99] Roy DM., Alkali-activated cements opportunities and challenges, *Cement concrete research* (1999); 29(2),249-254.
- [100] Krishna R., Mishra J., Adetayo A., Das S., Mustakim S., Green Synthesis of High-performance Graphene Reinforced Geopolymer Composites: A Review on Environment-

Friendly Extraction of Nanomaterials, Iranian journal of materials science engineering (2020);17(4).

[101] Bakharev T., Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing, Cement concrete research (2005); 35(6),1224-1232.

[102] H. Xu, J. Van Deventer, The geopolymerisation of alumino-silicate minerals, International journal of mineral processing (2000); 59(3),247-266.

[103] Abubakr A., Soliman A., Diab S., Effect of activator nature on the impact behaviour of Alkali-Activated slag mortar, Construction Building Materials (2020); 257,119531.

[104] Torlak İ., Yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufunun farklı kompozisyonlarda beton üretiminde kullanımının araştırılması= Investigation of the usage of blast furnace slag and steel slag in different compositions in concrete production, Sakarya Üniversitesi, 2023.

[105] Koca C., Yüksek performanslı beton üretiminde mikrosilis, curuf, klinker karışımı çimento kullanımı. 4, Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul (1996); 381-394.

[106] Pal S., Mukherjee A., Pathak S., Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete, Cement concrete research (2003); 33(9),1481-1486.

[107] Kaya M., Koksall F., Gencel O., Munir MJ., Kazmi SMS., Influence of micro Fe₂O₃ and MgO on the physical and mechanical properties of the zeolite and kaolin based geopolymer mortar, Journal of building Engineering (2022); 52,104443.

[108] Damtoft JS., Lukasik J., Herfort D., Sorrentino D., Gartner EM., Sustainable development and climate change initiatives, Cement concrete research (2008); 38(2),115-127.

[109] Juenger M., Winnefeld F., Provis JL., Ideker J., Advances in alternative cementitious binders, Cement concrete research (2011);41(12),1232-1243.

[110] Zhou W., Yan C., Duan P., Liu Y., Zhang Z., Qiu X., Li D., A comparative study of high-and low-Al₂O₃ fly ash based-geopolymers: The role of mix proportion factors and curing temperature, Materials Design (2016); 95,63-74.

[111] Habert G., De Lacaillerie JDE., Roussel N., An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends, Journal of cleaner production (2011); 19(11),1229-1238.

- [112] Lokuge W., Wilson A., Gunasekara C., Law DW., Setunge S., Design of fly ash geopolymer concrete mix proportions using Multivariate Adaptive Regression Spline model, *Construction Building Materials* (2018); 166,472-481.
- [113] Bingöl Ş., Farklı cüruf türlerinden geopolimer harç üretimi, *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi* (2022); 4(2),173-178.
- [114] Gürsel E., Erenson C., AGREGA TÜRÜ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ.
- [115] Alsaif A., Alshannag M., Flexural behavior of portland cement mortars reinforced with hybrid blends of recycled waste fibers, *Sustainability-Basel* (2022); 14(20),13494.
- [116] ASTM C109/C109M-20, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens) ASTM International, West Conshohocken, PA., 2020.
- [117] ASTM C597, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, Am. Soc. Test. Mater. West Conshohocken, PA, USA. (2016) 1–4. <https://doi.org/10.1520/C0597-09>.
- [118] ASTM, ASTM C348 - 19 Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars. ASTM International, West Conshohocken, PA., 2019.
- [119] O. Şinik, Geopolimer betonlarda dayanıklılık özelliklerinin araştırılması, 2019.
- [120] Bayraktar OY., Özel HB., Benli A., Yılmazoğlu MU., Türkel İ., Dal BB., Şevik H., Kaplan G., Sustainable foam concrete development: Enhancing durability and performance through pine cone powder and fly ash incorporation in alkali-activated geopolymers, *Construction Building Materials* (2024); 457,139422.
- [121] Bayraktar OY., Bozkurt TH., Benli A., Koksall F., Türkoğlu M., Kaplan G., Sustainable one-part alkali activated slag/fly ash Geo-SIFCOM containing recycled sands: Mechanical, flexural, durability and microstructural properties, *Sustainable Chemistry Pharmacy* (2023); 36,101319.
- [122] Amer I., Kohail M., El-Feky M., Rashad A., Khalaf MA., Characterization of alkali-activated hybrid slag/cement concrete, *Ain Shams Engineering Journal* (2021); 12(1),135-144.
- [123] Turkoglu M., Bayraktar OY., Benli A., Kaplan G., Effect of cement clinker type, curing regime and activator dosage on the performance of one-part alkali-activated hybrid slag/clinker composites, *Journal of Building Engineering* (2023); 68,106164.

- [124] Jia R., Wang Q., Luo T., Investigation of the relationship among the hydration, microstructure and compressive strength of alkali-activated phosphorus slag, *J Build Eng* (2023); 76,107293.
- [125] Wang Z., Park S., Khalid HR., Lee H., Hydration properties of alkali-activated fly ash/slag binders modified by MgO with different reactivity, *Journal of Building Engineering* (2021); 44,103252.
- [126] Yang T., Fan X., Gao X., Gu Q., Xu S., Shui Z., Modification on the chloride binding capacity of alkali activated slag by applying calcium and aluminium containing phases, *Construction Building Materials* (2022); 358,129427.
- [127] Punurai W., Kroehong W., Saptamongkol A., Chindaprasirt P., Mechanical properties, microstructure and drying shrinkage of hybrid fly ash-basalt fiber geopolymer paste, *Construction Building Materials* (2018); 186,62-70.
- [128] Wei J., Yang Q., Jiang Q., Li X., Liu S., Li K., Wang Q., Mechanical properties of basalt fiber reinforced ambient-cured lightweight expanded polystyrene geopolymer concrete, *J Build Eng* (2023); 80,108072.
- [129] Dener M., Kılıç H., Benli A., Enhancing mechanical performance of one-part sodium sulfate-activated slag mortars using calcium-rich materials, *Construction Building Materials* (2025); 476,141285.
- [130] Shen J., Li Y., Lin H., Lv J., Feng S., Ci J., Early properties and chemical structure analysis of alkali-activated brick geopolymer with varied alkali dosage, *J Build Eng* (2022); 60,105186.
- [131] Chen W., Li B., Wang J., Thom N., Effects of alkali dosage and silicate modulus on autogenous shrinkage of alkali-activated slag cement paste, *Cement Concrete Research* (2021); 141,106322.
- [132] Si R., Zhan Y., Zang Y., Sun Y., Huang Y., Effect of basalt fiber on fracture properties and drying shrinkage of alkali-activated slag with different silicate modulus, *Journal of Materials Research Technology* (2023); 25,552-569.
- [133] Wang J., Lai J., Lu L., Lin C., Wang W., Xie X., Zhuang R., Luo Q., Effect of CaO/Na₂SiO₃ ratio on mechanical properties, microstructures and environmental leaching characteristics of neutralization slag based geopolymers, *Case Stud Constr Mat* (2024); 20,e03021.
- [134] Ariffin M., Bhutta M., Hussin M., Tahir MM., Aziah N., Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete, *Construction building materials* (2013); 43,80-86.

- [135] Khan HA., Castel A., Khan MS., Corrosion investigation of fly ash based geopolymer mortar in natural sewer environment and sulphuric acid solution, *Corrosion Science* (2020); 168,108586.
- [136] Mohamed OA., Effect of immersing geopolymer slag-fly ash mortar in sulfuric acid on strength development and stability of mass, *Construction Building Materials* (2022); 341,127786.
- [137] Huseien GF., Asaad MA., Abadel AA., Ghoshal SK., Hamzah HK., Benjeddou O., Mirza J., Drying shrinkage, sulphuric acid and sulphate resistance of high-volume palm oil fuel ash-included alkali-activated mortars, *Sustainability-Basel* (2022); 14(1),498.
- [138] Ye H., Yang G., Fu C., Effect of dolomite filler on the sulfuric acid resistance of alkali-activated slag binders, *J Mater Civil Eng* (2021); 33(9),04021219.
- [139] Sun K., Ali HA., Xuan D., Poon CS., Sulfuric acid resistance behaviour of alkali-activated slag and waste glass powder blended precursors, *Cement Concrete Composites* (2024); 145,105319.
- [140] Wang Y., Cao Y., Zhang Z., Zhang P., Ma Y., Wang A., Wang H., Intrinsic sulfuric acid resistance of C-(N)-ASH and NASH gels produced by alkali-activation of synthetic calcium aluminosilicate precursors, *Cement Concrete Research* (2023); 165,107068.
- [141] Ren B., Chai L., Liu Y., Ma R., Liu Z., Wang Y., Performance optimization design of high ductility cement-based alkali-activated municipal solid waste incineration fly ash composite for rapid repair material, *Construction Building Materials* (2023); 404,133301.
- [142] Chindaprasirt P., Sriopas B., Phosri P., Yoddumrong P., Anantakarn K., Kroehong W., Hybrid high calcium fly ash alkali-activated repair material for concrete exposed to sulfate environment, *Journal of Building Engineering* (2022); 45,103590.
- [143] Han S., Chen K., Meng F., Gao Y., Li J., Lin L., Qin W., Jiang J., pH-controlled sulfuric acid washing enhancing heavy metal stabilization in lightweight aggregate production from municipal solid waste incineration fly ash, *J Clean Prod* (2023); 430,139774.
- [144] Qu F., Li W., Wang K., Zhang S., Sheng D., Performance deterioration of fly ash/slag-based geopolymer composites subjected to coupled cyclic preloading and sulfuric acid attack, *Journal of Cleaner Production* (2021); 321,128942.