

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

**DÜŞÜK SICAKLIKLARDA KÜR EDİLEN ALKALİ AKTİVE
EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN CÜRUFU/PORTLAND ÇİMENTOLU
HARÇLARIN SÜLFAT DİRENCİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AHMET HAKAN TAŞDÖĞEN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI

Doç. Dr. Ahmet BENLİ

BİNGÖL-2025



T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜŞÜK SICAKLIKLARDA KÜR EDİLEN ALKALİ AKTİVE EDİLMİŞ
YÜKSEK FIRIN CÜRUFU/PORTLAND ÇİMENTOLU HARÇLARIN SÜLFAT
DİRENCİ

Doç. Dr. Ahmet BENLİ danışmanlığında, Selda KILIÇ tarafından hazırlanan bu çalışma 14/10/2025 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.

Çalışmamda ve sunum sürecinde değerli tecrübeleri ile bilgileri yardımıyla verimli bir şekilde ilerlememi sağlayan Sayın Prof. Dr. Mehmet KARATAŞ 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 kıymetli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet Hakan TAŞDÖĞEN
BİNGÖL-2025

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
2.1. Alkali Aktif Hibrit Harç Bileşenleri.....	4
2.1.1. Hibrit Harç	4
2.1.1.1. Yüksek Fırın Cürufu	4
2.1.1.2. Alkali Aktivatörler	5
2.1.1.2.1. Sodyum Hidroksit.....	5
2.1.1.2.2. Sodyum Silikat	5
2.1.1.3. Portland Çimento	5
2.1.1.4. Agregalar	6
2.1.1.5. Su	6
2.1.1.6. Magnezyum Sülfat	7
3. ALKALİ-AKTİF BAĞLAYICILAR	8
3.1. Alkali Aktivatörler	9
3.2. Alkali-Aktif Malzemenin Üretimi.....	10
3.3. Çevresel Etkileri.....	11
3.4. Alkali-Aktif Bağlayıcılar İçin Öncü Malzemeler	13
3.4.1. Alüminosilikat Esaslı Malzemeler	13
3.5. Alkali-Aktif Bağlayıcıların Kür Koşulları.....	15
4. ALKALİ-AKTİF YÜKSEK FIRIN CÜRUFU	17

4.1. Yüksek Fırın Cürufu (YFC).....	19
4.2. Normal Sıcaklıklarda Alkali-Aktif Cüruf Üretimi.....	20
4.3. Düşük Sıcaklıklarda Alkali-Aktif Cüruf Üretimi.....	22
4.4. Yüksek Sıcaklıklarda Alkali-Aktif Cüruf Üretimi.....	25
5. MATERYAL VE YÖNTEM	28
5.1.Kullanılan Malzemeler	29
5.1.1.Yüksek Fırın Cürufu.....	29
5.1.2. Portland Çimentosu	30
5.1.3. Alkali Aktivatörler	31
5.1.3.1. Sodyum Hidroksit.....	31
5.1.3.2. Sodyum Silikat.....	32
5.1.4. Agrega	33
5.1.5. Doğal Su Kaynağı	33
5.1.6. Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$)	34
5.2. Karışım Oranları ve Numunelerin Hazırlanması	34
5.2.1. Karışım Oranları.....	34
5.2.2. Numunelerin Hazırlanışı.....	35
5.3. Gerçekleştirilen Deneyler	36
5.3.1. Basınç Deneyi	37
5.3.2. Ultrases Hız Ölçümü (UPV).....	38
5.3.3. Kütle Değişimi	39
5.3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	39
5.3.5. Sülfat Saldırısı.....	40
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	41
6.1. Basınç Dayanım Deneyi Sonuçları	41
6.2. Ultrasonik Ses Hız Ölçümü	48
6.3. SEM Gözlemleri.....	51
6.4. Sülfat Etkisi Sonrası Deney Sonuçları	62
6.4.1. Sülfat Etkisi Sonrası Basınç Dayanım Davranışı.....	62
6.4.2. Sülfat Etkisi Sonrası Ultrasonik Hız Ölçümü (UPV).....	66

6.4.3. Sülfat Etkisi Sonrası Kütle Artışı.....	68
6.4.4. Sülfat Etkisi Sonrası SEM gözlemleri.....	71
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	80
KAYNAKLAR.....	83

SİMGELER VE ŞEKİLLER 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 Oksit
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 5.1. YFC Kümülatif Hacim b-) YFC yoğunluk c-) YFC SEM Görüntüsü.....	29
Şekil 5.2. Hazırlanan Numune Örneği.....	36
Şekil 5.3. Basınç Dayanım Cihazı.....	38
Şekil 5.4. UPV Cihazı.....	39
Şekil 6.1. Basınç Dayanım Grafiği.....	48
Şekil 6.2. Ultrases Hız Ölçüm Grafiği.....	49
Şekil 6.3. Ultrases Hız Ölçüm ve Basınç Dayanım Arasındaki Korelasyon Grafiği	51
Şekil 6.4. M1.4D6P0 karışımının SEM görüntüsü.....	52
Şekil 6.5. M1.4D6P20 karışımının SEM görüntüsü.....	54
Şekil 6.6. M1.4D8P0 karışımının SEM görüntüsü.....	57
Şekil 6.7. M1.4D8P20 karışımının SEM görüntüsü.....	59
Şekil 6.8. M1.4D10P0 karışımının SEM görüntüsü.....	60
Şekil 6.9. M1.4D10P20 karışımının SEM görüntüsü.	62
Şekil 6.10. a-) Sülfat Etkisi Sonrası Basınç Dayanımı b-) SES Sonrası Basınç D.D.....	66
Şekil 6.11. Sülfat Etkisi Sonrası Ultrases Hız Grafiği.....	68
Şekil 6.12. Sülfat Etkisi Sonrası Kütle Artışı Grafiği.....	70
Şekil 6.13. Sülfat maruziyetinden sonra M1.4D6P0 karışımının SEM görüntüsü	72
Şekil 6.14. Sülfat maruziyetinden sonra M1.4D6P20 karışımının SEM görüntüsü.....	73
Şekil 6.15. Sülfat maruziyetinden sonra M1.4D8P0 karışımının SEM görüntüsü	75
Şekil 6.16. Sülfat maruziyetinden sonra M1.4D8P20 karışımının SEM görüntüsü.....	76
Şekil 6.17. Sülfat maruziyetinden sonra M1.4D10P0 karışımının SEM görüntüsü.....	78
Şekil 6.18. Sülfat maruziyetinden sonra M1.4D10P20 karışımının SEM görüntüsü.....	79

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 5.1. YFC ve PÇ'nin kimyasal bileşimleri (ağırlıkça%).....	28
Tablo 5.2. PÇ Kimyasal Bileşimi	31
Tablo 5.3. Karışım Oranları	34
Tablo 5.4. Yapılan Deneyler	37

DÜŞÜK SICAKLIKLARDA KÜR EDİLEN ALKALİ AKTİVE EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN CÜRUFU/PORTLAND ÇİMENTOLU HARÇLARIN SÜLFAT DİRENCİ

ÖZET

Soğuk hava beton dökümlerinde, don öncesi önlemler ve geleneksel çimento bazlı malzemelerin kullanımındaki sınırlamalar nedeniyle yüksek enerji talepleri ve CO₂ emisyonlarıyla ilişkilidir. Bu çalışma, düşük sıcaklıkta inşaat için sürdürülebilir bir çözüm olarak hibrit alkali-aktivasyonlu cüruf/Portland çimentosu (AACPC) harçlarını sunmaktadır. Portland Çimentosu (PÇ) yerine geçirme oranlarının (%0, %10 ve %20) ve farklı alkali aktivatör dozajlarının (AD) (%6, %8 ve %10) mekanik performans, mikroyapısal özellikler ve dayanıklılık üzerindeki etkileri, 0°C' lik bir kürleme sıcaklığında değerlendirilmiştir. Hibrit karışımlar, saf alkali-aktivasyonlu cüruf (AAC) sistemlerine kıyasla mukavemet gelişimi ve sülfat direncinde önemli iyileşmeler göstermiştir. %20 PÇ ve %8 AD' ye sahip bir karışım, 90 günde en yüksek basınç dayanımını olan 66,88 MPa' la ulaşmıştır. Daha düşük PÇ içeriği (%10) ile bu karışım, sülfat maruziyeti altında üstün bir dayanıklılık sergileyerek 90 gün sonunda yalnızca %4,19'luk bir mukavemet kaybı yaşarken, saf cüruf sistemlerinde bu kayıp %10,6'ya kadar çıkmıştır. Saf granüle edilmiş yüksek fırın cürufu (GYFC) karışımları, %8 AD ile 90 günde 58,37 MPa' la ulaşarak, soğuk iklimlerde alkali aktivasyonunun potansiyelini göstermektedir. Ultrasonik darbe hızı (UPV) sonuçları, hibrit karışımlarda gelişmiş matris yoğunlaşmasını doğrulamış ve yüksek değerler, erken kürleme aşamalarında basınç dayanımı ile güçlü bir şekilde ilişkilendirilmiştir. Tarama elektron mikroskobu (SEM) analizleri, hibrit karışımlarda, özellikle %10-20 PC içeren sistemlerde, mukavemet ve dayanıklılık için kritik olan yoğun bir kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum-alüminosilikat-hidrat (C-A-S-H) jel ağı ortaya koymuştur. Bu jeller, 0°C' de boşlukları azaltarak mikro çatlakları engellemiştir. Ancak, aşırı AD (%10) alkali zengin fazların oluşumuna yol açarak uzun vadeli dayanımı düşürmüştür. Bu araştırma, cüruf aktivasyonu ve PÇ hidratasyonunun sinerjik etkilerinden yararlanarak, dışarıdan ısıtma ve kimyasal katkılara olan bağımlılığı azaltırken enerji verimli ve dayanıklı soğuk hava inşaatı için hibrit alkali-aktivasyonlu harçların uygulanabilirliğini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Alkali-aktivasyonlu cüruf, Portland çimentosu, Düşük sıcaklık kürlemesi, Sülfat direnci, Aktivatör dozajları.

THE SULFATE RESISTANCE OF MORTAR MADE FROM LOW-TEMPERATURE CURED ALKALINE ACTIVATED HIGH FURNACE SLAG / PORTLAND CEMENT

ABSTRACT

Cold weather concreting is associated with high energy demands and CO₂ emissions, driven by frost-prevention measures and limitations in using traditional cementitious materials. This study presents hybrid alkali-activated slag/Portland cement (PC) mortars as a sustainable solution for low-temperature construction. The effects of PC substitution (0%, 10%, and 20%) and varying alkali activator dosages (6%, 8%, and 10%) on mechanical performance, microstructural properties, and durability were evaluated at a curing temperature of 0°C. Hybrid mixtures demonstrated significant improvements in strength development and sulfate resistance compared to pure alkali-activated slag systems. A mixture containing 20% PC and 8% activator dosage achieved the highest compressive strength of 66.88 MPa at 90 days. At lower PC contents (10%), the blend exhibited superior durability under sulfate exposure, with only a 4.19% strength reduction after 90 days, compared to pure slag systems which experienced up to 10.6% strength loss. Pure granulated blast furnace slag (GBFS) mixtures activated with 8% alkali dosage reached 58.37 MPa at 90 days, demonstrating the potential of alkali activation in cold climates. Ultrasonic pulse velocity (UPV) results confirmed improved matrix densification in hybrid mixtures, with higher values correlating strongly with compressive strength at early curing stages. Scanning electron microscopy revealed a dense network of calcium silicate hydrate (C-S-H) and calcium-aluminosilicate-hydrate (C-A-S-H) gels, crucial for strength and durability, particularly in systems with 10–20% PC. These gels mitigated voids and reduced micro cracks at 0°C. However, excess alkali dosage (10%) led to the formation of alkali-rich phases, which reduced long-term strength. This research highlights the feasibility of hybrid alkali-activated mortars for energy-efficient and durable cold-weather construction, leveraging the synergistic effects of slag activation and PC hydration while reducing the reliance on external heating and chemical additives.

Keywords: Alkali-activated slag; Portland cement content, Low temperature curing, Sulfate resistance, Activator dosages.

1. GİRİŞ

Her geçen yılda artan nüfusla beraber insanların yerleşik hayata geçmesi sonucu konut, hastane, sağlık ocakları, nüfus oranlarının artmasına istinaden gelişmiş otogar, havalimanı, üniversite ve üniversitelerin öğrenci nüfuslarına oranla betonarme ana bileşenli yapı ihtiyacı artmaktadır. Sayılan bu ihtiyaçlar doğrultusunda betonarme ve betonarmenin ana bileşenlerinden biri olan çimento ihtiyacı da artmıştır ve artmaya da devam etmektedir.

Soğuk hava koşullarında beton dökme işlemi, hala zorluklardan muaf değildir, ancak bu, bazen o belirli zamanı beklemenin kaçınılmaz bir şey olabileceği anlamına gelmez. Özellikle proje teslim tarihlerine ve programlamaya veya diğer lojistik meselelerle ilgili olarak [1, 2]. Beton teknolojisindeki ilerlemeler sayesinde, beton inşaat faaliyetleri soğuk hava koşullarında bile mümkün hale gelmiştir, bu da bir inşaat projesinin tamamlanma süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır [3, 4]. Soğuk hava betonlama teknolojisinin aciliyeti, aynı zamanda doğal afetler ve felaket kazalarından zarar gören temel altyapının hızlı bir şekilde onarılmasını sağlama yeteneğiyle de kendini göstermektedir [5]. Düşük kürlenme sıcaklıkları, Portland Çimento (PÇ) kompozitlerinin mühendislik özelliklerini zayıflatabilir [5-7]. PÇ için ideal kürlenme sıcaklığı 10 ile 20°C arasındadır. Bu sıcaklıklarda, betonun mekanik dayanımı için gerekli olan optimum hidrasyon koşulları elde edilir. Bu nedenle, 5°C, PÇ' nin hidrasyon sürecinin normal şekilde devam etmesine izin veren minimum sıcaklıktır; bunun altındaki sıcaklıklarda hidrasyon reaksiyonu yavaşlar ve betonda güç kazanımı yavaş gerçekleşir. Bu nedenle, PÇ, özel önlemler alınmadıkça kış koşulları için uygun değildir [8]. Sıcak barınaklar ve yalıtım malzemelerinin inşası gibi koruyucu önlemler, normal hidrasyonu sağlamak için verimli ve sağlam yollar olabilir [9, 10]. Ancak bu karmaşık işlemler, proje maliyetlerini önemli ölçüde artırır. Kış inşaatı sırasında alınan mevcut önlemler iki kategoriye ayrılabilir [11, 12]. Betonun mükemmel bir kürlenme sıcaklığında saklanması, en iyi yöntemdir. Optimum soğuk hava dayanıklılığı sağlamak amacıyla, bu hammaddeler karıştırılmadan ve döküm yapılmadan önce ısıtılmalıdır. Beton, tasarım özelliklerine ulaşana kadar ılıman bir ortam sağlamak için sıcak barınak inşası ve elektrikli battaniye kullanımı gibi yöntemler yaygın olarak kullanılır [13]. Ancak bu sıcaklık bakım yöntemleri oldukça enerji yoğun olup, büyük miktarda karbon di oksit (CO₂) emisyonu üretir. Bir diğer seçenek ise bağlayıcıları

değiştirmek veya betonun daha hızlı dayanım kazanması için kimyasal katkı maddeleri kullanmaktır. Sülfuoalüminat ve magnezyum (Mg) çimentosu gibi bağlayıcılar, düşük sıcaklıklarda iyi performans gösteriyor gibi görünse de bu bağlayıcılar, fiyatları ve kullanılan hammaddelerin daha az bulunabilirliğı nedeniyle çoğunlukla onarım uygulamalarıyla sınırlıdır [14, 15]. Öte yandan, antifriz ile hızlandırıcılar kombinasyonu daha ucuz ve pratik seçenekler olabilir, ancak bu kimyasal katkı maddeleri gelecekte dayanım ve dayanıklılık sorunlarına neden olabilir. Her yıl yaklaşık 4,5 milyar ton CO₂ üretilen çimento, toplam karbon salınımının yaklaşık %8' ini oluşturur. Kendi kendine kürlenene malzemelerin soğuk iklim inşaatında kullanılması, karbon emisyonlarını ve enerji kullanımını azaltmada en önerilen yöntem olacaktır [4]. Mevcut araştırma eğilimleri, alkali-aktif malzemelerin (AAM) geliştirilmesine büyük önem vermektedir, çünkü bu malzemeler, karbon emisyonunun azaltılmasıyla ilgili birçok avantaja sahiptir [16-18]. Uçucu kül [19-21], yüksek fırın cürufu (YFC) [22], metakaolin [22-24] ve doğal puzolanlar, AAM için yaygın olarak kullanılan öncü malzemelerdendir [21, 22, 25-27].

Alkali-aktif Cüruf (AAC), diğere inşaat malzemelerinin aksine, ısıtma olmadan mekanik özellik gereksinimlerini karşılar [28, 29]. Isı aktivasyonu uygulanmadan normal koşullar altında, 60 MPa ile 150 MPa arasında basınç dayanımları elde edebilir [23]. Alkali aktivatör (AA) çözeltisi genellikle birçok serbest iyon içerir ve bu nedenle normalden çok daha düşük bir donma noktasına sahiptir. Çok düşük sıcaklıklar, AAC macunlarının hazırlanmasını desteklemek için genellikle yeterlidir [5].

Zhang ve arkadaşları [13], 28. güne kadar AAC'nin dayanımını değerlendirmek amacıyla PÇ' nin yerini almasının etkilerini inceledikleri bir çalışma yapmışlardır. Kürlenme sıcaklıkları -20°C ile 20°C arasında ilişkilendirilmiştir. Veriler, PÇ ile karıştırılmış AAC bağlayıcılarının, sadece PÇ ile karıştırılmış olanlara göre dayanım açısından daha faydalı olduğunu göstermiştir. Ayrıca hem YFC hem de PÇ içeren bağlayıcı, yalnızca YFC içerenlerden daha iyi performans göstermiştir. Ju ve arkadaşlarının [30] yaptığı çalışmada ise, AAC performansını iyileştirmek için YFC' ye kalsiyum oksit ilave edilmiştir. Kalsiyum oksit (CaO) ile %3 oranında yapılan yer değıştirme ile 1. gün dayanımında %40 artış sağlanmış ve 28. günde %5 artış gözlemlenmiştir.

Zhang ve arkadaşlarının [5] raporuna göre, düşük sıcaklıklarda tutulan AAC numuneleri, ortam koşullarında tamamen kürlenene numunelere kıyasla daha düşük dayanım göstermektedir. Ancak, bu AAC numuneleri daha hızlı bir dayanım gelişimi göstermiştir. Daha önce yapılan raporlar, öncül maddelerin çözünmesinin öncelikle aktivatördeki Alkali Dozajı (AD)' na bağlı olduğunu belirtmiştir [31, 32]. Daha yüksek AD, OH⁻ iyonları ve sistemdeki konsantrasyonu artıracak, bu da öncül parçacıkların daha hızlı çözünmesini ve gözenek çözeltisindeki Silisyum (Si) konsantrasyonunun artmasını sağlayacaktır. Ayrıca, daha yüksek bir aktivatör modülü, suda çözünmüş Si türlerinin mevcudiyetini artırır, bu da daha fazla polimerize olmuş halka ve düzlemler oluşturur ve bu da oluşan jelde ek silisyum oksit (Si-O) köprülemeleri için alan oluşturur [33]. Aktivatör modülü ve AD'nin AAC malzemelerinin hidratasyonu ve dayanımı üzerindeki etkileri üzerine birçok çalışma yapılmıştır. AD'nin artırılması, YFC'nin ağırlığının %2 ile %6'sı arasında dayanımı artırır [34, 35]. Ancak, AD daha da artırılırsa dayanımda düşüşe neden olabilir. Aktivatör modülleri ile dayanım arasındaki ilişki karmaşık bir önemli ilişkidir. Belirli koşul aralıklarında, dayanım modülleri arttıkça, daha fazla silika jeli katkısı sağlanır ve belirtilen aralığın dışındaki yüksek modüller nedeniyle dayanım kaybı daha az olur [35].

Soğuk ortamlarda kürlenene AAC numunelerinin, %2 ile %6 arasında bir AD ve 0,6 ile 1,2 arasında bir aktivatör modülü ile tedavi edilmemesi gerektiği anlaşılmaktadır. Düşük AD, YFC'yi yeterince aktive etmediği için erken dayanımda düşük değerler ve uzun sertleşme süreleri ile sonuçlanır [36]. Ortam koşullarında kürlenene AAC numuneleri için Abubakr ve arkadaşları [32] %6 AD ve 1,2 aktivatör modülü kullanmış ve 3. günde 40 MPa'nın üzerinde bir basınç dayanımı raporlamışlardır. İlk testte, AAC, 2°C' de 1,2 modülü ve %6 AD ile kürlenmiş; ancak 3 gün sonra yetersiz sertlik nedeniyle kalıptan çıkarılamamıştır. Düşük sıcaklıklarda kürlenene AAC'yi güçlendirmek için sistemde daha fazla Ca²⁺ ekleyerek kalsiyum alüminat silikat hidrat (C-(A)-S-H) miktarını artırmak mantıklı bir yaklaşım gibi görünmektedir. PÇ gibi kalsiyum kaynaklarının eklenmesi, basınç dayanımını artırabilir [37, 38]. Gerçekten de PÇ, kalsiyum ile su arasındaki egzotermik kimyasal etkileşimler sayesinde sıcaklığı artırmakla birlikte, kalsiyum içeriğini de artırır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Alkali Aktif Hibrit Harç Bileşenleri

2.1.1. Hibrit Harç

YFC içeren hibrit harçlar, sürdürülebilirlik, dayanım ve dayanıklılık açısından önemli avantajlar sunar. Bu tür harçlar, özellikle çevresel etkilerin azaltılması ve performansın artırılması gereken modern inşaat projelerinde tercih edilir. YFC, demir-çelik üretimi sırasında oluşan ve cam benzeri yapıya sahip granüle bir yan üründür. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu olarak çimento yerine kısmen veya tamamen kullanılabilir. YFC, atık malzeme olduğundan karbon ayak izini düşürür. Sülfatlara ve asitlere karşı daha dirençlidir. Isı ile genleşme davranışı daha dengelidir. Su geçirimsizliği artırır, donma-çözülme dayanımı yüksektir. Erken dayanımı düşük olabilir, ancak uzun vadede yüksek dayanım sağlar. Rötire azalır, çatlama riski düşer.

2.1.1.1. Yüksek Fırın Cürufu

YFC, demir-çelik üretimi sırasında yüksek fırınlarda oluşan ve hızlı soğutulup granüle edilerek öğütüldüğünde hidrolik bağlayıcılık kazanan cam yapılı bir yan üründür. Genellikle çimentoya ikame olarak kullanılan YFC, beton ve harçlarda dayanım, dayanıklılık, su geçirimsizlik ve kimyasal direnç gibi özellikleri artırırken çevresel açıdan da karbon salımını azaltarak sürdürülebilirliğe katkı sağlar. Çimento ile birlikte kullanıldığında uzun vadeli dayanım sağlar, sülfatlara ve zararlı kimyasallara karşı dirençlidir, ısı gelişimi düşük olduğu için kütle beton uygulamalarında tercih edilir. Rengi açık gri veya yeşilimsi olan bu malzeme, tek başına bağlayıcı olarak kullanılmaz; genellikle çimento gibi alkali bir ortamla aktive edilmesi gerekir. YFC, beton, harç, zemin stabilizasyonu, altyapı projeleri ve prefabrik elemanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.1.1.2. Alkali Aktivatörler

2.1.1.2.1. Sodyum Hidroksit

Kimyasal formülü NaOH olan sodyum hidroksit, halk arasında "kostik soda" olarak bilinen sodyum karbonattan elde edilen bir bileşiktir. Ucuz ve kolay bulunabilir olması nedeniyle sodyum hidroksit, birçok endüstri alanında en çok kullanılan maddelerden biri haline gelmiştir. Güçlü bazik özelliklere sahip olan sodyum hidroksit, koyu beyaz renkte toz formunda bir kimyasal maddedir. Yüksek pH değeri (13.5), suda kolayca çözünebilmesi ve kimyasal tepkime kabiliyeti sayesinde sanayide geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu özellikleri sayesinde sabun ve deterjan üretiminden tekstil ve kimya endüstrisine kadar birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.1.1.2.2. Sodyum Silikat

Su camı olarak da bilinen sodyum silikat, $\text{Na}_2(\text{SiO}_2)_n$ O formülüne sahip, sıvı ve katı halde bulunabilen inorganik bir maddedir. Saf sodyum silikat renksiz veya beyazdır; ancak kimyasal ve endüstriyel ortamlarda içerdiği safsızlıklar nedeniyle yeşil veya mavi renkte görünebilir. Bu renk değişimi, bileşiğin saflık derecesi ve içeriğindeki yabancı maddelerin türü hakkında bilgi verebilir. Sodyum silikat; madencilik, su arıtma, temizlik, tekstil ve inşaat gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Silisyum dioksit (SiO_2) ile sodyum karbonatın (Na_2CO_3) yüksek sıcaklıkta reaksiyona girmesiyle üretilir ve bu işlem sırasında karbondioksit (CO_2) gazı açığa çıkar.

2.1.1.3. Portland Çimento

PÇ, yapı sektöründe en yaygın kullanılan hidrolik bağlayıcıdır ve su ile karıştırıldığında priz alarak sertleşir ve dayanıklı bir yapı oluşturur. Genellikle kalker (kireçtaşı) ve kilin yüksek sıcaklıklarda pişirilmesiyle elde edilen klinkerin, az miktarda alçı taşı ile birlikte öğütülmesiyle üretilir. Gri veya beyaz renkte olabilen bu çimento, erken ve nihai dayanımı yüksek olup suya, dona ve basınca karşı oldukça dayanıklıdır. Beton ve harç üretiminde, yapı elemanlarında (kolon, kiriş, temel, döşeme), altyapı projelerinde (baraj, tünel, yol, köprü) ve prefabrik elemanlar ile zemin kaplamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Ayrıca, farklı kullanım alanlarına göre CEM I'den CEM V'e kadar çeşitli tipleri bulunmaktadır.

2.1.1.4. Agregalar

Agregalar, beton ve harç karışımlarında kullanılan doğal veya yapay kökenli kum, çakıl ve kırmataş gibi tane boyutundaki malzemelerdir ve betonun hacimce yaklaşık %60–80'ini oluşturur; dayanım, dayanıklılık ve işlenebilirlik gibi özellikleri doğrudan etkiler. Tane boyutlarına göre ince agregası (kum) ve kalın agregası (çakıl veya kırmataş) olarak sınıflandırılırlar. Sert, dayanıklı, temiz olmaları ve zararlı madde içermemeleri gerekir, ayrıca granülometri yani tane dağılımının uygun olması önemlidir. Agregalar, beton ve harç üretiminin yanı sıra yol ve altyapı dolguları, asfalt kaplamalar ve prefabrik elemanlarda yaygın olarak kullanılır.

2.1.1.5. Su

Bir karışımdaki su içeriği, geopolimerlerin dayanımı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Hibrit karışımlarda su miktarı arttıkça işlenebilirlik artarken, dayanıklılık ve basınç dayanımı azalır. Bunun nedeni, fazla suyun geopolimer bağlayıcısının hidratasyonu ve kürlenme mekanizmalarını engellemesidir. Yüksek su içeriği, geopolimer harcında artan gözenekliliğe yol açar ve bu gözenekler gerilme altında çatlama ve kopmaya neden olarak dayanımı ve dayanıklılığı düşürür. Bu nedenle, geopolimer üretiminde ideal su içeriğinin seçilmesi çok önemlidir. Bu seçim, kullanılacak hammaddelerin türüne, kürlenme yöntemine ve istenilen performansa göre değişiklik gösterir.

Bazalt taşı kesim atıklarından üretilen geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla dört farklı su içeriğine sahip geopolimer harçlar hazırlanmıştır. Karışımlar, su/atık bazalt tozu oranları 0,31, 0,35, 0,40 ve 0,45 olacak şekilde oluşturulmuştur. Su içeriğinin azalması ve ısıtma süresinin artmasıyla harçların basınç ve eğilme dayanımlarında belirgin bir artış gözlemlenmiştir.

2.1.1.6. Magnezyum Sülfat

Betonda sülfatlar, betonun maruz kaldığı ortamda bulunan ve zarar verebilen sülfat iyonları (SO_4^{2-}) içeren kimyasal bileşiklerdir; genellikle toprak, su veya atık sularda bulunurlar ve betonun dayanıklılığını olumsuz etkilerler. Sülfat iyonları, beton içindeki hidratlı kalsiyum alüminatlarla reaksiyona girerek genişleyen jips ve ettringit gibi zararlı bileşikler oluşturur; bu reaksiyonlar betonun içinde gerilmeye, çatlamaya, kabarmaya ve parçalanmaya neden olarak dayanımını düşürür ve servis ömrünü kısaltır. Sülfat saldırısına karşı dayanıklılığı artırmak için sülfat dayanımlı çimento kullanmak, su/çimento oranını düşük tutmak, betonun geçirimsizliğini sağlamak ve uygun kütleme ile kaliteli malzeme seçimi yapmak önemlidir. Bu nedenle sülfat saldırısı, özellikle kanalizasyon, deniz yapıları ve sülfatlı topraklarda beton dayanıklılığı için kritik bir sorundur.

3. ALKALİ-AKTİF BAĞLAYICILAR

Günümüzde, hem atmosfere salınan CO₂ miktarını azaltabilen hem de yüksek sıcaklıklarda mekanik performansını koruyabilen daha çevreci yapı malzemeleri geliştirilmektedir. Bağlayıcı madde olarak PÇ yerine, AA yöntemi kullanılarak uçucu kül (UK) ve cüruf gibi atık veya yan ürünlerden kompozit malzemeler üretilebilmektedir. Alkali aktivasyon teknolojisi, PÇ' sine benzer teknik özelliklere sahip olması ve bazı durumlarda daha iyi termal özellikler göstermesi nedeniyle inşaat sektöründe yaygın kullanım için uygundur. Araştırmalar, uçucu kül ve YFC gibi atık malzemelerin yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında açık gözenek yapısı sayesinde PÇ'den daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. 600–800°C ve üzerindeki sıcaklıklarda bile soğuma sonrasında genellikle basınç mukavemetlerini korudukları tespit edilmiştir [39].

Alkali aktif bağlayıcılar (AAB), inşaat sektöründe kullanılan, geleneksel çimentolara alternatif olarak çevre dostu ve düşük karbon salınımına sahip bağlayıcılardır. Bu bağlayıcılar, belirli malzemelerin alkali çözeltisi (AÇ) (genellikle sodyum veya potasyum bazlı çözeltiler) ile reaksiyona girmesiyle oluşur ve dayanıklı bir yapısal bağlayıcı elde edilir.

AAB, özellikle çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir yere sahiptir çünkü daha az enerjiyle üretilirler ve atık malzemelerin geri dönüşümünü sağlarlar [40]. AAB, silisyum di oksit (SiO₂) ve alüminyum oksit (Al₂O₃) içeren malzemelerin AÇ ile reaksiyona girmesiyle aktive edilir. Bu reaksiyon sonucunda, amorf (düşük kristalli) bileşenleri oluşur, bu da bağlayıcı özellik kazandırır. Geleneksel çimento üretimi, yüksek sıcaklıklarda kalsiyum karbonatın (CaCO₃) pişirilmesiyle yapılır ve bu süreçte önemli miktarda CO₂ salınır. Ancak AAB üretiminde bu tür karbon salınımı çok daha düşüktür, bu nedenle karbon ayak izi daha azdır. AAB, yüksek mekanik dayanım ve uzun ömürlü yapılar sağlamak için kullanılabilir. Ayrıca, suya, kimyasal saldırılara, yüksek sıcaklıklara ve diğer çevresel etkilere karşı iyi bir dayanıklılık gösterirler. Yüksek mekanik dayanım ve uzun ömürlü yapılar sağlamak için kullanılabilir. Ayrıca, suya, kimyasal saldırılara, yüksek sıcaklıklara ve diğer çevresel etkilere karşı iyi bir dayanıklılık gösterirler. Geleneksel

çimentolara göre daha çevre dostu ve sürdürülebilir alternatiflerdir. Hem dayanıklılık hem de çevreyi koruma açısından büyük bir potansiyel taşır ve gelecekte daha yaygın hale gelmesi beklenmektedir [40, 41].

3.1. Alkali Aktivatörler

AA, farklı kürleme koşulları altında alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerin (AAM'lerin) mukavemet gelişimini etkileyen ana unsurlardan biridir. Sıvı (örneğin, potasyum hidroksit, sodyum hidroksit ve sodyum silikat) ve katı (örneğin, sodyum metasilikat) formdaki aktivatörler, molarite ve konsantrasyonlarına bağlı olarak AAM'lerin kürleme gereksinimlerini iyileştirebilir. AA'nin iki temel işlevi olduğu yaygın olarak kabul edilmektedir: karışımdaki alkali metal katyonlarının yük dengesini sağlarken, Si-O, Al-O ve Ca-O bağlarını çözmek ve ardından yeniden oluşturmak. Kimyasal köken bakımından aktivatörler altı gruba ayrılmaktadırlar: alkali alüminatlar, alkali silikatlar, alüminosilikatlar, silikat içermeyen güçlü asit tuzları, alkali hidroksitler ve silikat içermeyen asit tuzları [42].

Önceki çalışmalarda üretilen AAM'lerin çoğunluğu, aktivasyon için SÇ (silika çözültisi) ve sodyum hidroksit (NaOH) aktivatörlerinin bir arada kullanılmasıyla veya alkali oksitlerin tek başına kullanılmasıyla aktive edilmektedir. Lityum (Li) ve rubidyum (Ru) oksitleri gibi çözültilerin aksine, NaOH ve potasyum hidroksit (KOH), suda çok daha yüksek çözünürlük potansiyeline sahip olmaları nedeniyle, daha önce aktivasyon için incelenen alkali oksitler arasında tercih edilmektedir [43].

Dayanım ve dayanıklılık özelliklerini artırdığı için, SÇ kullanımı, AAM karışımlarında en çok tercih edilen alkali silikat türü olarak öne çıkmaktadır. SÇ kullanımının, reaksiyonun ilk saatlerinde oluşturduğu yoğun ortam nedeniyle erken dayanımı NaOH ile aktive edilen sistemlere göre düşürse de silikatın sağladığı katkı nedeniyle ileri yaşlarda dayanımı oldukça arttırmaktadır [43].

3.2. Alkali-Aktif Malzemenin Üretimi

AAM beton üretimini mümkün kılmak için sıfırdan tamamen yeni bir altyapı inşa edilmesine gerek yoktur. PÇ beton üretiminde kullanılan teknoloji, AD ve karıştırma enerjisinin optimize edilmesiyle, küçük değişiklikler yapılarak AAM beton karıştırma ve dökümü için uygun hale getirilebilir. Aktivatörler ve aktif edilmiş malzemeler ile (AEM) mevcut tesislerle üretilebilir ve hazırlanabilir. AEM üretimi için fırınlar gerekli değildir; ancak, AEM'lerin öğütülmesi gerekmektedir. Bu bağlayıcıları üretmek için gereken tesisler, PÇ üretimi için ihtiyaç duyulan tesislerden daha azdır ve çok yüksek sıcaklıklar gerektirilmediği için fosil yakıtlar yerine elektrik enerjisi kullanılabilir [44].

Genel olarak, AAM'ler ve PÇ esaslı malzemelerin sertleşme süreleri benzerdir. Ancak, alkali aktivasyonlu çimentolar genellikle daha hızlı sertleşme eğilimindedir. Belirli durumlarda, priz oranını kontrol etmek için geciktiriciler eklenebilir. Yüksek kalsiyumlu UK'ler, ortam sıcaklığında bile sertleşebilirken, uçucu kül tabanlı bağlayıcıların kürlenmesi için ısıya ihtiyaç duyulur. En sık tercih edilen kürleme yöntemi kapalı kürlemedir. Suda kürlemede, aktivatörün süzülmesi nedeniyle mukavemet gelişimi sınırlanabilir. Ortam sıcaklığında herhangi bir işlem uygulanmadan kürlenmesi de yüzey çatlamalarına yol açabilir. Bununla birlikte, prekast üretimi için buharla kürleme önerilmektedir. AAM'lerin pratik uygulamasında karşılaşılabilecek temel zorluk, bu sistemlerde reoloji kontrolü için etkili katkıların geliştirilmesi veya temin edilmesidir [44]. Demir ve çelik endüstrisinin bir yan ürünü olan YFC, inşaat sektöründe halihazırda karayolları için dolgu malzemesi, beton için agrega, çimento için katkı malzemesi ve demiryolları için balast malzemesi olarak kullanılmaktadır [45].

İlk aşamalarda, sınırlı performans avantajları sunan organik kimyasallar geliştirilmiş olsa da bunlar hâlâ PÇ betonlarında süperakışkanlaştırıcılar tarafından elde edilen reolojik değerlerin çok gerisinde kalmıştır. Bu bağlamda performansı iyileştirmek için, alkali aktivasyonlu bağlayıcılarda çözelti-katı arayüzünün daha detaylı bir şekilde karakterize edilmesinin gerekli olduğu belirlenmiştir. Mevcut ortamda işlenebilirliğin kontrolü, istenen sonuçları elde etmek için karışım tasarımlarını ayarlama ve iyileştirme kapasitesine dayanmaktadır. AAM üretim maliyetleri, genellikle üreticinin ham madde tedarik zincirindeki kontrol düzeyine bağlıdır [40].

3.3. Çevresel Etkileri

Çimento ve beton üretimi, geniş çapta kullanımları nedeniyle CO₂ emisyonlarına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Önümüzdeki uzun yıllar içerisinde beklenen yoğun kentleşme nedeniyle artan çimento ve beton talebini karşılamak için daha çevre dostu malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır [46]. Yıllık yaklaşık 4 gigaton (Gt) oranında üretilen çimento, betonun bağlayıcı malzemesi olarak kullanılır ve bu malzemenin kütlesinin %10'undan fazlasını oluşturur [47]. Çimento üretimi, dünya genelindeki CO₂ emisyonlarının yaklaşık %8'ine neden olmaktadır. Her ton çimento üretimi, 650 ila 920 kg arasında CO₂ emisyonuna yol açmaktadır. AAM'in üretimi, geleneksel PÇ' nin üretimine kıyasla çok daha düşük CO₂ emisyonlarıyla gerçekleşir.

Araştırmacıların daha çevre dostu malzemelere olan artan ihtiyacı dikkate alması sonucu, AAM'ler olarak bilinen yeni bir bağlayıcı malzeme sınıfı ortaya çıkmıştır. Bu malzemeler, AEM'lerin alkali ile aktive edilmesiyle üretilir. AAM'ler kullanıldığında, PÇ'ye kıyasla beklenen CO₂ emisyon azalımı, AAM karışım tasarımlarının seçimi, kür koşulları ve referans PÇ sisteminin bileşimi gibi değişkenlere bağlı olarak %9 ile %97 arasında değişebilir.

AAM'lerin kullanılmasıyla elde edilen emisyon azalımını, PÇ ile üretilen betona kıyasla doğru bir şekilde yansıtan tek bir sayı vermek zordur, çünkü bu oranlar bölge, karışım tasarımı ve istenen amaç için seçilen bileşenlere bağlı olarak değişiklik gösterir. Alkali aktivasyon teknolojisinin çevresel değerlendirmesi, özellikle aktivatörler olmak üzere hammaddelerin tedarik edilme şekli tarafından da önemli ölçüde etkilenmektedir. Aktivatörlerin, özellikle Na₂CO₃ ve Na₂SiO₃ (silika ile yüksek sıcaklıkta yapılan işlemlerle üretilen) üretimi çevre üzerinde etkiler yaratmaktadır [48].

AAM üretiminde, Na₂SiO₃ gibi enerji gerektiren aktivatörler, diğer aktivatörlerle belirli oranlarda kullanılacağı için ton başına CO₂ emisyonları hala PÇ'ye göre çok daha düşüktür. Alkali karbonatların kaynağı ve bunların çıkarılması için uygulanan madencilik teknikleri de emisyon seviyeleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Coğrafi çeşitlilik, emisyon hesaplamalarını benzersiz bir şekilde etkileyen bir faktördür.

AAM'in üretim süreci, geleneksel çimentoya göre daha az enerji gerektirir. Çimento üretiminde kullanılan yüksek sıcaklıklar, büyük enerji tüketimine neden olurken, AAM'de bu sıcaklıklar daha düşüktür ve dolayısıyla enerji tasarrufu sağlanır. Bu, enerji kullanımını azaltarak çevresel etkileri düşürür. AAM'in genellikle daha dayanıklı ve uzun ömürlü ürünler üretir. Bu malzemeler, kimyasal saldırılara karşı daha yüksek direnç gösterir. Daha dayanıklı inşaat malzemeleri, bakım ve onarım ihtiyaçlarını azaltarak, uzun vadede çevresel etkileri minimize eder.

Üretim sırasında kullanılan alkali çözeltisi, yüksek pH değerlerine sahiptir ve su kaynaklarıyla teması halinde su kirliliğine yol açabilir. Bu, üretim tesislerinde uygun çevresel önlemler alınmasını gerektirir. Ancak, üretim sırasında bu tür sorunları minimize etmek için çevre dostu üretim teknikleri geliştirilmektedir.

Üretiminde kullanılan alkali maddeler, yüksek pH'a sahip çözeltiler içerir. Bu çözeltilerin yanlış yönetimi, su kaynaklarının alkalikleşmesine ve ekosistem üzerinde zararlı etkilere yol açabilir. Bu nedenle, üretim sürecinde güvenli atık yönetimi önemlidir. Geleneksel çimento üretimi, kireçtaşı, kil ve diğer doğal kaynakların çıkarılmasını gerektirirken, AAM genellikle atık malzemeler ve mineraller kullanır. Bu durum, doğal kaynakların çıkarılmasının azaltılması açısından çevresel faydalar sağlar.

AAB üretimi sırasında daha düşük sıcaklıklar kullanıldığı için, sera gazı salınımı açısından daha çevre dostu bir seçenek sunar. Ayrıca, iklim değişikliğine etkisi geleneksel çimento üretimine göre daha azdır.

AAM'ler, düşük karbon emisyonları, atıkların değerlendirilmesi, daha düşük enerji tüketimi ve uzun ömürlülükleri ile çevre dostu alternatifler sunar. Bununla birlikte, alkali çözeltilerin yanlış yönetimi gibi çevresel riskler de vardır, bu nedenle üretim süreçlerinde dikkatli çevre yönetimi gereklidir. Bu malzemelerin yaygınlaşması, inşaat sektörünün karbon ayak izini önemli ölçüde azaltabilir.

3.4. Alkali-Aktif Bağlayıcılar İçin Öncü Malzemeler

Alternatif malzemeler, beton üretiminde giderek daha popüler hale gelmektedir. Son yıllarda, birden fazla hibrit malzemenin kombinasyonu ile kullanılan alkali aktivasyonlu kompozitler, yapılan araştırmaların odağında yer almıştır. Alkali aktivasyonlu kompozitlerin üretimi, son derece çeşitli özelliklere sahip birçok malzeme ile yapılabilmektedir. Silikon, alüminyum (Al) ve kalsiyum (Ca) açısından zengin olan, endüstriyel yan ürün olan uçucu kül, YFC gibi malzemeler, alkali aktivasyonlu hibrit matrislerin inşasında araştırmacılar tarafından sıklıkla kullanılmaktadır. Silikon, Al ve Ca açısından zengin, endüstriyel yan ürün olan YFC, UK gibi malzemeler, araştırmacılar tarafından alkali aktivasyonlu hibrit matrislerin inşasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalar hem tek başına hem de diğer maddelerle birlikte kullanımını incelemiştir. Özellikle bağlayıcı matris tek başına oluşturulduğunda, kür koşulları ve aktivasyon sıcaklığına bağlı olarak yüzey çatlakları oluşabilir [49, 50].

AAB, çimento yerine kullanılan, çevre dostu ve dayanıklı bağlayıcı malzemelerdir. Bu bağlayıcılar, yüksek alkali ortamda aktif hale gelen ve reaksiyona girerek sertleşen silikat ve alüminat içeren malzemelerden üretilir. AAB, geleneksel PÇ'sine alternatif olarak kullanılan, alkali aktivasyon yoluyla sertleşen bağlayıcı sistemlerdir. Çimento yerine, yüksek SiO_2 ve Al_2O_3 içeren doğal veya endüstriyel yan ürünler kullanılır. Bu malzemeler, alkali çözeltiler ile reaksiyona girerek geopolimer adı verilen dayanıklı ve çevre dostu bir bağlayıcı oluşturur.

Alkali aktivasyon sürecinde kullanılan öncü malzemeler genellikle yüksek miktarda reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 içeren endüstriyel yan ürünler veya doğal minerallerdir [51].

3.4.1. Alüminosilikat Esaslı Malzemeler

SiO_2 ve Al_2O_3 içeren malzemeler, alüminosilikat esaslı malzemeler olarak bilinir. Bu bileşikler genellikle doğal minerallerde, endüstriyel yan ürünlerde veya sentetik olarak üretilmiş malzemelerde bulunur. Bu malzemeler, özellikle geopolimer beton üretimi ve alkali aktivasyon gibi sürdürülebilir inşaat uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Doğal alüminosilikatlar, Al, Si ve oksijen (O) içeren minerallerden oluşan bileşiklerdir. Bu

mineraller yer kabuğunun önemli bir kısmını oluşturur ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılır. AAM'lerin üretiminde kullanılan alüminosilikat bazlı bileşenlerin çoğu, mineral katkı malzemesi olarak PÇ betonlarına da eklenmektedir. Alkali aktivasyon, Si ve Al açısından zengin amorf malzemeler gerektirir. Ayrıca, kırmızı çamur, uçucu kül, kaolinit killeri, YFC ve metakaolin gibi bileşenler de AAM üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır [52]. Metakaolin kaolinit minerali kalsine edilerek elde edilir. Silikon ve Al açısından zengin olan uçucu kül ve metakaolin, düşük Ca içeriğine sahip sistemlerin alkali aktivasyonunda bağlayıcı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Metakaolin gibi malzemeler nispeten pahalıdır ve son zamanlarda popülerlik kazanmışlardır, bu nedenle geopolimer bağlayıcıların reaksiyon mekanizmaları, endüstriyel yan ürün uçucu kül, YFC sistemlerine kıyasla daha az bilinmektedir. Glukhovsky'nin araştırmasına göre [53], Si ve Al açısından zengin malzemelerin alkali aktivasyon süreci üç ana adımdan oluşmaktadır. Bulgularına göre, bu adımlar şu sırayla gerçekleşmektedir: pıhtılaşma ve ardından yıkım, pıhtılaşma ve ardından yoğunlaşma, yoğunlaşma ve ardından kristalleşme. Önerilen modele göre, ilk aşama, bağlayıcı malzemedeki Si-O-Si bağlarının alkali çözelti içindeki hidroksil iyonları tarafından kırılması ve (-Si-OH) ile (-Si-O-) bileşenlerinin oluşmasıdır. Ancak, hidroksil iyonları aynı zamanda Si-O-Al bağlarını kırarak Al (OH)₄⁻ ün oluşmasına yol açmaktadır. Reaksiyonların ikinci aşamasında, silikon ve Al monomerleri birbirleriyle yer değiştirerek polimerizasyon reaksiyonunu başlatır. Ayrıca, hidroksil iyonları katalitik işlevi üstlenirken, önceki adımda katalizör olarak görev yapan alkali katyonlar artık polimer yapısına katılmaktadır. Aktivasyon sürecinin son aşamasında reaksiyonlar hızlanır ve birincil (örneğin C-S-H) ve ikincil hidrasyon ürünleri meydana gelir [54].

AAM'lerin inceliği ve kimyasal bileşimi, alkali aktivasyon reaksiyonlarını belirler. Genellikle amorf yapıya sahip olan UK, metakaolin ve YFC gibi malzemeler, kalsine edilmemiş malzemelere kıyasla reaksiyon sırasında daha yüksek reaktivite gösterir. Daha önceki araştırmalarda, AAM üretimi için ağırlıklı olarak UK, metakaolin ve YFC gibi öncüller kullanılmıştır. Ancak güncel araştırmalara göre, öncüllerin türleri ve kaynakları son yıllarda artmıştır.

Reaktif yapısı nedeniyle alkali aktivasyon için en uygun doğal malzemelerden biridir. Volkanik Tuf ve Pomza Yüksek Si ve Al içeriği sayesinde alkali aktivasyon için uygundur [55].

3.5. Alkali-Aktif Bağlayıcıların Kür Koşulları

Su bazlı çimento sistemleri, AAB ve PÇ gibi alternatif bağlayıcılarla değiştirilmektedir. Genellikle UK, YFC ve metakaolin gibi alüminosilikat esaslı malzemelerin AA'ler ile reaksiyona girmesiyle oluşurlar. Bu sistemlerin nihai dayanımı, mikroyapısı ve performansı kür koşullarına bağlıdır. Bağlayıcının hidrasyon veya polimerleşme süreçlerini tamamlayabilmesi, uygulanan kürlenme yöntemine bağlıdır [41].

AAB sistemlerinde kürlenme süreci, hidrasyon olaylarına değil, daha çok alkali aktivasyon reaksiyonlarına dayanır. AÇ, Si ve Al iyonlarını çözer. Alkalın ortam, bu çözülmüş iyonların reaksiyona girerek yeni bağlayıcı fazları oluşturmaya neden olur. Bağlayıcı, zamanla sertleşerek nihai dayanımına ulaşır. AA'nın konsantrasyonu, sıcaklık ve nem, bu reaksiyonun ne kadar hızlı veya yavaş gerçekleşeceğini etkileyebilir. AAB, genellikle inşaat sektöründe kullanılan, özellikle beton ve harç üretiminde yaygın olan bağlayıcılardır. Bu bağlayıcılar, su ile kimyasal reaksiyona girerek sertleşen ve dayanıklı yapılar oluşturan maddelerdir. AAB'nin, özellikle düşük karbonlu yapılarıyla çevre dostu alternatifler olarak tercih edilmesi artmaktadır [41].

Bağlayıcı malzemelerin sertleşme ve dayanıklılık kazanmasını garanti altına almak için, belirli sıcaklık, nem ve hava koşullarında bazı işlemler yapılır. Bu koşullar, kürlenme koşulları olarak adlandırılır. Bağlayıcıların reaksiyon hızını ve dayanım gelişimini maksimize etmek için sıcaklık önemli bir bileşendir. AAB genellikle 20-30°C arasında en iyi şekilde çalışır. Sıcaklık çok yüksek olduğunda aşırı su kaybı ve çatlama meydana gelebilir, çok düşük olduğunda ise reaksiyon yavaşlar.

AAB'nin aktif hale gelmesi için su gerektiğinden, nem verimli bir reaksiyon için gereklidir. Yüksek nem, bağlayıcının etkinliğini artırabilir ve kürlenme sürecini hızlandırabilir. Ancak, 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 önemlidir. Kür sürecinde bağlayıcıya uygulanan baskılar, mikro yapının gelişmesini destekler. Kür koşulları, kullanılan AAB türüne, ortam koşullarına ve istenilen sonuca göre değişiklik gösterebilir. Yine de genellikle nemin korunması, sıcaklığın kontrolü ve belirli bir süre boyunca kürlemenin yapılması en etkili sonuçları sağlar [56].

AAB malzemelerinin kür koşullarını belirleyen üç ana faktör sıcaklık, süre ve nem içeriğidir. Düşük Ca konsantrasyonuna sahip sistemler için oda sıcaklığında kürleme (20-25°C) uygundur ve bu da onu ekonomik ve çevre dostu bir seçenek haline getirir. Ayrıca enerji tasarrufu sağlar. Yavaş reaksiyon süreci, zamanla dayanım kazanılmasını sağlar. Bununla birlikte, başlangıçta daha yavaş dayanım gelişimi ve daha uzun süren bir alkali aktivasyon süreci söz konusu olabilir. Yüksek sıcaklıkta kürlemeden bahsederseniz Özellikle UK ve metakaolin bazlı bağlayıcılar yüksek sıcaklıkta kürleme (40-90°C) gerektirir. Erken dayanım gelişimini sağlamak için 4-24 saat boyunca yüksek sıcaklığa maruz bırakılması gerekir. Kimyasal reaksiyonları büyük ölçüde hızlandırarak hızlı priz almayı ve daha yoğun bir yapı oluşumunu sağlar. Ancak yüksek enerji tüketimi bir dezavantajdır ve yüksek sıcaklıklar çatlak oluşumuna neden olabilir.

Bağlayıcının erken dayanımı, kürleme sıcaklığının artmasıyla iyileşir, ancak çatlama riski de artar. Su kaybını azaltarak nemli kürleme, malzemenin priz alma kabiliyetini artırır. Oda sıcaklığında kürleme süreci yavaşlatır, 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 önerilir [56].

4. ALKALİ-AKTİF YÜKSEK FIRIN CÜRUFU

Çevresel faydalarının ötesinde, YFC kullanarak AAM üretmek, PÇ'ye kıyasla önemli teknolojik avantajlar sunmaktadır. Bu avantajlar arasında geliştirilmiş dayanıklılık, düşük gözeneklilik, daha düşük hidrasyon ısı ve erken mekanik dayanım gelişimi bulunmaktadır. Ancak, yüksek büzülme, hızlı priz alma ve çiçeklenme gibi bazı dezavantajların da olduğu belirtilmektedir. Bu tür malzemeler, yüksek oranda endüstriyel yan ürünlerin alkali ile aktive edilip küçük miktarlarda PÇ ile harmanlanarak üretilir. Alkali-aktif PÇ ikameli bağlayıcıların, erken yaşlarda bile iyi mekanik özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. YFC tabanlı alkali-aktif çimentoların mekanik ve dayanıklılık özelliklerine dair yapılan araştırmalar bu başlık altında değerlendirilmiş ve vurgulanan kısımlar ilgili alt başlıklar altında bir bütünlük içerisinde düzenlenmiştir [57].

Cürufun alkali aktivasyonu üzerine yapılan bir çalışmaya göre, Na_2SiO_3 , NaOH ve Na_2CO_3 aktivatörlerine kıyasla basınç dayanımı açısından en iyi aktivasyonu sağlar. Bazı raporlara göre, AAC harçlarının mekanik özellikleri, Na_2SiO_3 solüsyonu kullanıldığında en yüksek mekanik dayanımı gösterirken, diğer önemli faktörler arasında aktivatör konsantrasyonu, kür sıcaklığı ve cürufun inceliği bulunmaktadır [58].

AAC'nin özelliklerinin, aktivatör çözeltisinin $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranından önemli ölçüde etkilendiği keşfedilmiştir. YFC'nin, PÇ'si kullanmadan, yaklaşık 100 Mpa basınç dayanımına sahip yüksek performanslı bir kompozit elde etmek için sıcaklık kürüne gerek kalmadan aktive edilebilmesi, bir diğer önemli bulgudur. AAC bağlayıcısının PÇ yerine geçme potansiyelinin umut verici olduğu vurgulanmıştır [59].

Yapılan çalışmalarda, sıvı/katı oranının etkisi hala minimum sevide olsa da silika modülünün ve AA konsantrasyonunun erken dayanım üzerinde önemli bir etkisi olduğu keşfedilmiştir. Karışım tasarım parametreleri değiştirilerek, AAC'lerin erken yaş performansı önemli ölçüde geliştirilebilir. Başka bir çalışmada, aktivatördeki yüksek sodyum yüzdesinin daha yüksek dayanım sağlasa da Na_2SiO_3 çözeltisi ile aktive edilen cürufun hızlı bir reaksiyon gösterip hızla sertleşmesi nedeniyle işlenebilirlik ve sertleşme

sürelerinin hızla düştüğü bulunmuştur [60]. Birçok deneyde, AAC betonunun mekanik özellikleri, işlenebilirliği ve erken yaş dayanımı incelenmiştir. Bazı raporlara göre, PÇ'si betonunun bir günlük basınç dayanımına ulaşmak için yalnızca AAC bağlayıcı olarak kullanılabilir [61]. %100 PÇ içeren numunelere kıyasla, farklı karışım yüzdelere sahip alkali-aktif YFC/PÇ numunelerinin daha yüksek basınç ve eğilme dayanımlarına sahip olduğu tespit edilmiştir. Angulo-Ramirez vd., YFC ve PÇ'yi sırasıyla %80 ve %20 oranlarında kullanarak AAM üretmiştir. Hazırlanan karışım, Na_2SiO_3 ve NaOH ile aktive edildikten sonra, %100 PÇ ile yapılan referans karışıma göre çok daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Benzer bulgulara sahip başka bir çalışmada, alkalilerle aktif hale getirilen bağlayıcıların, çok düşük PÇ içeriği (%20) ve yüksek YFC içeriği (%80) ile üretilebileceği vurgulanmıştır. Ayrıca, harmanlanmış çimentoların erken yaşta iyi mekanik gelişim gösterdiği gözlemlenmiştir [62]. Betonun uzun ömürlülüğünü etkileyen en önemli unsurlardan biri geçirgenliğidir. Betonu mümkün olduğunca geçirimsiz hale getirmek için tasarım aşamasında çeşitli önlemler alınır. Birçok araştırmaya göre, AAC betonu PÇ betonuna kıyasla daha az geçirgenliğe sahiptir. Ancak bazı araştırmalar, AAC betonunun PÇ betonundan daha geçirgen olduğunu öne sürmektedir. Betonun uzun ömürlülüğünü tehdit eden en büyük tehlikelerden biri sülfat saldırısıdır. Beton, çeşitli sülfür kaynaklarına yakın olabilir veya yüksek sülfat içeriğine sahip topraklarda sülfat saldırısına maruz kalabilir [63, 64]. Magnezyum sülfat (MgSO_4) saldırısıyla karşılaştırıldığında, AAC'nin Na_2SO_4 saldırısına karşı daha dayanıklı olduğu genel olarak kabul edilmektedir. MgSO_4 saldırısının ardından, C-A-S-H yoğun silikat polimerizasyonu ve dekalsifikasyona uğrar. Bu sürecin, C-A-S-H'nin silika jellerine veya M-A-S-H'ye dönüşme potansiyeline sahip olduğu düşünülmektedir. Öte yandan, AAC'nin jel yapısı Na_2SO_4 ' ye maruz kaldığında önemli ölçüde bozulmaz, çünkü zararlı alçıtaşı ve etrenjit çökeltme hızı düşüktür [65].

Yüksek sıcaklık direnci söz konusu olduğunda, YFC bazlı AAM'ler oldukça rekabetçi bir malzemedir. AAC yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, jelde zayıf bağlı suyun hızla dehidratasyonu, bağ yapısına ciddi şekilde zarar vermez ve mekanik özelliklerin korunmasını sağlar. Aslında, tüm beton türleri belirli bir dereceye kadar ısıya dayanıklılık gösterir. Kristal hidratlar, C-S-H ve diğer beton bileşenleri gibi, 800°C ' nin üzerindeki sıcaklıklarda nem kaybettiği için geleneksel beton ayrışır. Ancak AAC'deki nano gözenekler sayesinde, nem aşırı yüksek sıcaklıklarda betondan kaçabilir ve böylece alüminosilikat ağı zarar görmekten korunur [66, 67].

PÇ betonunda alkali-silika reaksiyonu (ASR) nedeniyle meydana gelen genleşmeleri azaltmak için cüruf kullanılır, ancak ASR reaktif agregalarla üretilen AAC'nin ömrü konusundaki görüşler hâlâ bölünmüş durumdadır. Yüksek cüruf ve doğrudan Ca içeriğine rağmen, AAC'nin ASR'ye karşı direncinin PÇ betonlarına göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir [68]. AAC'nin ASR'ye dayanıklı olduğunu iddia eden araştırmacılar, bu dayanıklılığın, hidratasyon ürünlerinin gözenek çözeltisindeki alkalilere bağlanmasından kaynaklandığını savunmaktadır. Başka bir deyişle, reaktif kitlelerdeki silikanın çözülmesi için yeterli alkali bulunmadığı ileri sürülmüştür.

AAC'nin asit hasarına karşı PÇ'den daha dirençli olduğu iyi bilinmektedir. Ancak, asidik koşulların AAC üzerinde hiçbir etkisi olmadığını söylemek doğru olmaz. Daha düşük Ca içeriği nedeniyle, AAC genellikle PÇ'ye kıyasla daha asit dirençli bir bağlayıcı olarak kabul edilir [69]. Beton, donma ve çözülme nedeniyle iç çatlaklar, genleşme ve ağırlık kaybı yaşayabilir. AAC, düşük su tüketimi ve gözenek çözeltisindeki yüksek elektrolit içeriği sayesinde donma-çözülme döngülerine dayanabilir [70]. Hava sürükleyici katkı olmaksızın bile AAC'nin donma ve çözülmeye karşı olağanüstü dayanıklılığa sahip olduğu düşüncesi, 300 döngü tamamlanmadan bozulan PÇ numuneleri ile yapılan karşılaştırma ile desteklenmektedir [71]. Çiçeklenme, serbest alkali içeren suyun betondan sızması sonucu beton yüzeyinde oluşan beyazımsı birikintileri tanımlayan terimdir. AAC numunesinin yüzeyinde oluşan az miktardaki çiçeklenme, mukavemetini ve dayanıklılığını etkilemez. Ancak, belirli aktivatör türleri veya kür koşulları nedeniyle daha yüksek seviyelerde meydana gelirse, AAC'nin bütünlüğü tehlikeye girebilir. Nemli kürlenmenin ardından kuru kürlenme yapılması veya Na_2SO_4 gibi düşük çözünürlüğe sahip aktivatörlerin kullanılması, çiçeklenme oluşma olasılığını artırır [72].

4.1. Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Pik demir, demir cevheri, kireçtaşı ve kok kömüründen üretilir. Ve YFC bu sürecin bir yan ürünüdür. Neredeyse tamamen amorf bir madde elde etmek için sıvı cüruf hızla soğutulmuş soğutulur. Genel olarak YFC %27-40 SiO_2 , %30-50 CaO , %5-15 Al_2O_3 ve %1-10 MgO içerir. Kimyasal bileşimi büyük ölçüde kullanılan demir cevherine bağlıdır. YFC'nin özellikleri ve harmanlanmış çimento üretimindeki kullanımı son araştırmalarda incelenmiştir [73].

Cürufun ikincil bir çimentolama malzemesi olarak kullanımı ve uygulamaları hakkında geniş çapta bilgi mevcuttur. En yaygın kullanım alanları, cürufllu çimento ve harmanlanmış çimento üretimidir. Günümüzde, bu alternatif malzemenin kullanımı büyük ilgi görmektedir, çünkü PÇ klinkeri üretimi, dünya çapındaki CO₂ emisyonlarının yaklaşık %8'ine katkıda bulunmaktadır. Cürufun sınırlı miktarda bulunmasına rağmen, çimento ve beton üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını azaltmaya yardımcı olmak amacıyla cürufllu çimentoya olan talep giderek artmaktadır [74].

YFC, PÇ klinkerine göre daha yavaş hidratlanır. Bunun sonucunda, erken yaşlarda dayanım daha düşük olurken, ilerleyen yaşlarda daha fazla artış gösterir. Cürufllu çimento yavaş tepkimeye girdiğinden, kimyasal etkilere karşı son derece dirençli, oldukça yoğun bir mikroyapı oluşturur. Cüruf partikülleri reaksiyona girdiğinde kalsiyum hidroksit (Ca (OH)₂) oluşmaz, bu nedenle YFC, PÇ klinkerine göre daha az kireç içerir. Bunun yerine, düşük kalsiyum/silikon oranına sahip C-S-H, etrenjit fazları oluşur. Cüruf partiküllerinin çözünmesiyle başlayan hidrasyon süreci, aşırı doymuş gözenek çözeltisinden hidrat fazlarının çökmesiyle tamamlanır. Susuz malzemenin çözünmesi, bu sürecin hızını belirleyen temel adımdır. Çözünme hızı arttıkça, malzemenin hidratlı fazlar oluşturma reaksiyonu da hızlanır. Gözenek çözeltisindeki yüksek pH seviyelerinin cürufun cam ağının korozyonunu hızlandırabilmesi nedeniyle PÇ klinkeri kullanımı yaygın bir uygulamadır. Cürufllar, çimento ve beton sektöründe birçok kullanım alanına sahiptir. Geleneksel çelik üretim yöntemleriyle üretilen cürufllar, kristal yapılarından dolayı daha az tercih edilir ve genellikle beton ve yol dolgusu olarak kullanılır. Ancak, modern çelik fabrikalarından elde edilen cürufllar, camsı yapıları sayesinde çimentolu sistemler için uygun hale gelmektedir [75].

4.2. Normal Sıcaklıklarda Alkali-Aktif Cüruf Üretimi

Normal sıcaklıklarda AAC üretimi, çimento yerine kullanılabilen çevre dostu bir bağlayıcı sistem olup, YFC, uçucu kül ve metakaolen gibi endüstriyel yan ürünlerin NaOH, Na₂SiO₃, KOH gibi AA ile reaksiyona sokulmasıyla elde edilir. Geleneksel çimento üretimi klinkleşme süreci gerektirirken, alkali-aktif cüruf üretimi bu aşamaya ihtiyaç duymaz ve böylece CO₂ emisyonlarını %80'e kadar azaltabilir, enerji tasarrufu sağlar ve sanayi atıklarını değerlendirerek sürdürülebilir bir malzeme üretimine katkıda bulunur. Yüksek

basınç dayanımı (28 günde 40-70 Mpa), düşük geçirgenlik, sülfat ve asit direnci gibi üstün özellikleri sayesinde beton, prefabrik yapı elemanları, zemin stabilizasyonu, madencilik ve tehlikeli atık yönetimi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır [76]. AAC'nin sertleşme süreci aktivasyonun ardından başlar. Normal sıcaklıklarda yapılan alkali aktivasyon, sertleşme sürecinin gecikmesine neden olabilir, ancak zamanla cürufun iç yapısı daha dayanıklı hale gelir. Bu yöntem, malzemeye daha fazla mekanik dayanım kazandırır ve alkali, asidik veya su bazlı ortamlara karşı dirençli hale getirir. AAC üretiminde normal sıcaklıklar avantaj sağlar, çünkü yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulmadığından enerji tüketimi daha düşüktür. Geleneksel çimento üretimi yüksek sıcaklık gerektirdiğinden karbon emisyonlarını artırırken, AAC üretimi bu emisyonları önemli ölçüde azaltır. Bu süreç, cüruf ve diğer endüstriyel atık malzemelerin kullanımı ve geri dönüştürülmesiyle çevresel sürdürülebilirliği artırır [77, 78]. Enerji verimliliği, oda sıcaklığında üretilen AAC'nin en önemli avantajlarından biridir. Oda sıcaklığında yapılan alkali aktivasyon, çimento üretimine kıyasla daha düşük enerji tüketir. Daha düşük sıcaklıklar kullanıldığı için AAC üretimi çevreye daha az zarar verir ve daha düşük karbon emisyonu üretir. Ayrıca, AAC betonu güçlendirebilir ve korozyona ile suya karşı direnç kazandırabilir. Normal sıcaklıkta aktive edilen cüruflar, güçlü ve uzun ömürlü malzemelerin oluşumuna katkı sağlar. AAC üretimi, çelik üretimi gibi endüstriyel süreçlerden kaynaklanan cürufu geri dönüştürerek atık miktarını azaltır ve çevresel etkiyi en aza indirir [77, 78]. Avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlardan en önemlisi, oda sıcaklığında alkali aktivasyonun daha yavaş gerçekleşmesidir, bu da üretim süresini uzatabilir. Ancak bu durum, sıcaklık kontrolü ile yönetilebilir. Bunun tamamen olumsuz bir durum olarak değerlendirilmemesi gerekir, çünkü PÇ, AAC ile birlikte kullanıldığında erken yaş dayanımına katkı sağlarken, uzun vadeli dayanım üzerinde çok az etkisi vardır. PÇ olmadan AAC'nin daha yavaş reaksiyona girmesi, uzun vadeli dayanımı artırabilir. Ayrıca, geleneksel çimento üretim yöntemine kıyasla AAC'nin temini ve kullanımı daha maliyetli olabilir. Ancak, uzun vadede düşük enerji ve çevresel faydalar bu maliyeti dengeleyebilir. Sonuç olarak, normal sıcaklıklarda AAC üretimi, enerji verimliliği, çevre dostu üretim süreçleri ve sürdürülebilir inşaat malzemeleri üretimi için önemli bir alternatiftir. Geleneksel çimento üretimine göre daha düşük enerji tüketimi ve çevresel etki sunarak, inşaat sektöründe uzun vadeli faydalar sağlayabilir [79-81]. Üretim sürecinde alkali aktivatörler, cüruf içindeki silika ve alümina bileşenlerini çözerek N-A-S-H ve C-A-S-H jellerinin oluşumunu sağlar, böylece polimerizasyon yoluyla sertleşme gerçekleşir ve

erken mukavemet gelişimi sağlanır. Geleneksel alkali aktivasyon işlemleri genellikle yüksek sıcaklık gerektirirken, son gelişmelerle birlikte normal sıcaklıklarda sertleşebilen sistemler geliştirilmiştir, bu da enerji verimliliğini artırırken üretim maliyetlerini düşürmektedir. Özellikle prefabrik beton üretimi, saha betonları, sülfatlı zeminlerde kullanım ve nükleer atık stabilizasyonunda avantaj sağlayan AAC, düşük karbon ayak izi ve uzun ömürlülüğü sayesinde sürdürülebilir inşaat malzemeleri arasında öne çıkmaktadır. Gelecekte daha düşük maliyetli AA'nın geliştirilmesi ve yeşil malzeme kullanımını teşvik eden politikalarla birlikte bu teknolojinin yaygınlaşması beklenmektedir.

4.3. Düşük Sıcaklıklarda Alkali-Aktif Cüruf Üretimi

Düşük sıcaklıklarda AAC üretimi, çimento esaslı bağlayıcılara alternatif olarak geliştirilen ve geleneksel klinkerleşme sürecine ihtiyaç duymayan çevre dostu bir teknolojidir. Bu üretim yöntemi, endüstriyel yan ürünler olan YFC, UK ve metakaolen gibi malzemelerin NaOH, Na_2SiO_3 , KOH gibi alkali aktivatörlerle reaksiyona girmesiyle elde edilir. Düşük sıcaklık koşullarında bağlayıcının sertleşmesini sağlamak, mekanik ve kimyasal dayanımı artırmak için malzeme seçimi, aktivatör konsantrasyonu ve katkı maddeleri gibi faktörler dikkatlice optimize edilmelidir. Geleneksel PÇ'ye kıyasla karbon emisyonlarını %80'e kadar azaltabilen, yüksek sülfat ve asit dayanımı sağlayan, erken mukavemet gelişimi gösteren ve uzun ömürlü betonlar üretebilen AAC bağlayıcıları, düşük sıcaklıklarda sertleşmeyi teşvik eden formülasyonlar ile daha verimli hale getirilebilir. Düşük sıcaklıklarda (0-15°C) alkali aktivasyon sürecinin verimli bir şekilde gerçekleşmesi için kimyasal reaksiyon mekanizmaları optimize edilmelidir. Standart alkali aktivasyon sürecinde, silikat ve alüminat iyonlarının çözünmesi ve jel oluşturması sıcaklığa bağlı olduğundan, düşük sıcaklıklarda bu sürecin yavaşlaması dayanım gelişimini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, düşük sıcaklıklarda etkin bağlayıcı elde etmek için daha yüksek alkali konsantrasyonu, çözünebilir silikat içeriği artırılmış aktivatörler ve erken sertleşmeyi hızlandıran katkıları kullanılabilir [82]. Düşük sıcaklıklarda bağlayıcı performansını artırmak için bazı stratejiler uygulanmaktadır. Öncelikle, aktivasyon parametrelerinin ayarlanması gereklidir. Daha yüksek molar konsantrasyona sahip AA'lar kullanılarak çözünme artırılabilir ve ekstra silikat içeriği ile jelleşme süreci hızlandırılabilir. Ayrıca, su/bağlayıcı oranının optimize edilmesi mukavemeti doğrudan etkileyerek düşük sıcaklıklarda dayanımı artırabilir. Kimyasal ve mineral katkıları açısından, erken

sertleşmeyi teşvik eden $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, Na_2CO_3 , Li_2CO_3 gibi kimyasallar kullanılabilir. Kalsiyum içeriği artırılmış sistemler C-A-S-H jel oluşumunu destekleyerek mukavemeti yükseltebilirken, nano-silika veya nano-kil gibi nano malzemeler düşük sıcaklıklarda reaksiyon hızını artırarak sertleşmeyi iyileştirebilir. Ayrıca, harici ısıtma veya nem kontrolü gibi yöntemler de düşük sıcaklıklarda sertleşmeyi teşvik etmek için kullanılabilir. Ön kütleme yöntemiyle alkali-aktif harçlar $15\text{-}20^\circ\text{C}$ 'de kısa süreli bekletildiğinde sertleşme mekanizması hızlanabilir. Bunun yanı sıra, iç ısı üreten katkıları olarak MgO veya CaOAl_2 gibi reaktif oksitler kullanılarak hidrasyon sırasında iç sıcaklık artırılabilir ve bağlayıcının düşük sıcaklıklarda sertleşmesi kolaylaştırılabilir. Düşük sıcaklıklarda uygun şekilde optimize edilmiş AAC bağlayıcıları yüksek mekanik dayanım, erken mukavemet gelişimi, düşük geçirgenlik ve sülfat ile asit direnci gibi önemli avantajlar sunar. 28 günlük basınç dayanımı 40-80 Mpa arasında değişebilir ve özel aktivasyon teknikleri ile ilk 3-7 günde PC'ye kıyasla daha hızlı mukavemet kazanabilir. Ayrıca, kapalı gözenek yapısı sayesinde suya ve kimyasal saldırılara karşı direnç gösterirken, alkali aktivasyon ile oluşturulan jeller sülfatlı ve agresif kimyasal ortamlara karşı mükemmel dayanım sağlar. Bu bağlayıcılar, soğuk iklimlerde beton uygulamalarında, prefabrik beton elemanlarında, donatılı beton sistemlerinde ve yol ile zemin stabilizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle kış şartlarında beton dökümünde, prefabrik üretimde hızlı priz alması gereken sistemlerde ve deniz yapılarında korozyon direnci yüksek bağlayıcılara ihtiyaç duyulan projelerde kullanımı oldukça avantajlıdır [83]. AAC'nin sentezinde sıcaklığın nasıl etkili olduğuna gelirsek, düşük sıcaklıklar kimyasal reaksiyonların daha yavaş gerçekleşmesine neden olur, bu da aktivasyon sürecinin uzamasına yol açar. Düşük sıcaklıklar, malzemenin sertleşme süresini uzatabilir, bu da üretim sürecini daha uzun hale getirir. Düşük sıcaklıklarda AAC üretimi, geleneksel çimento sistemlerine kıyasla daha düşük karbon ayak izi ve daha yüksek çevresel sürdürülebilirlik sunduğu için gelecekte daha fazla benimsenmesi beklenmektedir. Alkali aktivasyon süreçlerinin daha verimli hale getirilmesi, yeni katkı maddelerinin geliştirilmesi ve üretim tekniklerinin iyileştirilmesi ile düşük sıcaklıklarda daha dayanıklı ve ekonomik bağlayıcı sistemler elde edilebilir. Özellikle iklim değişikliğine bağlı olarak daha sürdürülebilir inşaat malzemeleri ihtiyacının artmasıyla, bu tür malzemelerin kullanımı giderek yaygınlaşacaktır. Sonuç olarak, düşük sıcaklıklarda AAC üretimi, enerji verimliliği, düşük karbon emisyonu, yüksek dayanım ve uzun ömürlülük gibi avantajlarıyla çimento endüstrisine alternatif olarak büyük bir potansiyele sahiptir [84, 85]. Düşük sıcaklık aktivasyonu ile geleneksel çimento üretimi

karşılaştırıldığında, düşük sıcaklık aktivasyonu daha çevre dostudur ve karbon salınımını azaltır. Atık ürünlerin, örneğin cürufun geri dönüştürülmesi, inşaat sektörünün çevresel etkilerini azaltır. Cüruf atıkları, faydalı yapı malzemelerine dönüştürülebilir. Zamanla, düşük sıcaklıkta aktive edilen cüruflardan aşınma ve korozyona karşı dayanıklı, yüksek dayanımlı malzemeler oluşturulabilir. Sonuç olarak, olumsuz yönlerine gelirsek, düşük sıcaklıklar kimyasal süreçleri yavaşlatır ve bu da üretim sürecinin daha uzun sürmesine neden olabilir. Bu, üretimi yavaşlatabilir. Betonun sertleşmesi daha uzun sürebilir, bu da projelerde gecikmelere yol açabilir. Düşük sıcaklıklarda bile belirli sıcaklık aralıklarının korunması gerekir. Sıcaklık kontrolü, yavaş reaksiyonların etkilerini dengelemek için önemlidir. Düşük sıcaklıklarda AAC üretimi, enerji verimliliği sağlamak ve çevre dostu malzemeler elde etmek için etkili bir yöntemdir. Ancak, düşük sıcaklıkların reaksiyon hızını yavaşlatması ve sertleşme süresini uzatması gibi bazı zorluklarla karşılaşılabilir. Yine de doğru koşullar altında bu yöntem, inşaat endüstrisinde sürdürülebilir çözümler sunabilir [85, 86].

4.3.1. Düşük Sıcaklıklarda Alkali-Aktif Cüruf Aktivatör Konsantrasyonu

Düşük sıcaklıklarda AAC bağlayıcılarının sertleşme süreci, aktivatör konsantrasyonunun doğru şekilde optimize edilmesine bağlıdır. AA'lar, cüruf içindeki SiO_2 ve Al_2O_3 bileşenlerinin çözünmesini sağlayarak bağlayıcı jellerin (N-A-S-H ve C-A-S-H) oluşmasını destekler. Ancak 0-15°C gibi düşük sıcaklıklarda bu reaksiyonlar yavaşladığından, uygun aktivatör konsantrasyonu ile sürecin hızlandırılması gerekir. Genellikle 6-12 M NaOH konsantrasyonu, 1,5-2,5 modül oranına sahip Na_2SiO_3 çözeltileri veya KOH ile desteklenen AA'lar, düşük sıcaklıklarda bağlayıcının dayanım kazanmasını hızlandırabilir. Düşük konsantrasyonlar (<4 M NaOH) yetersiz jelleşmeye neden olurken, aşırı yüksek konsantrasyonlar (>12 M NaOH) erken yaşta çatlamaya yol açabilir [87].

Alkali aktivasyonunun düşük sıcaklıklarda karşılaşılan zorlukları göz önünde bulundurulduğunda, reaksiyon hızındaki azalma, silika ve alüminanın çözünürlüğünü azaltır ve bu da bağlayıcının sentezini geciktirir. Düşük sıcaklıklarda, özellikle NaOH bazlı aktivatörler kullanıldığında, geç dayanım kazanımı erken yaş dayanımını ciddi şekilde azaltabilir. Uzun priz süresi, özellikle 5°C'nin altındaki sıcaklıklarda sertleşme süresini

önemli ölçüde uzatabilir. Bu engelleri aşmak için daha reaktif aktivatör sistemleri ve optimum konsantrasyonlar kullanılmalıdır [88].

NaHCO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ve Li_2CO_3 gibi katkı maddeleri, hidrasyon hızını artırarak düşük sıcaklıklarda erken mukavemet gelişimini teşvik eder. Nano-silika ve nano-kil gibi nano malzemeler de bağlayıcının reaksiyon sürecini hızlandırarak düşük sıcaklıklarda daha hızlı sertleşme sağlar. Optimum Na_2O eşdeğeri %4-8 arasında olacak şekilde belirlenerek uygun su/bağlayıcı oranı ile dayanım artırılabilir. Düşük sıcaklıklarda optimize edilmiş alkali aktivasyon, erken mukavemet gelişimi, yüksek nihai dayanım (28 günde 40-80 MPa), düşük geçirgenlik, sülfat ve asit direnci gibi avantajlar sunar. Ayrıca, prefabrik üretim, soğuk hava koşullarında beton uygulamaları ve kimyasal dayanım gerektiren projelerde etkin şekilde kullanılabilir. Gelecekte, daha çevre dostu ve düşük maliyetli aktivatörlerin geliştirilmesiyle alkali aktivasyon teknolojisinin yaygınlaşması beklenmektedir. Düşük sıcaklıklarda alkali aktivasyonun başarısı için aktivasyon çözeltisinin konsantrasyonu artırılmalı ve daha reaktif bileşenler kullanılmalıdır. Özellikle NaOH konsantrasyonu 10M-12M aralığında olmalı ve sodyum silikat oranı artırılmalıdır. Eğer sıcaklık çok düşükse ($<5^\circ\text{C}$) şu ek önlemler alınmalıdır. Aktivatör çözeltisi önceden ısıtılmalı ($30-40^\circ\text{C}$). Sıcaklık düzenleyici katkıları eklenmeli. Havalandırma ve izolasyon sağlanmalı. Bu parametreler, düşük sıcaklıklarda bile AAC sistemlerinin başarılı şekilde uygulanmasını sağlayacaktır. Soğuk saha koşullarında AAC bazlı dökme beton uygulamaları, özel önlemler gerektirir. Özellikle 5°C 'nin altındaki sıcaklıklarda, betonun priz alması ve dayanım kazanması önemli ölçüde yavaşlar. Don riski olan (-5°C ve altı) koşullarda ise hidrasyon tamamen durabilir, bu nedenle karışım tasarımı ve saha uygulamaları dikkatlice planlanmalıdır [89].

4.4. Yüksek Sıcaklıklarda Alkali-Aktif Cüruf Üretimi

Yüksek sıcaklıklarda AAC üretimi, endüstriyel yan ürünlerin (cüruf, UK, metakaolen vb.) AA'lar ile reaksiyona girerek alternatif bağlayıcı sistemlerine dönüşmesini sağlar ve geleneksel PÇ'ye kıyasla daha düşük karbon emisyonu, daha yüksek kimyasal dayanıklılık ve hızlı mukavemet kazanımı gibi avantajlar sunar. Yüksek sıcaklıkların ($30-90^\circ\text{C}$) alkali aktivasyon sürecini hızlandırarak bağlayıcının erken mukavemet kazanmasını sağladığı bilinmekle birlikte, çok yüksek sıcaklıklarda ($>80-90^\circ\text{C}$) hidrasyon reaksiyonlarının aşırı

hızlanması mikro çatlak oluşumuna ve bağlayıcının kırılgan hale gelmesine neden olabilir. Optimum sıcaklık aralığında (30-50°C) bağlayıcının dengeli sertleşmesi ve dayanım gelişimi sağlanırken, 50-70°C aralığında erken mukavemet artışı elde edilse de iç gerilmeler nedeniyle rötire riski artabilir. Yüksek sıcaklıklarda kullanılan AA'lar arasında NaOH ve Na₂SiO₃ en yaygın olanlarıdır; 6-10 M NaOH konsantrasyonu ve 1,5-2,5 modül oranına sahip Na₂SiO₃ çözeltileri, bağlayıcının optimum performans göstermesini sağlayabilir [90].

Alternatif aktivatörler olarak KOH, Na₂CO₃ ve Ca (OH)₂ gibi kimyasallar da kullanılabilir. Su/bağlayıcı oranı, bağlayıcının dayanımı ve işlenebilirliğini doğrudan etkileyen bir diğer kritik parametredir; düşük oranlar (<0,4) yüksek mekanik dayanım sağlarken işlenebilirliği azaltabilir, yüksek oranlar (>0,5) ise rötire riskini artırabilir. Yüksek sıcaklıklarda üretilen AAC, erken sertleşme sürecini hızlandırarak ilk 24 saat içinde 10-30 MPa basınç dayanımı ve 28 gün sonunda 50-100 MPa aralığında nihai dayanım sunabilir. Bu özellikleri sayesinde yüksek sıcaklıklarda üretilen AAB'lar sanayi tesisleri, ağır yüklere maruz kalan yapısal elemanlar, kimyasal direnç gerektiren altyapılar ve prefabrik sistemler gibi çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklığa dayanıklı yapı malzemeleri üretimi ve kimyasal direnç gerektiren özel uygulamalar için büyük bir potansiyele sahip olan bu bağlayıcı sistemlerin, gelecekte aktif katkı maddeleri, nano-malzemeler ve hibrit aktivatörler ile daha kararlı hale getirilerek sürdürülebilir inşaat sektöründe daha yaygın kullanılması beklenmektedir [91].

Aktivasyon sonrasında, elde edilen AAC, sertleşme sürecine girer. Bu süreç, yüksek sıcaklıkların etkisiyle daha hızlı gerçekleşebilir. Yüksek sıcaklık, cürufun daha kısa sürede sertleşmesine ve dayanım kazanmasına yol açar. Ancak, sıcaklık çok yüksek olduğunda, bazı kimyasal bileşiklerin çözünmesi veya bozulması riski olabilir, bu yüzden sıcaklık kontrolü önemlidir. Sıcaklık etkisi yüksek sıcaklık, AAC üretiminde bazı avantajlar sağlar. Yüksek sıcaklık, kimyasal reaksiyon hızını artırır ve dolayısıyla daha kısa sürede yüksek performanslı ürünler elde edilir. Yüksek sıcaklıkta AAC, daha yüksek mekanik dayanım kazanabilir. Bu, özellikle beton ve inşaat malzemelerinde önemli bir özellik sağlar. Sıcaklık arttıkça, elde edilen yapı daha yoğun ve homojen hale gelir. Bu da malzemenin suya, asidik ve alkalın koşullara karşı daha dirençli olmasına yardımcı olur. Avantajlar başlığı altında yüksek sıcaklıklarda AAC üretimini incelersek, Yüksek sıcaklıkta yapılan

alkali aktivasyon, daha dayanıklı ve yüksek performanslı malzemelerin elde edilmesini sağlar. Yüksek sıcaklık, reaksiyon sürecini hızlandırarak, daha hızlı üretim yapılmasına olanak tanır. Sıcaklık kontrolü yapıldığında, AAC üretim süreci daha kısa sürede tamamlanabilir, bu da enerji tüketimini azaltabilir [92]. Dezavantajlarına değinecek olursak, Sıcaklığın aşırı yüksek olması, bazı bileşenlerin bozulmasına veya reaktifliğin azalmasına neden olabilir. Bu nedenle sıcaklık kontrollü bir ortam gereklidir. Yüksek sıcaklıklar, ekstra enerji ve ekipman gereksinimlerine yol açabilir, bu da üretim maliyetlerini artırabilir. Sonuç olarak, yüksek sıcaklıklarda AAC üretimi, hızlı reaksiyonlar, yüksek performans ve sürdürülebilir inşaat malzemeleri üretimi için önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak sıcaklık kontrolü ve maliyetler gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır [93].

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, 42.5R dayanım sınıfına sahip sıradan PÇ ve GYFC birincil hammadde olarak kullanılmıştır. Malzemelerin fiziksel özellikleri, Blaine yüzey alanı ve özgül ağırlık ile karakterize edilmiştir. YFC ve PÇ için Blaine yüzey alanı sırasıyla 4400 cm²/g ve 3600 cm²/g olarak ölçülmüştür. Özgül ağırlıkları ise sırasıyla 2,8 ve 3,13' tür. Tablo 5.1, YFC ve PÇ'nin kimyasal bileşimini detaylı bir şekilde sunarak, alkali aktivasyon süreci için kritik olan farklı özelliklerini vurgulamaktadır. YFC, alkali aktivasyon sırasında C-A-S-H jellerinin oluşumunda önemli bir rol oynayan %38,5 CaO içeriği ile öne çıkmaktadır. Buna karşılık, PÇ'nin CaO içeriği çok daha yüksektir (%64,1), bu da onu erken hidratasyon ürünleri, özellikle Ca (OH)₂ için değerli bir katkı sağlar. YFC'nin amorf yapısını doğrulamak için X-ışını kırınımı (XRD) analizi, RIGAKU ULTIMA IV cihazı kullanılarak yapılmıştır. XRD deseni, 30° civarında bir amorf tepe göstererek camsal fazların baskın olduğunu ortaya koymaktadır. Bu özellik, YFC'yi alkali aktivasyon için ideal bir öncü yapmaktadır, çünkü reaktif bileşenlerinin çözünmesi artmaktadır. Katı öncüllerin yanı sıra, bir aktivatör karışımı olarak Na₂SiO₃ ve NaOH kullanılmıştır [32]. 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.

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

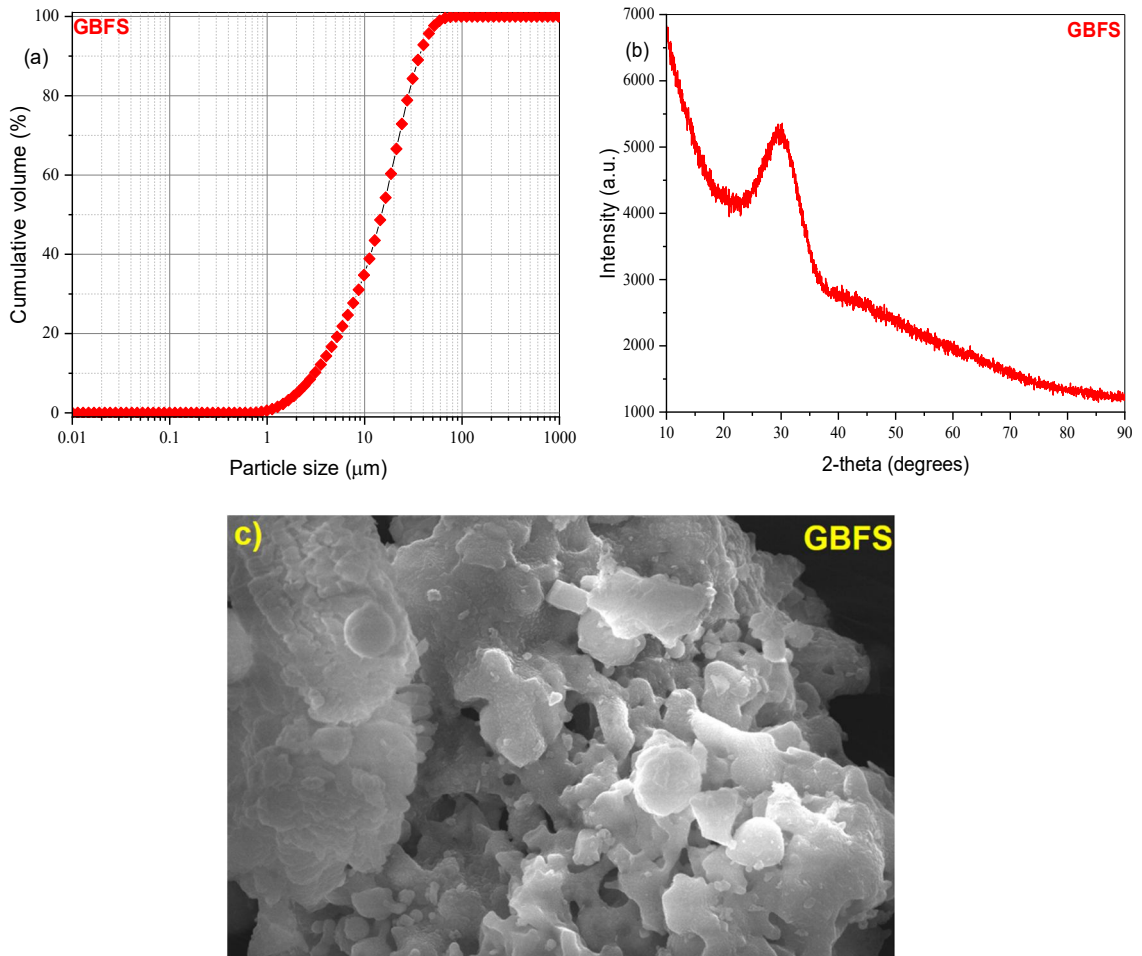
Tablo 5.1. YFC ve PÇ'nin kimyasal bileşimleri (ağırlıkça%)

5.1.Kullanılan Malzemeler

5.1.1.Yüksek Fırın Cürufu

Çalışmamızda ince öğütülmüş YFC kullanılmıştır. Yüksek fırınlardan çıkan cüruf, demir-çelik tesislerinde pik demir üretimi için mineral içerik olarak kullanılan endüstriyel bir atık üründür. YFC’de %30-50 arasında CaO, %28-38 arasında SiO₂, %8-24 Al₂O₃ , %1-18MgO, %0,5-3 arasında Fe₂O₃ bulunmaktadır. Grimsi, camsı parlaklıkta bir yapıya sahiptir. Yoğunluğu 2,8-3 g/cm³’ tür. Öğütülmüş özgül yüzeyi 4000-6000 cm²/g arasındadır. Su emme oranı düşüktür. Erime sıcaklığı 1300-1500 °C’ dir [94].

YFC uzun vadede basınç dayanımını artırır. Düşük hidrasyon ısıları sağlar. Sülfat ve klor iyonlarına karşı direnci artırır. Alkali silika reaksiyonu riskini düşürür [95, 96].



Şekil 5.1. YFC Kümülatif Hacim b-) YFC yoğunluk c-) YFC SEM Görüntüsü

5.1.2. Portland Çimentosu

Bu çalışmada, 42,5R dayanım sınıfına sahip sıradan PÇ kullanılmıştır. Tablo 5.2’de kullanılan çimentonun kimyasal bileşenleri verilmiştir. Su dan sonra, beton dünya üzerinde en çok kullanılan ikinci maddedir ve yıllık üretim hacmi 20 milyar tona ulaşmaktadır [97]. Betonun bağlayıcı matrisi, PÇ’den oluşur. Dünya genelinde kullanılan enerjinin yaklaşık %3’ü çimento üretiminde kullanılmaktadır [98]. Ayrıca, üretim süreci önemli miktarda CO₂ emisyonu üretmektedir. Dünyadaki CO₂ emisyonlarının yaklaşık %5-7’si çimento üretiminden kaynaklanmaktadır [99]. PÇ endüstrisi, yüksek emisyonları ve enerji tüketimi nedeniyle iklim değişikliğinin başlıca nedenlerinden biri olarak kabul edilmekte ve küresel ısınmanın %65’inden fazlasından sorumlu tutulmaktadır [100]. Çimentonun yüksek maliyeti ve büyük çevresel etkisi nedeniyle alternatif bağlayıcı malzemelerin bulunması gerekmektedir. Geopolimer adı verilen yeni nesil bağlayıcılar, çimentonun yerine geçmesi amacıyla araştırılmakta ve geliştirilmektedir. Alümina ve silikat temelli uçucu kül, silis dumanı, metakaolin ve öğütülmüş GYFC gibi atık malzemeler, alkali aktivatörler kullanılarak bağlayıcı özellikler kazanması sağlanmaktadır. Bu atık malzemelerin kullanılması, atık birikimini azaltmakta ve ekonomik avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca, atmosfere salınan CO₂ miktarı %26-45 oranında azalabilir. Ekonomi ve çevre üzerindeki olumlu etkiler göz önüne alındığında, geopolimer harçlar ve betonlar üzerindeki araştırmalar giderek daha yaygın hale gelmektedir. Çimentonun yerini alabilecek malzemeler oluşturmak için farklı aktivatörler, çeşitli puzolanlarla birlikte denenmektedir [101-103].

PÇ genellikle şu şekilde tanımlanır, alçıtaşı ve klinkerinin toz haline getirilmesiyle üretilen hidrolik bağlayıcı olarak tanımlanır. Alçıtaşı ve klinkerinin toz haline getirilmesiyle üretilen hidrolik bağlayıcı aynı zamanda. Günümüzde PÇ yoğun olarak tercih edilmektedir bunun nedeni ise kolay ulaşılabilir bir malzeme olup dış etkilere karşı dayanımı yüksek olan bir malzeme olmasından kaynaklanmaktadır. Genel olarak sıva ve beton yapımında kullanılmaktadır.

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
Özgöl Ağırlık	3,10
Özgöl Yüzey Alan(cm ² /g)	3490

Tablo 5.2. PÇ Kimyasal Bileşimi

5.1.3. Alkali Aktivatörler

AA'lar, çimento içermeyen bağlayıcı sistemlerde (özellikle geopolimerler) Si ve Al bakımından zengin endüstriyel atıkların (UK, cüruf) kimyasal olarak aktive edilip sertleşmesini sağlar. Birçok aktivatör türü bulunmaktadır. Bu çalışmamızda iki adet aktivatör kullanılmıştır. Birincisi NaOH ikincisi ise Na₂SiO₃. Kullanılan ana malzemeleri aktif hale getirmek için kullanılmaktadır (UK, YFC gibi). Aktivasyon için ortam sıcaklığı önemlidir. İdeal sıcaklık 20 °C ve üzeri önerilmektedir. Çevresel etkisi olarak düşük karbon ayak izi özelliği sayesinde PÇ'ye göre daha çevre dostudur [104].

Geopolimer beton, UK ve cüruf bazlı beton sistemlerinde , asidik veya sülfatlı zeminlere dayanıklı altyapılar, yangına dayanıklı yapıların tesisinde tercih edilmektedirler [105].

5.1.3.1. Sodyum Hidroksit

NaOH, genellikle "kostik soda" olarak kısaltılan NaOH, sodyum karbonattan elde edilen bir kimyasal bileşiktir. Fiziksel formu beyaz, kokusuz, katı veya sıvı çözelti halindedir. Suda çözündüğünde egzotermiktir. Alkali aktivasyon amacıyla geopolimer betonlarda bağlayıcı olarak kullanılır. Na₂SiO₃ ile beraber UK ve cürufun aktivasyonunu sağlar. Yüksek pH sayesinde alümino-silikat mineralleri çözündürüp, betonun erken dayanımını artırır [106].

NaOH doğal olarak bulunmasa da oldukça kolay bir şekilde üretilebilir. Normal sofratuzunun elektroliziyle %50'lik bir çözeltinin elde edilmesiyle üretilir. Bu işlem sırasında klor gazı açığa çıkar. Çözeltideki su buharlaştığında katı kostik soda elde edilir. NaOH, 13,5'lik yüksek pH değeri ve mükemmel su çözünürlüğü ile reaktif doğası sayesinde birçok

farklı endüstriyel sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu özellikler, kimya ve tekstil üretiminden sabun ve deterjan yapımına kadar geniş bir yelpazede kullanılmasına olanak tanır. Sulu bir ortamda, sodyum hidroksit kimyasal ayrışma geçirerek serbest hareket edebilen Na^+ ve OH^- iyonlarına ayrılır. Ardından, bu sulu ortamda CO_2 gazı ile etkileşime girdiğinde karbonatlaşma adı verilen kimyasal süreç tetiklenir [107].

NaOH , geopolimer sentezi için en popüler ve önemli alkali aktivatörlerden biridir. Elde edilen bağlayıcının dayanımı, hazırlanan karışımın molaritesi ve yoğunluğu ile belirlenir. Geopolimer harçlarındaki sodyum hidroksit içeriği artırıldıkça, molarite ve yoğunluk arttıkça erken yaş dayanımı önemli ölçüde artar. Ancak aşırı kullanım, yapıda düzensizliklere yol açabilir. Bu nedenle, NaOH oranının dikkatlice optimize edilmesi önemlidir. NaOH kullanıldığında geopolimer harç üretiminde C-S-H ürünleri oluşur; bu da bağlayıcı matrisin oluşumuna yardımcı olur ve kütleme sırasında ısı üretimini artırır [108].

5.1.3.2. Sodyum Silikat

Na_2SiO_3 , sodyum oksit (Na_2O) ve silika (SiO_2) bileşiminden oluşan, camsı yapıda bir bileşiktir. Endüstride en çok su camı olarak bilinir. Suda çözünebilen bir silikat türüdür ve farklı oranlarda Na_2O ve SiO_2 içerebilir. Ticari olarak kullanılan türevler, yabancı maddeler nedeniyle yeşil veya mavi renkte görünebilse de saf hali renksizdir.

Na_2SiO_3 , renksiz ve berrak bir madde olup, kristal yapısına göre çeşitli gruplara ayrılır ve su camı veya suda çözünen cam olarak da bilinir. Sınıflandırma yöntemi olarak X-ray kırınımı kullanılır. Su ile karıştırıldığında yoğun ve şurup kıvamına gelir. Farklı gruplardaki bazı sodyum silikatlar, suda kolayca çözünmeyebilir. Bu bileşenleri çözmenin en etkili yolu, suyu basınç altında ısıtmaktır.

Silika jellerin yapımında kullanılan ana bileşenlerden biri sodyum silikattır. Na_2SiO_3 , deterjan üretiminde, cam için çimento benzeri yapılar oluşturmada, seramik ve çömlek yapımında, yanmaz kâğıt üretiminde, ahşap işleme ve çimento endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca, mukavvanın yapıştırılmasında ve kumların kalıplanmasında iyi bir yapıştırıcı olarak da görev görmektedir.

Sodyum silikat, inşaat, tekstil, madencilik, su arıtma ve temizlik gibi birçok sektörde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Na_2SiO_3 , silikon dioksit ile sodyum karbonatın yüksek sıcaklıkta tepkimeye girmesiyle üretilir [55, 109].

5.1.4. Agregalar

Bu çalışmamızda maksimum 4mm olacak şekilde dere agregası kullanılmıştır. Doğal agregalar, kum ocakları, dere yatakları ve kıyı bölgeleri gibi yerlerde bulunur. Öte yandan, yapay agregalar, bu amaç için özel olarak üretilmiş konkasörler kullanılarak üretilir. İnşaat mühendisliğinde, beton karışımlarından yol ve tünel yapımına kadar geniş bir kullanım alanına sahip olan kritik bir yapı malzemesidir. Kum ve çakıl agregaları, kayaçların doğal etkenler nedeniyle aşınması sonucu çevrede doğal olarak oluşabilir. Ayrıca, daha önce belirtildiği gibi, yapay olarak da üretilbilirler [110].

5.1.5. Doğal Su Kaynağı

Deneyimizde doğal su kaynağı kullanılmıştır. Yeraltındaki mağaralar veya kayaçlar doğal kaynak suyunu depolar ve bu su, doğal olarak "memba"lar olarak bilinen yerlerden yüzeye çıkar. Bu su, herhangi bir müdahale olmadan akmaktadır. Yeryüzüne çıkmadan önce, yeraltında süzülerek temiz hale gelir.

Bir kaynak, yeraltı sularının yüzeye çıktığı yerdir. Bu sular, sabit bir mineral bileşimine sahip olmaları nedeniyle kendine has özellikler taşır. Ayrıca, bu akıntılar yeraltı kayalarının içinden geçerken absorbe ettikleri çeşitli mineraller, mineral oranlarının yüksek olmasına katkıda bulunur. Kaynak sularının saf ve doğal olması dikkat çekicidir. Bu sular, kimyasallardan arındırılmış olmaları ve çeşitli toksinlerden korunmuş olmaları nedeniyle birçok kişi için tercih edilen bir seçenektir. İçerdikleri, insan sağlığı için gerekli olan mineraller, bu tercihin başlıca nedenidir [111, 112].

5.1.6. Magnezyum Sülfat (MgSO₄)

Çalışmamızda üretilen numunelerimizi 90 gün kürledikten sonra ekstra olarak MgSO₄ ile sülfat saldırısına maruz bıraktık. Maruz sonrası Basınç Deneyi, SEM görüntüleri ve UPV sonuçlarını incelendi.

Sülfat minerali epsomit, genellikle Epsom tuzu olarak adlandırılan, Mg, S ve O içeren MgSO₄ kimyasal formülüne sahip inorganik bir tuzun yaygın bir formudur.

Susuz form higroskopik olduğundan havadan kolayca su topladığından doğru ağırlık ölçümü zordur. Bu nedenle, örneğin farmasötik formülasyonlar oluştururken, genellikle hidratlı formlar tercih edilir. Tarihsel olarak, Epsom tuzu banyo tuzlarının bir parçası olmuştur [76].

5.2. Karışım Oranları ve Numunelerin Hazırlanması

5.2.1. Karışım Oranları

Karışım Adı	YFC	Portland Çimento	Kum	Sodyum Silikat	Sodyum Hidroksit	Su
M1.4D6P0	528,54	0,00	1453,47	158,11	13,38	145,47
M1.4D6P10	476,64	52,96	1456,39	158,43	13,40	145,77
M1.4D6P20	424,51	106,14	1459,25	158,74	13,43	146,05
M1.4D8P0	524,91	0,00	1443,49	209,36	17,71	113,90
M1.4D8P10	473,36	52,59	1446,37	209,78	17,75	114,12
M1.4D8P20	421,58	105,40	1449,19	210,19	17,78	114,35
M1.4D10P0	521,33	0,00	1433,65	259,92	21,99	82,75
M1.4D10P10	470,12	52,24	1436,48	260,43	22,04	82,92
M1.4D10P20	418,70	104,67	1439,27	260,94	22,08	83,08

Tablo 5.3. Karışım Oranları

Tablo 5.3’de hazırlanan numunelerin karışım oranları gösterilmektedir. Totalde 9 adet malzeme miktarları değiştirilerek farklı oranlarda numuneler hazırlanmıştır. Numune isimlendirmede M simgesi molariteyi temsil etmektedir. Molarite tüm karışımlarda sabit tutulmuş olup katsayısı 1,4 olarak belirlenmiştir. Molarite, alkali aktivatörlerin kullanılan miktarını temsil etmektedir. Yani belirlenen 1,4 molarite kat sayısı kullanılan sodyum

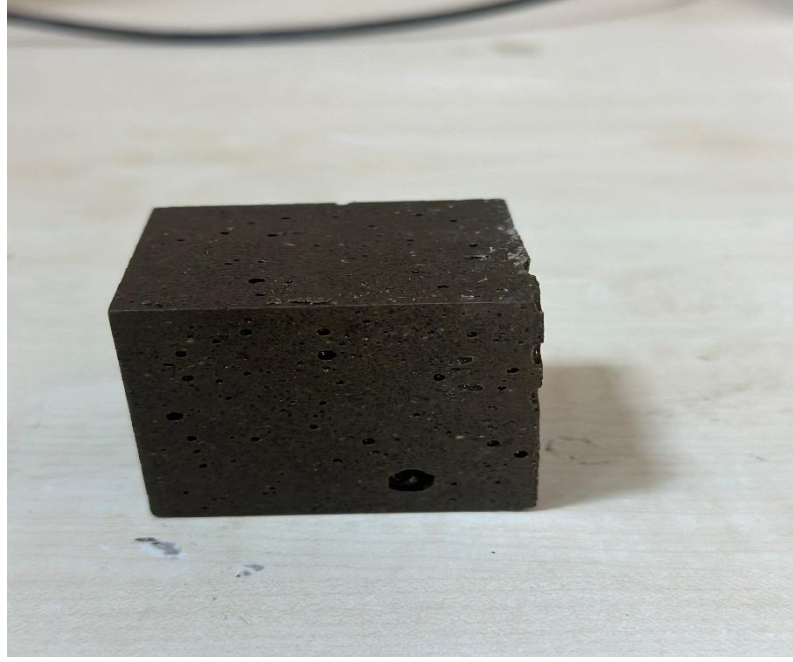
hidroksit ile sodyum silikat miktarından elde edilen bir sabit değerdir. D simgesi AD, P ise PÇ'yi temsil etmektedir.

Numune isimlendirmede her bir harf ve sayı bir anlam ifade etmektedir. Örneğin M1.4D6P0 numunesinde %100 YFC kullanılmıştır (yani %0 PÇ bulunmaktadır). AD'si %6'dır. Molarite kat sayısı 1,4 tür. Karışımlar için üç adet AD belirlenmiştir. Bu dozajlar %6, %8 ve %10'dur. Her bir dozaj miktarına özel üç karışım tipi belirlenmiştir. M1.4D6P0 karışımında PÇ'si %0, M1.4D6P10 karışımında %90 YFC %10 PÇ'si kullanılmıştır. M1.4D6P20 karışımında ise %80 YFC ile %20 PÇ kullanılmıştır. Diğer belirlenen AD yüzdelерinde de aynı şekilde %0, %10 ve %20 PÇ kullanılarak karışımlar ile numuneler oluşturulmuştur.

5.2.2. Numunelerin Hazırlanışı

Numunelerimiz 50x50x50 mm boyutlarında küp şeklinde üretilmiş olup her bir karışım için üç adet örnek numune tasarlandı (örneğin M1.4D6P0 karışımı için 3 adet). YFC'nin aktif hale getirmek için AA kullanıldı. Karışımlarda kullanılan AD %6, %8 ve %10 olarak belirlendi.

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.



Şekil 5.2. Hazırlanan Numune Örneği

5.3. Gerçekleştirilen Deneyler

Yapılan deneysel çalışma için 50x50x50 mm boyutlarında küp numuneler üretildi. Belirtilen boyutlarda üretilen numunelerinin fiziksel özellikleri için UPV, sülfat direnci ve ağırlık değişimi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin dayanım performansını ölçebilmek adına da basınç deşine maruz bırakılmıştır. İç yapı analizini adına da ise SEM görüntüleri elde edilmiştir. Deneysel program, farklı koşullar altında hazırlanmış hibrit AAC/PÇ harçlarının mekanik ve dayanıklılık özelliklerini değerlendirmek amacıyla tasarlanmıştır. Benimsenen yöntemler ve prosedürler, uluslararası standartlarla uyumlu olarak güvenilir ve tekrarlanabilir sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Hammaddeler, granüle edilmiş YFC, PÇ, dere agregası ve AA'lar, tasarlanan oranlara göre dikkatlice tartılmış ve karıştırılmıştır. Alkali aktivatör çözeltisi, NaOH su içinde çözündürülüp oda sıcaklığına soğutulmuş ve ardından Na_2SiO_3 ile karıştırılarak hazırlanmıştır. Taze harç, basınç dayanım testlerinin yapılabilmesi için küp kalıplarına (50 mm × 50 mm × 50 mm) dökülmüştür. Tüm numuneler, boşlukları en aza indirmek için titreşimle sıkıştırılmıştır. 24 saat sonra, numuneler kalıplardan çıkarılmış ve soğuk hava koşullarını simüle etmek amacıyla 0°C'de kontrollü bir ortamda kürlenmeye bırakılmıştır. Harcın basınç dayanımı, 7, 28 ve 90 günlerde ASTM C109/C109M [113]

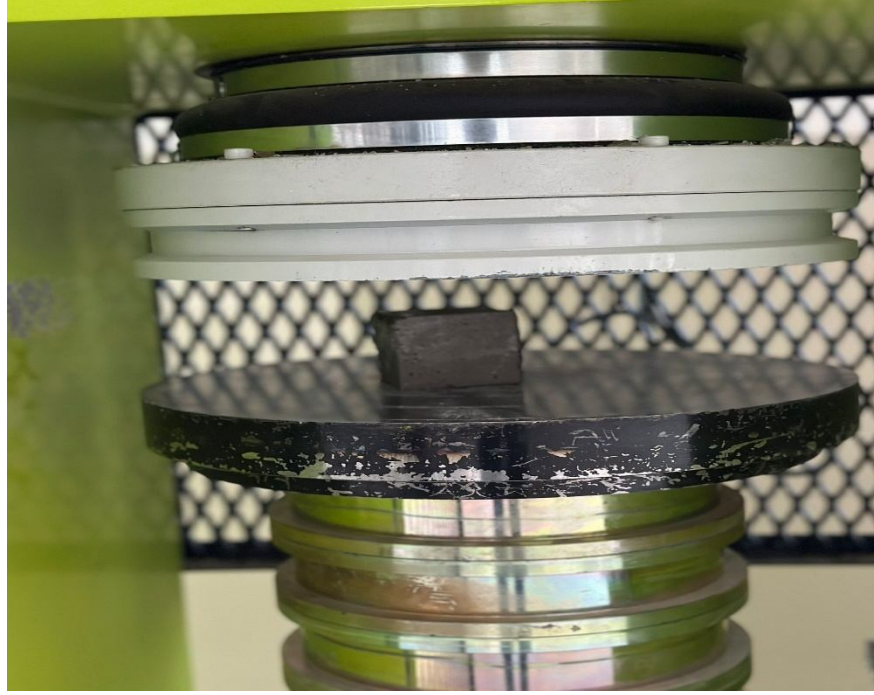
standardına göre test edilmiştir. Basınç testi için hidrolik evrensel test makinesi kullanılmış ve yükleme hızı 0,9 kN/s olarak belirlenmiştir. Numuneler, sülfat saldırısına karşı dirençlerini değerlendirmek amacıyla 90 gün boyunca %5 Na₂SO₄ çözeltisine daldırılmıştır. Basınç dayanımındaki değişiklikler periyodik olarak kaydedilmiştir. Mikro yapısal özellikler, SEM kullanılarak analiz edilmiştir. Numuneler, görüntü kalitesini artırmak için altın kaplanmış ve SEM ile morfoloji, gözenek dağılımı ve hidratasyon ürünleri gözlemlenmiştir (Tablo 5.4). Son olarak da 90 gün kürletip beklettiğimiz numuneleri MgSO₄ ile sülfat saldırılarına maruz bırakarak basınç dayanımı, SEM gözlemleri, UPV ve kütle artışı sonuçlarını incelenmiştir.

Test	Standart	Kullanılan Örnek
Basınç Dayanımı	ASTM C109/C109M[113]	50x50x50 mm ³ küp (Her test için 3)
UPV	ASTM C597[114]	50x50x50 mm ³ küp (Her test için 3)
Sülfat Saldırısı		50x50x50 mm ³ küp (Her test için 3)
SEM		Altın Kaplamalı Örnek

Tablo 5.4. Yapılan Deneyler

5.3.1. Basınç Deneyi

Yapılan basınç deneylerinde basınç presi cihazı kullanılmıştır. Deney için 50x50x50 mm 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. Birinci aşamada numuneler soğutucuda 0 °C sıcaklıkta 7, 28 ve 90 gün bekletildikten sonra pres yardımı ile kırılarak basınç dayanımlarına bakılarak 2. Aşamada ise 0 °C sıcaklıkta bekletildikten sonra 90 gün sülfat etkisine maruz bırakılmış olup pres yardımı ile basınç dayanımlarına bakılarak değerler MPa birimiyle kaydedilmiştir ve dayanımları belirlenmiştir [115].



Şekil 5.3. Basınç Dayanım Cihazı

5.3.2. 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 hareket 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 markalı cihaz deneyde 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 [116].



Şekil. 5.4. UPV Cihazı

5.3.3. Kütle Değişimi

Üretilen numuneler 90 gün boyunca sülfat içeren kür havuzunda bekletilmiştir. 90 gün akabinde numuneler kür havuzundan çıkartılıp hassas terazide tartılıp kür havuzuna koyulmadan önceki ağırlıklarıyla karşılaştırılmıştır [117].

5.3.4. 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.

5.3.5. Sülfat Saldırısı

Sülfat saldırısına maruz bırakacağımız numuneleri 90 gün 0 °C’de krledikten sonra 90 gün boyunca magnezyum sülfata maruz bırakıp tekrardan basınç dayanımı, UPV, SEM ve kütle artışı sonuçları incelenmiştir [118].

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. Basınç Dayanım Deneyi Sonuçları

Total de her bir seri için üç adet numune oluşturulmuş olup 9 seriden 27 adet numune üretilmiştir. Üretilen numuneler 7. Gün 28. Gün ve 90. Gün sonlarında basınç dayanımları ölçülmüştür.

Şekil 6.1’de PÇ’si ile granüle edilmiş YFC’nin %0, %10 ve %20 oranlarında yer değiştirilmesinin ve bağlayıcının kütlece AD yüzdesi %6, %8 ve %10 arasında değiştirmenin, 0°C’de 7, 28 ve 90 gün boyunca kürlenene hibrit AACÇM harçlarının basınç dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir.

%6 AD’de, karışımdaki PÇ içeriği arttıkça, tüm kürlenme yaşlarında basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. %0 PÇ içeren karışım (%100 YFC), 7 günde 5,00 MPa, 28 günde 15,27 MPa ve 90 günde 42,33 MPa ile en düşük basınç dayanımını göstermiştir. %0 PÇ içeren karışımın (%100 YFC) en düşük basınç dayanımını göstermesinin muhtemel nedeni, YFC’nin PÇ’sine kıyasla daha yavaş reaktivitesidir. YFC, gerekli C-S-H jellerini oluşturmak için alkali aktive olmaya dayanır ve düşük sıcaklıklarda (0°C), bu aktivasyon süreci önemli ölçüde yavaşlayabilir. Ayrıca, PÇ, hidratasyon ürünlerinin daha hızlı bir kaynağını sağlar ve bu da erken dayanım gelişimine katkıda bulunur. PÇ eklenmediğinde, dayanım artışı daha yavaş olur, özellikle erken kürlenme aşamalarında (7 ve 28 gün gibi), bu da daha düşük basınç dayanımına yol açar. Zamanla (90 gün), dayanım artar çünkü YFC tamamen reaksiyona girer, ancak yine de PÇ içeren karışımların gerisinde kalır.

0°C’de kürlenene ve %10 PÇ (%90 YFC) içeren karışım, 7 günde 5,54 MPa, 28 günde 33,43 MPa ve 90 günde 50,85 MPa basınç dayanımı ile daha üstün bir dayanım sergilemiştir. Bu karışım ile PÇ içermeyen karışım karşılaştırıldığında, 7, 28 ve 90 günlerdeki dayanım artışları sırasıyla %10,8, %118,92 ve %20,12 olarak ölçülmüştür.

PÇ, erken hidratasyon reaksiyonlarını hızlandırmaya yardımcı olduğu için %10 PÇ (%90 YFC) içeren karışım daha yüksek basınç dayanımına sahip olmuştur. PÇ, kalsiyum iyonlarının hızlı bir kaynağını sağlar ve bu, dayanım gelişimi için kritik bir bileşen olan C-S-H jelinin oluşumunu teşvik eder. Bu, 7 gün sonra %10,8' lik dayanım artışının nedenini açıklar.

PÇ, aynı zamanda YFC aktivasyonunu iyileştirerek daha etkili bir hidratasyon sürecine yol açtığı için, dayanım artışı (%118,92) 28 günde daha belirgin hale gelir. PÇ ve YFC birlikte kullanıldığında, daha yoğun ve daha uyumlu bir mikro yapı oluşturarak dayanımın daha da artmasına neden olur [119].

PÇ ile YFC arasındaki etkileşim, 90 gün sonra da mikro yapıyı geliştirmeye devam etmektedir, ancak çoğu hidratasyon süreci zaten gerçekleştiği için dayanım artış hızı %20,12'ye düşer. Çimento içermeyen bir karışıma kıyasla, PÇ'sine sinerjik etkisi, karışımın genel reaktivitesini artırır ve uzun vadeli basınç dayanımını iyileştirir.

En yüksek basınç dayanımı, %20 PÇ içeren karışımda gözlemlenmiştir. Bu karışım, referans karışıma (%0 PÇ) kıyasla sırasıyla 7, 28 ve 90 günlerde %234,6, %155,99 ve %41,62 oranında iyileşmeler göstermiştir. PÇ, hidratasyon süreci aracılığıyla dayanım gelişimine katkıda bulunur. Daha yüksek çimento içeriğinde, hidratasyon sırasında oluşan C-S-H miktarı artar, bu da dayanım kazanımının anahtar faktörüdür. Bu durum, özellikle erken kürlenme yaşlarında (7 ve 28 gün) önemlidir, çünkü PÇ'sine hidratasyon süreci bu dönemde daha baskındır. Alkali-aktif sistemlerde, YFC ve PÇ birleşimi sinerjik bir etki yaratır. PÇ'sinin hidratasyonu, kalsiyum hidroksit üretir, bu da daha sonra cürufatı bulunan alüminosilikat fazlarıyla reaksiyona girerek ek C-S-H jelleri ve C-A-S-H oluşumunu teşvik eder. Bu ikincil reaksiyon, özellikle daha fazla PÇ'si mevcut olduğunda, dayanımı artırır. 7 ve 28 günlerde, PÇ içeriğindeki artış, cürufatı kıyasla daha hızlı reaksiyona giren daha fazla klinker fazı sağlar ve bu da erken dayanımın önemli ölçüde katkı sağlar. Bu kürlenme yaşlarında gözlemlenen yüksek yüzdelik artışlar (%234,6 ve %155,99), PÇ'nin hibrit sistemdeki erken dayanım gelişimine güçlü katkısını yansıtır. 90 günde, basınç dayanımındaki görece iyileşme (%41,62) önceki aşamalara kıyasla daha düşüktür. Bunun nedeni, zamanla cürufatın alkali aktivasyonunun daha belirgin hale gelmesi ve dayanım artışının PÇ içeriğine daha az bağımlı olmasıdır. Ancak, bu aşamada bile PÇ'nin varlığı,

referans karışıma kıyasla üstün basınç dayanımını koruyarak sağlam bir yapısal matris sağlar. %6 AD hem cürufu hem de PÇ verimli bir şekilde aktive etmeye yardımcı olur ve harçların mekanik özelliklerini artıran ek bağlayıcı fazların oluşumuna katkıda bulunur. Aktivatör, özellikle erken aşamalarda daha hızlı reaksiyon kinetiğini teşvik ederek, daha yüksek PÇ içeriğinin etkisini artırır.

Cüruf ve çimento bileşenleri, %8 AD'de daha iyi aktive olduğu için, karışımlar, çimento konsantrasyonuna bakılmaksızın, %6 AD içeren karışımlara göre tüm kürlenme yaşlarında (7, 28 ve 90 gün) daha yüksek basınç dayanımı sergilemiştir. Daha büyük bir AD, genellikle daha fazla alkali iyonu sağlar ve bu da hidrasyonu iyileştirir ve C-S-H jel oluşumunu artırır, her ikisi de dayanım artışı için önemli faktörlerdir [120, 121].

%10 PÇ ile YFC'nin yer değiştirilmesiyle, 7 günde basınç dayanımı %14,75 ve 28 günde %44,25 oranında artmıştır. Ancak, %8 AD kullanıldığında, 90 günde basınç dayanımı, PÇ içermeyen karışıma kıyasla %8,65 oranında azalmıştır. PÇ'nin hızlı hidrasyon süreci, erken dayanım gelişimine önemli bir katkı sağlar. PÇ, karışıma eklendiğinde erken basınç dayanımı artar çünkü su ile birleşerek C-S-H oluşturur [120, 121]. Cürufa kıyasla, genellikle dayanım daha yavaş gelişen cüruf, PÇ etkisi ile 7 ve 28 günlerde hızlı bir dayanım artışı sağlar, bu da özellikle dikkat çekicidir. AA (%8 AD) muhtemelen cüruf ile PÇ arasındaki reaksiyonu hızlandırarak, özellikle erken kürlenme aşamalarında daha hızlı bir dayanım gelişimi sağlar. AA ve PÇ birlikte çalışarak, 28 günden sonra önemli bir dayanım artışı gerçekleştirir [122].

Cürufa kıyasla, daha uzun bir aktivasyon ve reaksiyon süresine sahip olan PÇ'nin ana hidrasyon reaksiyonları zamanla yavaşlar ve devam eden dayanım artışına daha az katkıda bulunur. 90. gün itibarıyla PÇ içeriği, daha fazla hidrasyon için tüm potansiyelini tüketmiş olabileceğinden, dayanımda bir plato veya hatta azalma meydana gelebilir. Sürekli alkali aktivasyon nedeniyle, C-A-S-H ve diğer bağlayıcı fazların olduğu cüruf bazlı sistemler, genellikle daha uzun süreler boyunca güçlenir. PÇ'nin, cüruf yerine kullanılmasının ardından, cürufun yavaş aktifleşmesinin uzun vadeli avantajları azalır.

PÇ içermeyen karışıma kıyasla, %10 PÇ içeren karışımın 90 günde daha düşük bir dayanımı vardır çünkü cürufun daha yavaş ve sürekli dayanım artışı kısıtlanmıştır. Daha fazla PÇ içeren karışımlar, hidrasyon süreci ilerledikçe başlangıçta daha yoğun bir mikro

yapı kazanabilir, ancak bu durum daha sonra gözeneklerin daha az iyileşmesine yol açabilir çünkü cüruf, genellikle uzun vadede mikro yapıyı geliştirmeye yardımcı olur. Eğer cüruf içeriği azaldığı için uzun vadeli gözenek iyileşmesi azalırsa, 90 gündeki basınç dayanımı olumsuz etkilenebilir. %8 AD kullanılarak, %20 PÇ ile YFC'nin yer değiştirilmesi, PÇ içermeyen karışıma kıyasla 7 günde %93,58, 28 günde %52,74 ve 90 günde %14,57 oranında basınç dayanımını artırmıştır. PÇ'nin hızlı hidratasyonu, Ca(OH)_2 ve C-S-H üretir; her ikisi de erken dayanım gelişimi için önemlidir [122]. 7 günde güçlü erken dayanım artışının birincil nedeni, PÇ'nin hızlı sertleşmesi ve cürufun gecikmeli aktivasyonunu geride bırakmasıdır. Erken dayanım gelişimi, PÇ'nin hidratasyonunu hızlandıran AA (%8 AD) ile iyileştirilmiştir. PÇ'nin hızlı reaksiyonu ve dayanımı artıran hidratasyon ürünlerinin oluşumu, bu da 7 günde %93,58'lik önemli bir artışa yol açmıştır. 28 günde, PÇ hala hidratasyon sürecindedir, ancak daha yavaş bir hızda. Aynı zamanda, YFC'nin alkali aktivasyonu daha büyük bir rol oynamaya başlar [120]. %52,74'lük dayanım artışı hem çimento hidratasyonunun hem de YFC'nin alkali aktivasyonunun genel dayanımı artırdığını gösterir, ancak PÇ'nin hızlı hidratasyonunun başlangıçtaki üstünlüğü azalmakta başlamaktadır. 90. güne gelindiğinde, PÇ'nin hidratasyon reaksiyonlarının çoğu tamamlanmış ve dayanım artışı sağlama etkisi zirveye ulaşmıştır. Cüruf daha yavaş reaksiyona girer ve zaman içinde dayanım kazanmaya yardımcı olur, bu nedenle YFC'nin alkali aktivasyonu şu anda dayanımın sürekli olarak artmasından başlıca sorumludur. Ancak, %20 PÇ, YFC'nin %20'sini yer değiştirdiği için uzun vadeli alkali aktivasyon için daha az cüruf mevcuttur. Cüruf içeriğindeki bu azalma, uzun vadeli dayanım gelişimi potansiyelini kısıtlar ve bu da 90 günde önceki aşamalara kıyasla daha düşük bir artış (%14,57) ile sonuçlanır. %10 AD ile %100 YFC içeren karışım, %6 ve %8 AD'ye maruz kalan %100 YFC içeren karışımlara kıyasla hem 7 hem de 28 günde en yüksek basınç dayanımını sergilemiştir. Ancak, 90 günde, basınç dayanımı %6 AD içeren karışımdan daha yüksek, ancak %8 AD içeren karışımdan daha düşüktü. Saf YFC'nin basınç dayanımındaki genel gelişim, AD'nin reaksiyon kinetiği ve YFC'nin uzun vadeli aktivasyonu ile ilişkilendirilerek açıklanabilir: %10 AD, 6% veya %8 AD'ye kıyasla alkali iyonlarının daha fazla mevcut olduğunu gösterir, bu da YFC kitlesinin daha hızlı aktive olmasını sağlar ve böylece C-S-H ve C-A-S-H bağlayıcı jellerinin erken oluşumuna yol açar [123]. Aksine, daha yüksek alkali konsantrasyonu, cüruf parçacıklarının çözünmesini artırır ve jel oluşumunu hızlandırarak 7 ve 28 günde maksimum basınç dayanımına ulaşılmasını sağlar. Zaman içinde reaksiyon için sistemde daha fazla malzeme

kalmadığından, %10 AD içeren karışımdaki YFC'nin az miktarda reaktif bileşenleri, erken kürleme döneminin sonunda çoğunlukla reaksiyona girmiştir ve bu da dayanım gelişiminde bir plato oluşmasına neden olmuştur. Daha düşük alkali mevcudiyeti nedeniyle, %8 AD daha yavaş ve daha kademeli bir reaksiyona izin verir. Bu, %10 AD içeren karışıma kıyasla daha uzun bir jel oluşum sürecine ve 90 günden sonra daha yüksek basınç dayanımlarına yol açar.

Ayrıca, sonraki efloresans veya alkali zengin fazlar dayanım üzerinde önemli bir katkı sağlamadığından, %10 AD sisteminde alkali iyonlarının aşırı miktarda bulunması söz konusu olabilir. Bu fazlar belirli matris hacimlerini kapsayabilir, ancak mikro yapıyı geliştirmiyor gibi görünmektedir. Sonuç olarak, bu fazlar, ilerleyen zamanlarda dayanım artışının etkinliğini azaltıyor gibi görünmektedir. Gözenek şeklinin gecikmeli iyileştirilmesine olanak tanıyan gecikmiş reaksiyon kinetiği, %8 AD karışımı için avantajlı olabilir. %10 AD karışımının daha hızlı reaktivitesine kıyasla, bu yöntem zamanla daha yoğun bir matris oluşturur ve 90 günde daha yüksek dayanım sağlar.

%10 AD ile %10 YFC yerine PÇ ekleyerek, karışımın basınç dayanımı, %6 AD içeren karışıma kıyasla tüm kürleme sürelerinde (7, 28 ve 90 gün) daha yüksek olmuştur. Ancak, 28 ve 90 günde, basınç dayanımı %8 AD içeren karışımdan biraz daha düşük olmuştur. AD'nin artırılması, daha fazla alkali iyonunun PÇ ve YFC'nin çözünmesini sağlar, bu da C-S-H ve C-A-S-H jellerinin gelişimini hızlandırır [124].

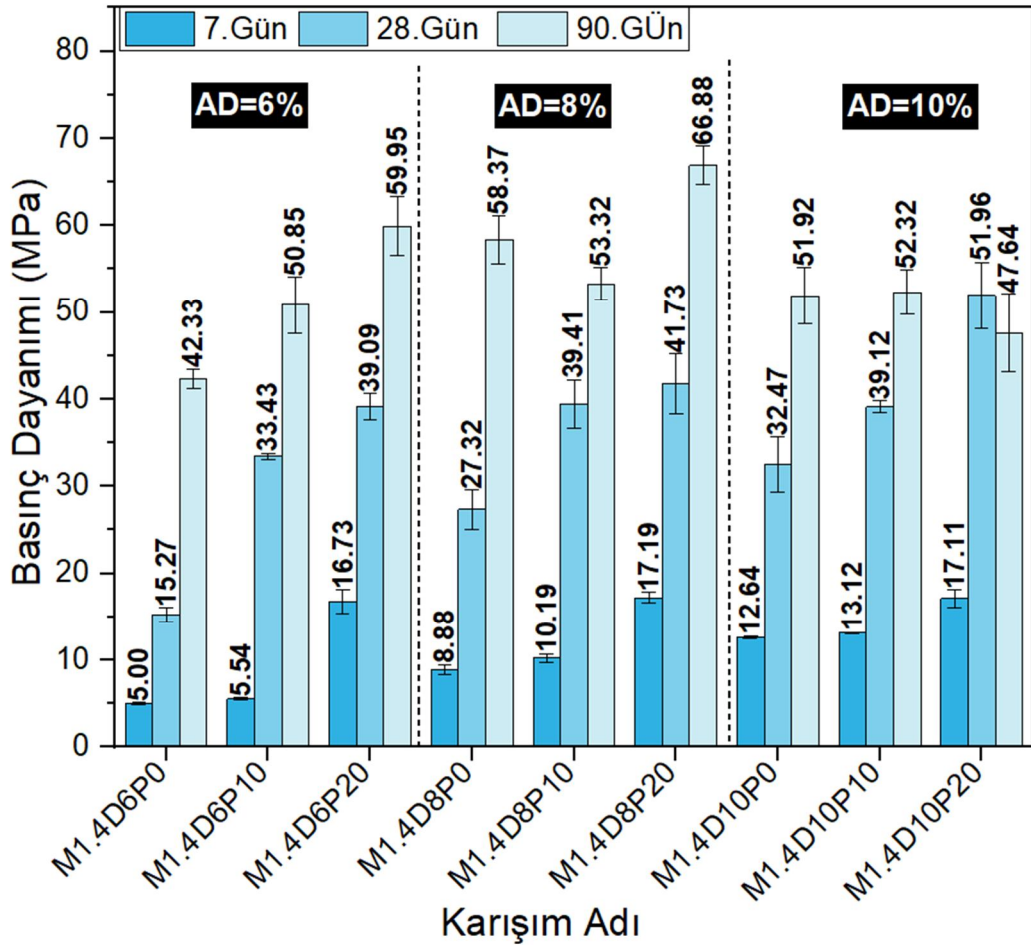
Basınç dayanımının artışı, doğrudan bağlama aşamalarının bir sonucudur. %6 AD'deki düşük alkali konsantrasyonu, reaksiyon kinetiğini sınırlayarak tüm kürleme sürelerinde düşük dayanım ve gecikmeli jel oluşumuna neden olur. Hızlı bir şekilde hidratasyona giren klinker fazlarının eklenmesiyle, PÇ, YFC'nin yerine geçer ve erken dayanım artırıcı ürünler olan C-S-H ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ üretir. Erken kürleme yaşlarında yüksek AD (%10) daha sonra gelen kürleme aşamalarındaki güçlü hidratasyon reaksiyonlarına ek bir güç sağlar. %6 AD ile alkali seviyesi düşük olduğunda, PÇ veya YFC yeterince aktive olmayabilir ve bu da karşılaştırmalı olarak daha düşük dayanım ile sonuçlanır. Bu sistemlerin, alkali iyonlarının bol olduğu %10 AD'de, katkısı düşük olan sodyum kalsiyum silikat hidratlar gibi alkali zengin fazlar geliştirmesi beklenir. Bu fazla alkali, yüksek gözeneklilik veya efloresans nedeniyle mikro yapısal bir bozulmaya yol açabilir ve bu da kürleme süreleri

ilerledikçe dayanımın marjinal olarak azalmasına neden olabilir. Cüruf aktivasyonu ve hidratasyon kinetiği için ideal oran %8 AD'dır. %10 AD'ye kıyasla, bu ideal alkali konsantrasyonu, zaman içinde tutarlı jel oluşumunu ve daha ilerleyici bir gözenek iyileştirme sürecini teşvik eder, bu da nihayetinde 28 ve 90 günlük yaşlarda daha yoğun bir mikro yapı ve daha yüksek basınç dayanımı ile sonuçlanır. %10 AD karışımında çoğu reaktif bileşen daha hızlı tükenirken, %8 AD'deki YFC'nin daha yavaş aktivasyonu, daha sonraki aşamalarda daha fazla dayanım artışı sağlar. %8 AD karışımının daha yavaş ama uzun süreli yanıt süreci, 28 ve 90 günde daha iyi uzun vadeli dayanım artışı sağlar. Buna karşın, %10 AD karışımı, daha az rafine olmuş bir mikro yapı ve alkali-aktif fazların potansiyel doygunluğu nedeniyle uzun vadeli dayanımda hafif bir azalma gösterirken, erken aşamalarda dayanımı hızlı bir şekilde artırır. %10 AD ile %20 YFC yerine PÇ eklenmiş karışım, 7 günde basınç dayanımı benzerdi. %6 ve %8 AD içeren karışımlara kıyasla, %20 PÇ içeren karışım 28 günde maksimum basınç dayanımını gösterdi. Diğer taraftan, %6 ve %8 AD içeren karışımlar arasında, %20 PÇ içeren karışım 90 günde en düşük basınç dayanımını gösterdi ve 28 günlük dayanımına kıyasla bir azalma yaşandı. Yüksek alkali seviyeleri, bağlanma sürelerini kısaltır ve basınç dayanımının gelişimini hızlandırırken, aynı zamanda AAC'nin kuruma büzülmesi, eğilme dayanımının kaybı ve klorür penetrasyonuna karşı direncin azalması gibi önemli olumsuz etkiler de yaratmaktadır. Bu, yapılan test sonuçlarına göre belirtilmiştir [36, 125].

Diğer karışımlara kıyasla, %20 PÇ içeren %10 AD karışımı, 7 günde benzer basınç dayanımı gösterir. Bunun nedeni, PÇ'nin erken dayanımı hemen destekleyen hidratasyon ürünleri (örneğin C-S-H) sağlamasıdır. %10 daha yüksek AD, PÇ ve YFC çözünmesini hızlandırır ve bu da bu erken aşamada tüm karışımlar için benzer dayanım gelişimine yol açar. %10 AD'de, daha yüksek alkali içeriği nedeniyle hem PÇ hem de YFC hızla hidratlanır, bu da $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve C-S-H oluşturur [123]. %20 PÇ içeren karışım, PÇ hızlı hidratlandığı için erken basınç dayanımı artar. Daha düşük PÇ yüzdesine sahip karışımlarla karşılaştırıldığında, PÇ içeriği, mikro yapıyı önemli ölçüde iyileştirerek 28 günde basınç dayanımını artırır. Hem YFC hem de PÇ, %20 PÇ karışımını aktive etmek için birlikte çalışır. YFC'nin alkali aktivasyonu, dayanım gelişimine katkıda bulunmaya devam ederken, PÇ ilk hidratasyonu hızlandırır.

%6 ve %8 AD içeren karışımlarla karşılaştırıldığında, bu bileşiklerin birleşik etkisi 28 günde en iyi basınç dayanımını sağlar. 90 gün sonunda, PÇ'nin çoğu hidrasyon reaksiyonu tamamlanmış olur ve dayanım artırıcı etkileri azalır. Öte yandan, YFC'nin aktivasyon süreci daha yavaş olup daha uzun sürer. Zamanla, C-A-S-H dahil olmak üzere daha fazla bağlayıcı faz oluşur. %20 PÇ içeren karışım, PÇ' nin reaktif potansiyelini erken tüketmiş olabilir, bu da uzun vadede güç kazancının azalmasına neden olmuştur. %10 AD'de, yüksek AD alkali iyonlarının fazlalığına yol açabilir ve bu da sodyum-kalsiyum silikat hidratları gibi daha az faydalı fazların oluşumunu teşvik edebilir. Bu fazlar daha az yoğundur ve C-S-H ve C-A-S-H kadar basınç dayanımına güçlü bir şekilde katkıda bulunmaz. Fazla alkali ayrıca daha az rafine olmuş bir gözenek yapısına yol açarak uzun vadeli dayanımı azaltabilir [36, 126, 127].

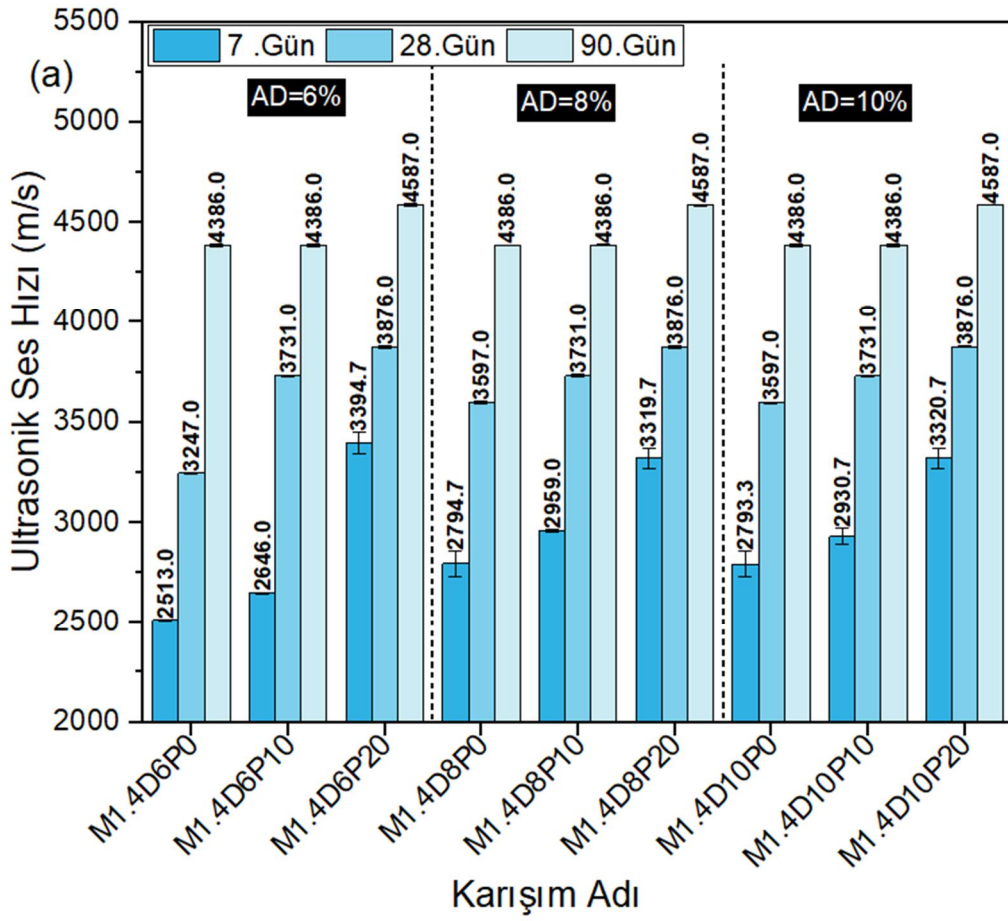
PÇ'nin hidrasyonu doksan gün sonra yavaşlar ve dayanımda platoya ulaşılır. Daha yüksek PÇ konsantrasyonuna sahip karışımlarda, alkali aktivasyonunun uzun vadeli avantajları sınırlıdır, çünkü cürufun yavaş ve sürekli aktivasyonu, bu noktada daha belirgin hale gelir. Sonuç olarak, %20 PÇ içeren karışım, YFC'nin daha yavaş aktivasyonunun engellenmesi nedeniyle 90 günde dayanımda bir azalma gösterir ve bu da zamanla daha az belirgin bir dayanım artışıyla sonuçlanır. %8 AD içeren karışımlarda alkali aktivasyonu daha dengeli ve uzun süreli olup, bu da zamanla daha etkili bir dayanım gelişimi sağlar. %8 AD içeren karışımların, %20 PÇ içeren %10 AD karışımlarından bu noktada daha iyi performans göstermesinin nedeni, YFC' nin daha uzun bir süre boyunca yavaş ama sürekli aktivasyonunun 90 günde dayanımın gelişmesine katkıda bulunmasıdır. %6 AD içeren karışımlar, biraz daha uzun aktivasyon kinetiğine sahip olabilir, ancak yüksek alkali konsantrasyonuna sahip karışımlara (%10 AD) kıyasla YFC'nin uzun vadeli dayanım artışını sürdürmede daha etkili olurlar; çünkü yüksek alkali konsantrasyonu zamanla bazı verimsizliklere neden olabilir.



Şekil 6.1. Basma Dayanım Grafiği

6.2. Ultrasonik Ses Hız Ölçümü

Şekil 6.2, PÇ %0, %10 ve %20 oranlarında granüle YFC ile değiştirilmesinin ve AD'nin %6, %8 ve %10 olarak ayarlanmasının, 0°C'de 7, 28 ve 90 gün boyunca kürlenmiş hibrit AACÇM harçlarının ultrasonik ses hızı (UPV) üzerindeki etkisini göstermektedir. Basma dayanımı sonuçlarına benzer şekilde, UPV değerleri, kürlenme süresinin uzamasıyla arttı ve bu da mikro yapıdaki yoğunlaşma ve gelişimin devam ettiğini gösterdi [119, 128]. Ayrıca, YFC'nin yerine PÇ kullanılması, AD içeriğinden bağımsız olarak genel olarak UPV değerlerinde bir artışa yol açtı. Daha uzun kürlenme süreleri ve PÇ'nin YFC ile yer değiştirilmesiyle UPV değerlerindeki artışa bir dizi faktör katkıda bulunabilir.



Şekil 6.2. Ultrases Hız Ölçüm Grafiği

Kürleme süresi ile UPV değerlerindeki artış, C-S-H ve C-A-S-H gibi yoğun bağlayıcı fazların üretimini sağlayan devam eden jeopolimerleşme ve hidrasyon süreçlerinin bir göstergesidir [36]. Bu fazlar, matrisin boşluklarını azaltarak ve birleştirici parçacıkları bağlayarak, ultrasonik dalgaların iletme yeteneğini artırır ve matrisin üniformluğunu iyileştirir. PÇ'nin katkı sağladığı CaO yüzdesi, YFC kadar yüksek değildir. C-S-H jeli, matris boşluklarını azaltmada ve partikülleri bağlamada etkili bir şekilde gelişir. Bu yoğunlaşmanın neden olduğu dalga yayılma artışı, daha yüksek UPV seviyelerine yol açar. YFC'ye kıyasla, PÇ'nin hidrasyon ürünleri, boşlukları daha etkili bir şekilde doldurarak, gözenek kapasitesini azaltır.

Düşük gözeneklilik, ultrasonik dalgaların daha az zayıflamasına ve dağılmasına izin vererek UPV'yi daha da artırır. YFC yerine PÇ kullanılması, jeopolimer matrisinin sürekliliğini güçlendirdiği ve bu da daha az mikromatkaplar ve daha stabil bağlama fazları

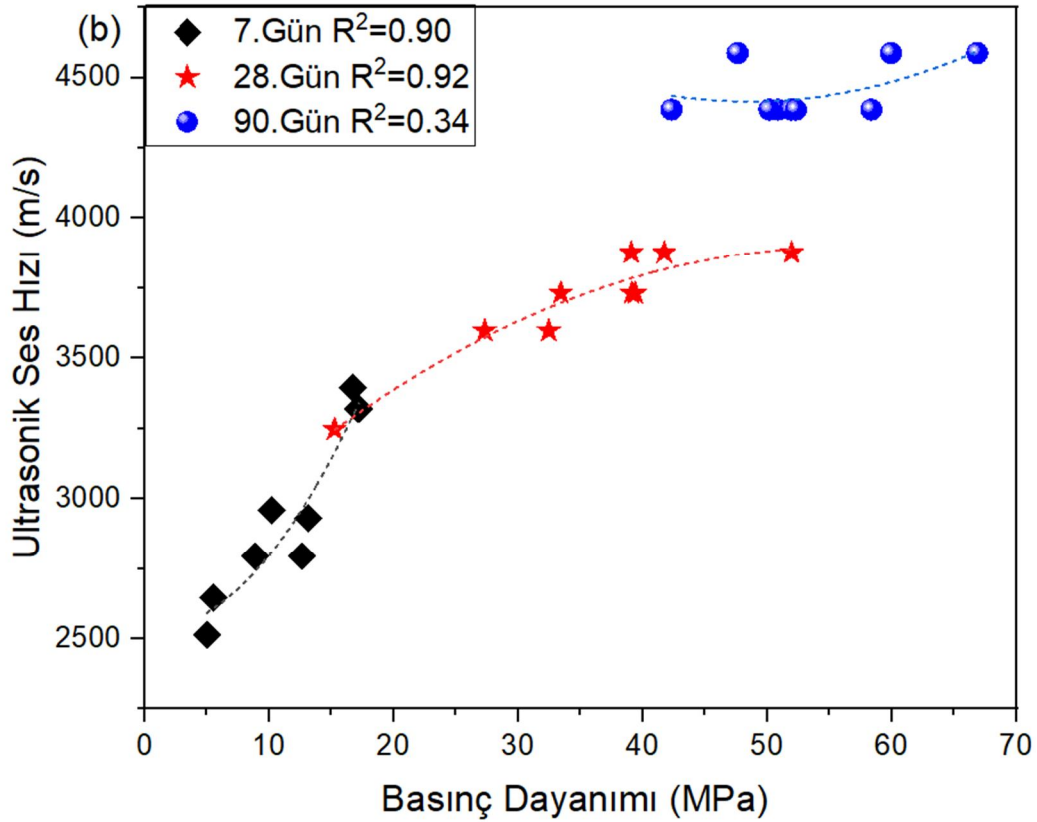
oluşturduğu düşünülmektedir. Bu yapısal değişiklik, ultrasonik dalgaların daha iyi iletilmesini sağlar. UPV'nin artışı, AD'den bağımsız olarak gerçekleşir çünkü PÇ, tüm AD seviyelerinde hidrasyon sürecini ve jel oluşumunu sürekli olarak artırır. AD, YFC'nin aktive edilme etkinliğini etkileyebilse de PÇ'nin kendi başına hidrasyon mekanizması, AD seviyesinden bağımsız olarak matrisi güçlendirir. Şekil 6.3'de, basınç dayanımı ile UPV sonuçları arasındaki ilişki gösterilmektedir ve 7. ve 28. günlerde sırasıyla 0,90 ve 0,92'lik korelasyon katsayısı (R^2) değerleri ile iyi bir korelasyon gözlemlenmiştir. Ancak, 90. günde R^2 değeri 0,34 ile oldukça düşük kalmıştır. Bu veriler, 7. ve 28. günlerde basınç dayanımı ve UPV'nin güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu, ancak 90. günde bu ilişkinin zayıfladığını göstermektedir.

Ancak, 90. günde, ilişki çok daha azdı ve R^2 değeri yalnızca 0,34'tü. Bu, 90. günde korelasyonun azalmasının, UPV'yi etkileyen faktörlerden farklı değişkenlerin, kürün ilerleyen aşamalarında basınç dayanımını belirlemede daha önemli olabileceğini gösteriyor. Bu durum, UPV ölçümlerinin devam eden mikro yapısal değişiklikleri veya gözenek yapısı iyileşmesini doğrudan hesaba katmamasıyla açıklanabilir. Hem basınç dayanımı hem de UPV, matrisin ilk büyümesiyle, özellikle C-S-H ve C-A-S-H jellerinin oluşumu ile yakından ilişkili olduğu için, erken kür yaşlarında (7 ve 28 gün) daha güçlü bir korelasyon sergilerler. Materyalin 90. günde yaşlandıkça daha önemli hale gelen diğer mikro yapısal aktiviteler arasında ikincil reaksiyonlar, reaksiyona girmemiş parçacıkların yoğunlaşması ve gözenek yapısının iyileştirilmesi yer alır. Bu süreçler, basınç dayanımı ve UPV arasındaki ilişkiyi zayıflatır ve etkileri tutarsız olabilir [129, 130]. Zamanla, özellikle yüksek miktarda PÇ veya AD içeren karışımlarda, kuruma büzülmesi, ısı etkileri veya iç gerilmeler nedeniyle jeopolimer veya hibrit sistemde mikro çatlaklar gelişebilir. Bu mikro çatlaklar, dalga yayılımını bozarak UPV'yi azaltabilir, ancak eğer ana matris hâlâ sağlam kalıyorsa, basınç dayanımı üzerindeki etkileri daha az belirgin olabilir. Daha sonraki kürleme aşamalarında, basınç dayanımını etkileyen gözenek yapısı değişiklikleri, UPV'den daha çok, kapiler gözenekliliğin azalması ve gözenek iyileştirilmesi gibi süreçleri içerir [130].

Matrisin sürekliliği, daha ince gözenek özelliklerinden daha fazla UPV'yi etkiler. 90 gün boyunca gözenek ağı değiştikçe, basınç dayanımındaki artışlarla UPV' deki değişiklikler arasındaki korelasyon daha az olabilir [36]. UPV testi, malzemenin nem içeriğinden

etkilenir. Eğer örneklerin kuruma veya nem dağılımları farklıysa, 90 gün sonra bağlantı daha da zayıflayabilir. Bu durum, UPV değerlerinde farklılıklara yol açabilir, ancak basınç dayanımını önemli ölçüde etkilemeyebilir.

YFC içeren sistemlerde, daha yavaş çelik cürufunun aktivasyonu, sonraki kütleme aşamalarında basınç dayanımını artırır. UPV, sürekli kimyasal reaksiyonlardan ziyade tüm matrisin sertliği ve sürekliliğine daha duyarlıdır, bu nedenle bu yavaş tepki, UPV'yi orantılı olarak artırmaz.

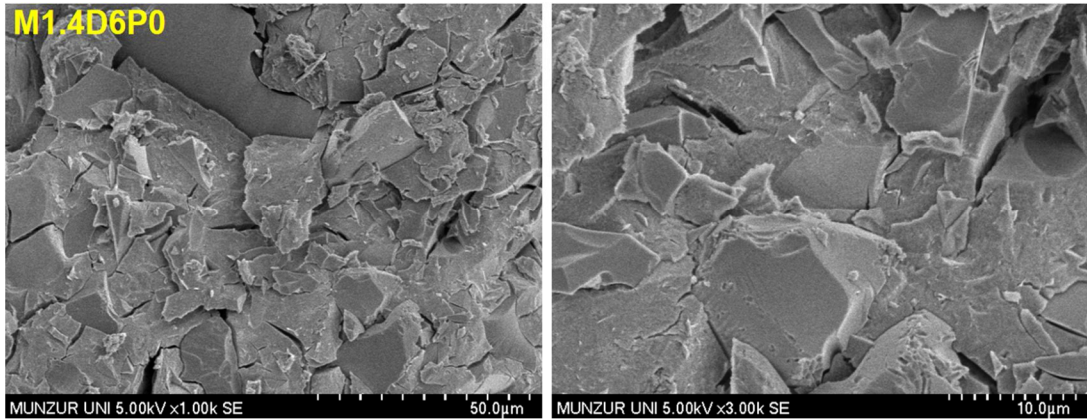


Şekil 6.3. Ultrases Hız Ölçüm ve Basınç Dayanım Arasındaki Korelasyon Grafiği

6.3. SEM Gözlemleri

Şekil 6.4'de, M1.4D6P0 karışımının SEM görüntüsü gösterilmektedir. Sıfırın altı sıcaklıklarda, YFC hidratasyonunun tetiklenmesi için gereken aktivasyon enerjisi çok daha düşüktür. Hidratasyon ürünlerini (C-S-H jeli, C-A-S-H jeli) üretmek için gerekli kimyasal

süreçler, 0°C'de çok yavaş gerçekleşir. Genellikle YFC aktivasyonunu hızlandıran kalsiyum hidroksit katkısı, bu karışımdan PÇ eksik olduğundan dolayı ortadan kaldırılır. Bu koşullar altında, AD (%6 AD) verimli jeopolimerizasyonu başlatmak için yeterli alkaliniteyi sağlamıyor olabilir [131]. Reaktivite, daha büyük bir AD kullanarak veya iki aktivatör kullanılarak iyileştirilebilir. SEM görüntüsü muhtemelen reaktif olmayan birçok YFC partikülünü gösteriyor ve bu da 0°C' deki düşük reaktiviteyi vurguluyor. Bu reaktif olmayan partiküller, mukavemet gelişimini sadece hafifçe destekler. Silika ve alüminanın yeterince çözünmemesi, kısmi olarak reaksiyona girmiş cüruf partiküllerini gösteriyor olabilir ve bu da jeopolimerizasyon sürecini daha da engeller. Yüksek porozite ve mikro boşlukların oluşumu, mikro yapıda görülmektedir. Bu boşluklar, yetersiz yoğunlaşma ve tamamlanmamış jel oluşumunun doğrudan bir sonucu olup, bu da basınç mukavemetini düşürür. Cüruf partikülleri, bağlayıcı matrisin dağılmış ve zayıf bağlantılı hidratasyon ürünleri sergilemesi durumunda iyi bağlanamayabilir. Karışımdaki su, 0°C'de donabilir ve bu da hidratasyon sürecini engelleyerek bağlayıcı jellerin gelişme yeteneğini daha da kısıtlar. Buzun genişlemesi, matris çatlaklarına neden olabilir ve bu da yapısal bütünlüğü tehlikeye atar. Kimyasal aktivite 0°C'de engellendiği için, erken yaş mukavemeti muhtemelen anlamlı bir seviyede kalacaktır [132].



Şekil 6.4. M1.4D6P0 karışımının SEM görüntüsü

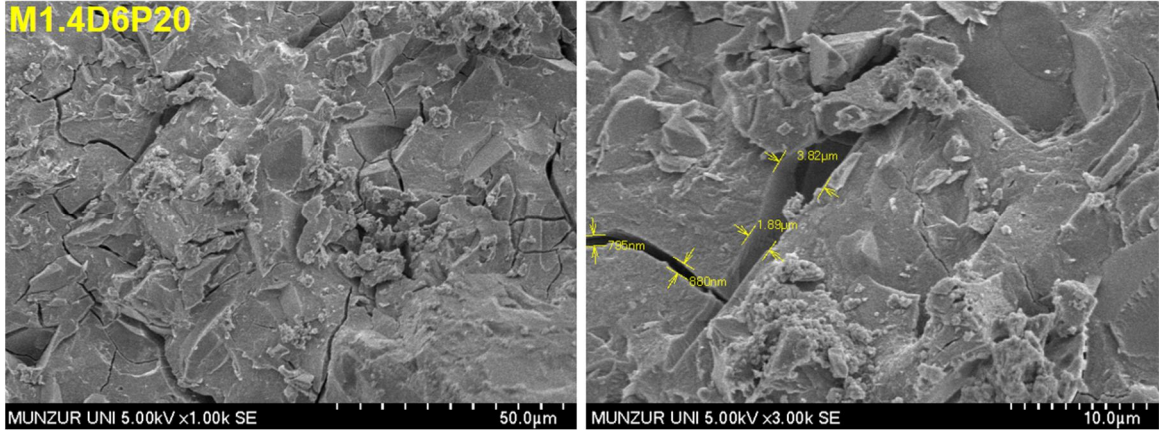
M1.4D6P20 karışımının SEM görüntüsü Şekil 6.5'de gösterilmektedir. PÇ varlığında, C-S-H jelleri erken dönemde oluşur ve bu, matris içinde bağlanmayı iyileştirir. YFC alkali aktive edildiğinde, C-A-S-H jelleri üretilir ve bu da mikro yapıyı daha da güçlendirir. Bu jellerin birleşimi, karışımın genel olarak yoğunlaşmasına ve daha fazla güç kazanmasına

yardımcı olur. M1.4D6P20' deki hidratasyon ürünleri, PÇ içermeyen karışımlara göre daha bağlantılı oldukları için, uyumlu ve sağlam bir matris oluşturur. Düşük sıcaklık (0°C) nedeniyle bazı YFC parçacıkları hâlâ kısmen reaksiyona girmiştir; ancak PÇ eklenmesi, erken hidratasyonu hızlandırarak ve cüruf aktivasyonunu kolaylaştırarak reaktiviteyi artırır. 100% YFC karışımlarına göre daha az belirgin olsalar da fotoğrafta görülen bazı tamamlanmamış aktivasyonların keskin kenarları, eksik reaksiyonu gösterir. PÇ içeren karışımlara kıyasla, matrisin daha düşük porozite ve boşluk sayısına sahip olması, daha iyi yoğunlaşmayı gösterir. PÇ hidratasyon ürünleri, boşlukları doldurarak ve daha sürekli bir matris oluşturarak, kapiler poroziteyi azaltır ve bu da sıkıştırma dayanımını artırır.

Birkaç küçük mikro çatlak olabilir, ancak daha az PÇ içeren karışımlarda olduğu kadar belirgin değildir. Bu yarıklar, 0°C' de kürleme sırasında büzülme veya termal gerilmelerden kaynaklanabilir. PÇ içeriği, büyük boşlukların oluşumunu engelleyerek ve erken yaş dayanım gelişimini teşvik ederek çatlamayı azaltır. PÇ hidratasyonu ve YFC aktivasyonu birlikte çalışarak $\text{Ca}(\text{OH})_2$ üretir, bu da cürufla birleşerek daha fazla C-S-H ve C-A-S-H jelleri oluşturur ve bu da 90 günde ikinci en yüksek sıkıştırma dayanımına katkıda bulunur [133].

Bu jeller, sağlam ve yoğun bir matris sunarak yük taşıma kapasitesini artırır. Ek bir bağlayıcı olarak %20 PÇ bileşeni, matris yoğunluğunu artırır ve erken yaş dayanım gelişimini hızlandırır. PÇ hidratasyonunun ekzotermal reaksiyonu, yerel sıcaklıkları yükselterek, sıfırın altındaki sıcaklıklarda bile YFC aktivasyonunu iyileştirir.

PÇ içeriği düşük olan veya PÇ içermeyen karışımlara kıyasla, hidratasyon ürünlerinin birleşimi ve azalmış porozite daha uyumlu ve dayanıklı bir yapı oluşturur. Ancak, daha yüksek AD veya daha uygun PÇ-YFC oranlarına sahip karışımlara kıyasla, bazı tepki vermemiş YFC parçacıkları ve mikro çatlaklar, daha iyi performansa rağmen kompresif dayanımı sınırlamaktadır.



Şekil 6.5. M1.4D6P20 karışımının SEM görüntüsü

SEM görüntüsü, %8 AD ve PÇ içermeyen %100 YFC içeren M1.4D8P0 karışımını göstermektedir. Karışımın 90 gün sonra 0°C' deki mikro yapısal performansı, Şekil.6.6'da gösterilmektedir. Daha düşük AD sahip karışımlarla karşılaştırıldığında, karışım 58,37 MPa kompresif dayanım elde etmiş ve bu önemli bir iyileşmeyi göstermektedir. SEM görüntüsünde, ana bağlayıcı faz olarak C-A-S-H jeli oluşumu tespit edilebilir. Bu jeller, matrisin içinde kalın, amorf alanlar olarak kolayca tanımlanabilen ana yapısal çerçeveyi sağlar. Artan AD (%8 AD) tarafından sağlanan daha yüksek OH⁻ iyonu konsantrasyonu, YFC'nin daha fazla çözünmesini ve yaygın jel oluşumunu mümkün kılar. PÇ bazlı sistemlere kıyasla, bu karışımda Ca (OH)₂ bulunmaması, daha az C-S-H jeli oluşumuna yol açabilir, ancak alkali aktivasyon için önemli miktarda C-A-S-H jeli ile bu eksiklik telafi edilmektedir.

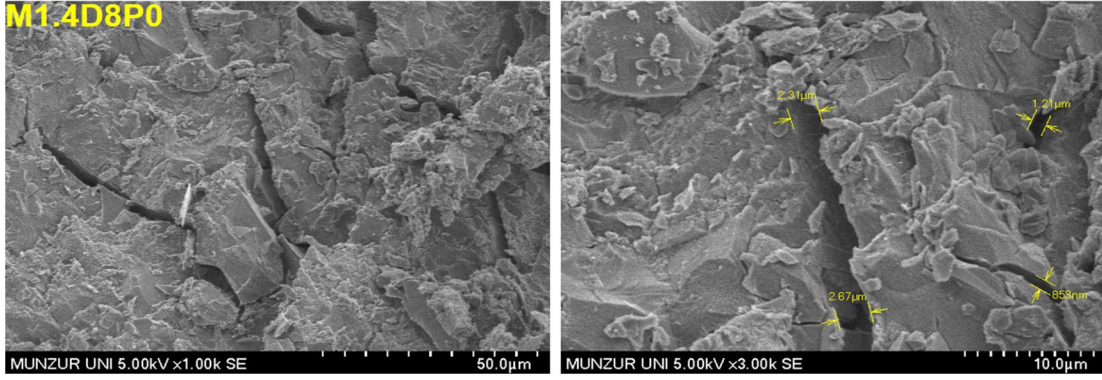
SEM görüntüsünde keskin kenarlı, açılı taneler gibi görünen kısmen veya tamamen reaksiyona girmemiş YFC parçaları gözlemlenebilir. Bu parçalar aktive edilmediği için karışıma minimal güç katkısı sağlarlar. Düşük kür sıcaklıklarında (0°C) kimyasal reaksiyon hızları daha yavaş olduğundan, daha yüksek AD daha fazla parçayı aktive etse de bazı YFC parçaları reaksiyona girmemiş kalır. Yüksek alkali seviyelerinin, jeopolimerleşme sürecini iyileştirdiği ve boşluk oluşumunu azalttığı düşünülmektedir; bu nedenle, mikroyapının daha düşük AD'ye sahip karışımlara göre daha yoğun olması beklenir. Yoğunlaşmaya rağmen, SEM görüntüsünde hala bazı küçük kapiler porlar ve mikrovitler gözlemlenmektedir. Bunlar, karıştırma sırasında tutulan hava veya tam olarak oluşmamış jellerden kaynaklanabilir. Özellikle reaksiyona girmemiş YFC parçalarının etrafında, SEM

görüntüsünde matris çatlakları görünmektedir. Kürleme sürecindeki çekme ve sıfırın altındaki sıcaklıklarda donmuş sudan kaynaklanan termal gerilmeler, bu tür çatlakların gelişimine yol açabilir.

Buna göre, PÇ'nin eksikliği, çekme nedeniyle oluşan çatlamları azaltabilecek erken yaş hidrasyon çözümlerinin yokluğunu gösterir. C-A-S-H jellerinin artan üretimi, YFC parçalarını bağlayarak ve matrisin yoğunlaşmasını sağlayarak, 90 gün sonunda 58,37 MPa'lık basınç dayanımına neden olur. Bu dayanım, yüksek AD'den etkilenmektedir. %8 AD, YFC'nin daha kolay çözünmesini sağlar, bu da çözeltinin içine daha fazla alümina ve silika bileşiği salınmasına yol açar. Dayanım, bağlayıcı jel konsantrasyonundaki artış nedeniyle oluşan porozitenin azalmasıyla artar. Aşırı yüksek alkali içeriği ile sodyum-kalsiyum silikat hidratları gibi alkali zengin fazlar oluşur ve bunlar, çok fazla iyileşme sağlamadan hacim kaplayabilir. Düşük sıcaklıklarda C-A-S-H jellerinin oluşumu, M1.4D8P0 gibi alkali aktive sistemlerin soğuk hava uygulamaları için potansiyelini gösterir. Bu jeller, zorlu kür koşullarında matrisin stabilitesini sağlayabilir. Ancak, reaksiyona girmemiş YFC parçacıkları ve mikro çatlakların varlığı, matrisin etkinliğini sınırlamakta ve ek kuvvet gelişimini engellemektedir. Partikül aktivasyonunu artırarak veya çatlamaı azaltarak performans daha da iyileştirilebilir. M1.4D8P0, %6 AD içeren karışımlara (örneğin M1.4D6P0) kıyasla önemli ölçüde daha güçlü YFC aktivasyonu nedeniyle daha yoğun bir mikro yapıya ve daha düşük poroziteye sahiptir. Ancak, PÇ yokluğunda, başlangıçtaki kuvvetin ve cüruf aktivasyonunun yardımcıları olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gibi erken yaş hidrasyon ürünleri bulunmayacaktır. Bu nedenle, PÇ kullanan hibrit sistemlere kıyasla, güç gelişimi biraz daha yavaştır. %8 AD, C-A-S-H jelinin YFC partikülleriyle bağ kuracağı noktada mümkün olan en iyi jeopolimerizasyonu teşvik eder. Bu jellerin oluşturduğu yoğun ve iç içe geçmiş matris, gücü büyük ölçüde artırır. C-A-S-H jellerinin SEM görüntüsü, PÇ'nin sunduğu ekstra erken yaş hidrasyonu olmasa bile çok iyi gelişmiş bir ağ gösterir ve bu da çok sağlam bir yapısal temel sağlar. Daha düşük AD'ye (örneğin %6 AD) kıyasla, %8 AD, YFC'den silika ve alüminyum oksit çözünmesini etkili bir şekilde maksimize ederek daha yüksek bir jel oluşturan türler konsantrasyonu sağlar ve dolayısıyla daha iyi jeopolimerizasyon ve matris yoğunlaşmasına yol açar, bu da bu karışımın PÇ içermeyen karışımlar arasında en yüksek olmasını sağlar.

PÇ içermeyen diğer karışımlara kıyasla, SEM görüntüsü azalmış porozite ile karakterize edilen bir yapı sergiler. Daha az boşluk ve mikroçatlaklar, malzeme boyunca daha iyi stres

dağılımına olanak tanır, bu da daha yüksek basınç dayanımına ulaşmak için gözenek yapısının iyileştirilmesinin önemli olduğunu gösterir. Bu nedenle, M1.4D8P0'nın azalmış porozitesi, YFC partikülleri arasındaki iyi form edilmiş bir jel ağı ile dolmuş bir yapıyı gösterir ve bu, daha düşük AD'ye sahip karışımlarla karşılaştırıldığında daha tutarlı ve kompakt bir yapı sağlar. SEM görüntüsünde hala bazı reaksiyona girmemiş YFC partikülleri gözlemlense de YFC'nin artan reaktivitesi, yüksek AD içeriğinin, cüruf partiküllerinin tam aktivasyonunu teşvik ederek güç gelişimine yardımcı olduğunu göstermektedir. %8 AD' de, reaksiyona girmemiş partiküller, daha düşük AD'ye sahip karışımlara göre önemli ölçüde daha küçük ve daha az sayıda olup, bu da etkinleştirme verimliliğinin arttığını gösterir. PÇ içermeyen karışımlarda, düşük sıcaklıklarda (0°C) YFC'nin maksimum aktivasyonunu sağlayan ideal aktivatör miktarı, en yüksek basınç dayanımını (90 gün sonunda 58,37 MPa) sağlamakla sorumludur. %8 AD tedavisi, cürufun çözünmesini dengeleyip, sodyum-kalsiyum silikat hidratları gibi istenmeyen fazların aşırı oluşumunu engellediği için zamanında bir seçim olduğunu kanıtlamıştır. Yüksek AD (%8 gibi), yeterli OH⁻ iyonu sağlayarak YFC'nin etkin bir şekilde çözünmesini sağlayarak reaksiyon kinetiğini iyileştirir. Non-PÇ karışımlar için ölçülen maksimum basınç dayanımını üretmenin yanı sıra, bu durum erken yaşta dayanım gelişimini artıran C-A-S-H jeli üretimini de artırır. Soğuk havalarda, hidratasyonun gecikebileceği durumlarda, bu sistemin performansı tamamen alkali aktivasyonlu cüruf sistemlerini taklit eder ve onları PÇ sistemleri için mükemmel bir alternatif haline getirir. Ca (OH)₂'nin doğrudan etkilerinin eksikliği, alkali katkılarının C-A-S-H jel üretiminde dayanım eşitleyici katkılarını vurgular [134]. %6 AD ve %10 AD içeren karışımların (örneğin, M1.4D6P0, M1.4D10P0) daha düşük basınç dayanımlarının başlıca sebepleri, %6 AD'de yetersiz aktivasyon ve %10 AD'de aşırı aktivasyon olabilir; bu durum, basınç dayanımına güçlü bir şekilde katkı yapmayan yapısal olmayan fazların oluşumuna yol açabilir.



Şekil 6.6. M1.4D8P0 karışımının SEM görüntüsü

Tüm test edilen karışımlar arasında, %8 AD, %80 YFC ve %20 PÇ içeren M1.4D8P20 karışımı, 0°C'de 90 gün sonunda 66,88 MPa'lık en yüksek basınç dayanımına sahip olduğundan en iyi performansı gösterir. Bu karışımın olağanüstü performansından sorumlu olan bazı önemli mikro yapısal ve bileşimsel özellikler, çok yoğun, uyumlu bir matrisin ve aslında başka hiçbir karışıma benzemeyen bir dayanımın oluşmasına yardımcı olmuştur. Hidratasyon ürünlerinin gelişimi, YFC aktivasyonu ve PÇ'nin dayanımı artırmadaki rolü ile ilgili mikroskopi önemli bilgiler sunmuştur. Bu karışımın üstün performansına bağlı olarak gelişen mikro yapı, daha ayrıntılı olarak aşağıda (Şekil 6.7) tartışılacaktır. Bu karışımın ana dayanım kaynakları olan C-S-H ve C-A-S-H jelleri, SEM görüntüsünde son derece yoğun ve sürekli bir ağ olarak görünmektedir. NaOH, aktivatör olarak YFC ile ekledikten sonra, silika ve alümina türleri çözüme girer ve PÇ bileşeni tarafından üretilen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek bu jelleri oluştururlar. SEM görüntüsü, YFC partiküllerinin sürekli bir ağ jeli ile nasıl bağlandığını göstermektedir. Bu tür jel ağları, malzemenin yüksek basınç dayanımını artırarak, bağlılık sağlayıp iç boşlukları azaltarak malzemenin dayanımına önemli bir etki yapmaktadır [26].

Doğrudan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oluşumunu sağlayarak, %20 PÇ eklemesi hızlı hidrasyonu kolaylaştırdı. Bu, daha fazla C-S-H ve C-A-S-H jellerinin gelişimi için çimento ile cüruf arasında bir hidrasyon bağlantısı kurulmasına yardımcı olur. Bu tepki, özellikle reaksiyon hızlarının yavaşladığı 0°C gibi düşük sıcaklıklarda erken yaş dayanımının kazanılmasına katkı sağlar. PÇ olmadan cüruf jeopolimerizasyonunun erken yaş dayanımı üretmesi olasılığı düşüktür. Elektron mikroskobu görüntüsünde, reaksiyona girmemiş YFC

partikülleri görülebilir, ancak bunlar daha düşük AD'ye sahip karışımlar veya PÇ içermeyen karışımlarla karşılaştırıldığında daha az sayıda ve belirgindir.

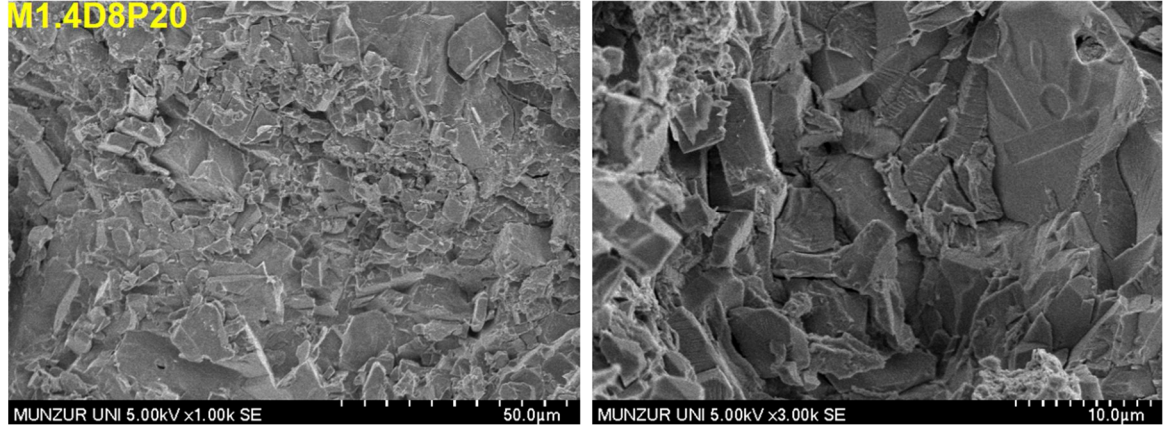
İdeal olan %8 AD, YFC içindeki silika ve alüminanın çözünmesini sağlar, bu da bu partiküllerin reaksiyona girerek güçlü bağlayıcı jeller oluşturmaya olanak tanır. Bazı YFC partikülleri reaksiyona girmezken, bunların belirgin şekilde keskin kenarları, kısmi aktivasyonu gösterir. Sodyum bazlı aktivatörler, cüruf partiküllerinin önemli bir kısmının yeterli kimyasal reaksiyonlara girmesini sağlayarak bağlayıcı jellerin oluşmasını temin eder. Reaksiyona girmemiş bazı YFC partikülleri olmasına rağmen, %20 PÇ, karışımdaki hidrasyon sürecini hızlandırarak makroskobik boşlukların oluşumunu minimize eder ve erken yaşta matrisin yoğunluğunu artırır [135].

Bu, YFC partikülleri ile jel fazları arasındaki daha güçlü bağların oluşmasını sağlamaya yardımcı olur. M1.4D8P20'nin, daha düşük PÇ kombinasyonlarına veya PÇ içermeyen karışımlara göre daha düşük poroziteye sahip olması, muhtemelen en temel özelliklerinden biridir. SEM görüntüsünde görülen yoğun ve homojen yapı, PÇ ve aktivatörün malzeme yoğunluğunu artırarak boşlukları kapattığını göstermektedir. Bu kombinasyonda, hidrasyon ürünleri (C-S-H ve C-A-S-H jelleri), YFC partikülleri arasındaki boşlukları doldurmaya devam ederek yoğun ve sürekli bir matris oluşturabilir.

Tüm kapiler porozite formlarının azalması nedeniyle, karışımın genel çatlama direnci artar ve basınç dayanımı iyileşir. PÇ içermeyen veya daha büyük bir cüruf oranına sahip tipik karışımlara kıyasla, bu kombinasyondaki PÇ, mikro boşlukları ve gözenekleri doldurmaya yardımcı olarak, nihayetinde çekirdek içindeki iç zayıflıkları azaltır ve bu malzemeyi genel yapısal bütünlük açısından çok daha dayanıklı hale getirir. Benzer şekilde, SEM görüntüsünde, tam olarak reaksiyona girmemiş YFC partiküllerine yakın veya jel oluşumunun hala tamamlandığı bölgelerde ortaya çıkan birkaç küçük mikro çatlak da görülebilir [135].

Bu çatlaklar en küçük olanlardır ve daha az PÇ içeren karışımlara kıyasla yüzeyde geniş çapta dağılmamıştır. Bu çatlaklar, hidrasyon ürünleri ile cüruf arasında daha güçlü ve daha tutarlı yüzeyler arası geçiş (ITZ) bölgelerinin olduğunu göstermektedir. Bu, genellikle kütleme çekilmesinden kaynaklanan kırılmaların oluşumunun azaltılmasına büyük ölçüde

yardımcı olur. Sonuç olarak, PÇ'nin erken hidratasyonu, bağlanma gücünü artırarak çatlama oluşumunu ve dayanıklılığı artırır. SEM görüntüleri, PÇ içermeyen karışımlara kıyasla, bu karışımın daha güçlü bir yüzeyler arası geçiş bölgesine sahip olduğunu daha da gösteriyor. Cüruf partikülleri ile hidratasyon ürünlerinin reaksiyonundan oluşan bu bağlanma, daha yoğun bir tutarlılık sağlamak için daha kapsamlıdır.



Şekil 6.7. M1.4D8P20 karışımının SEM görüntüsü

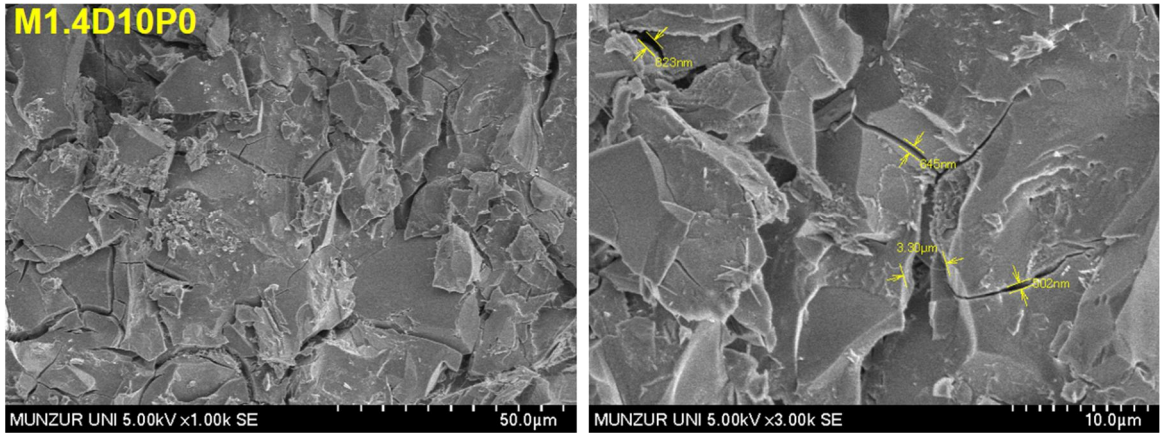
Çoğu göstergesine göre, 90 gün sonra M1.4D10P0'nin SEM görüntüsü, öncelikle C-A-S-H jellerinden oluşan oldukça gelişmiş bir matrisi göstermelidir (Şekil 6.8). Bağlantının ana bileşeni ve basınç dayanımının kaynağı, amorf jellerdir. %10 AD'nin daha yüksek dozajlarının aktive edilmesiyle birlikte, bağlayıcı fazların geniş ağları oluşmuş ve YFC'den silika ve alümina daha kolay çözünmüştür. Bu fazlar alkali açısından zengindir.

Bu dolgu, boşlukları doldursa da dayanımı artırmayabilir çünkü bu durum boşlukları doldurmakla sınırlı olabilir. Kısmen veya tamamen reaksiyona girmemiş YFC parçacıklarının keskin, açılı şekillere sahip olması beklenir. Düşük kürlenme sıcaklığı (0°C), kimyasal reaksiyon hızlarını yavaşlattığı için, bu tür reaksiyona girmemiş parçacıklar, eksik aktivasyona bağlanır, hatta yüksek AD'ye rağmen. Reaktif olmayan parçacıklar aktif olmaktan çok dolgu malzemesi gibi işlev görür, bu da reaksiyonun genel verimliliğini düşürür.

Büyük bir AD, yoğunlaşmayı artırmış olsa da bu durum boşluklar veya mikroçatlaklar bırakabilir. Bu boşluklar, kürlenme sırasında hacim kaybı, yetersiz jeopolimerleşme veya

donma altı koşullarda termal gerilmelerden kaynaklanabilir. Aşırı alkali, belirli yapısal olmayan alkali zengin fazların, örneğin sodyum-kalsiyum silikat hidratlarının oluşumuna da neden olabilir, bu da bazı mikro yapısal bozulmalara yol açabilir. M1.4D10P0, daha düşük AD'ye sahip karışımlar (örneğin %6 AD) ile karşılaştırıldığında çok düşük poroziteye sahip olsa da alkali seviyeleri hâlâ idealden fazla olabilir çünkü aşırı dozaj, yetersiz boşluk iyileştirme verimliliğine yol açar. SEM görüntülerinde, reaksiyona girmemiş YFC parçacıkları etrafındaki zayıf arayüz geçiş bölgeleri görülebilir. Bu bölgeler, parçacıkları gerilmeye karşı hassas hale getirir ve sonunda %8 AD karışımının basınç dayanımını azaltır. Yüksek aktivatör seviyeleriyle sağlanan çok hızlı bir jeopolimerleşme, düşük AD seviyelerine sahip karışımlara kıyasla erken yaş güçlerinin daha yüksek olmasına yol açar. Hidratasyon genellikle yavaş bir süreçtir, bu nedenle soğuk kürlleme koşullarında özellikle faydalıdır. 90 günlük basınç dayanımı hala dikkate değer olmakla birlikte, %8 AD karışımına (51,92 MPa) kıyasla biraz daha düşüktür.

İkincil fazlar genellikle yapısal bütünlüğe çok az katkı sağladığından, aşırı alkali miktarı gelecekteki en iyi jeopolimerleşmeyi engelleyebilir. %6 AD karışımına kıyasla, %2,89'luk güç artışı, daha yüksek bir AD'nin jel oluşumunu teşvik ettiğini ve poroziteyi azalttığını gösteriyor. Ancak, %8'e göre %11,05 daha düşük olan güç, fazla alkali kullanımının büyümeyi azalttığını da göstermektedir. M1.4D10P0'da PÇ bulunmadığından, hidratasyonun erken yaş faydaları hızlı C-S-H jel oluşumu gibi gerçekleşmeyecektir. Erken yaşta güç artışı ve boşluk oluşumunun azalması, makul miktarda PÇ eklenerek sağlanabilir.



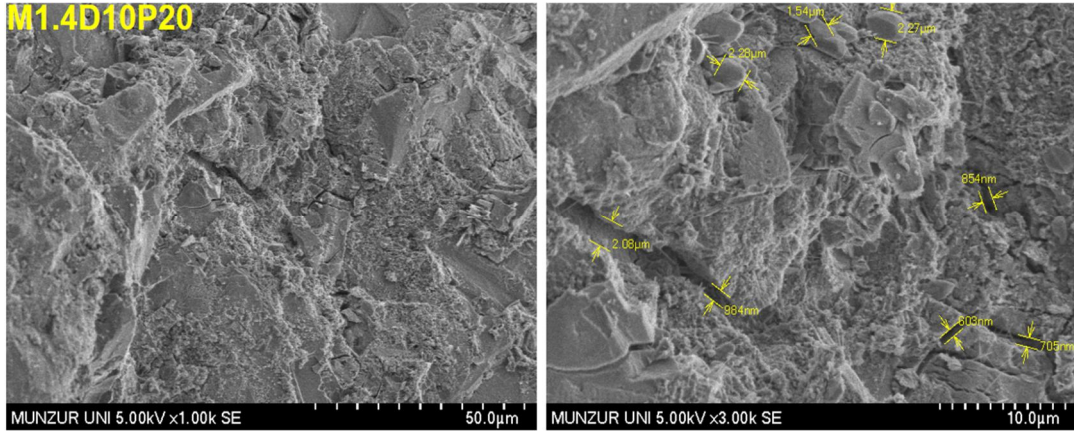
Şekil 6.8. M1.4D10P0 karışımının SEM görüntüsü

M1.4D10P20 karışımının mikro yapısal özellikleri, SEM görüntüsüyle gösterilmiştir (Şekil 6.9); bu görüntüler ayrıca, 90 günde kompresyon dayanımının neden nispeten düşük olan 47,64 MPa olduğu konusunda açıklama sağlamaktadır. Bu karışım, %20 PÇ ve %80 YFC içermektedir ve 0°C' de yüksek AD (%10 AD) kullanılarak aktive edilmiştir. %20 PÇ ve %80 YFC'nin eklenmesi ve yüksek AD (%10 AD) kullanılmasıyla, M1.4D10P20 matrislerinin morfolojisi SEM mikrografiklerinde gösterilmiştir. Dayanım, YFC'nin alkali aktivasyonu ile elde edilen maksimum bağlayıcı faz tarafından belirlenir. AD'nin doygunluk aşması, ideal jel yapısına giren etkileri artırarak jel dağılmasına ve tutarsızlıkların oluşumuna neden olur. PÇ hidratasyonu, 0°C' deki reaksiyonla kısıtlanan C-S-H jelleri üretir. Sonuç olarak, bu hidratasyon ürünlerinden daha azı oluşur. C-S-H ve C-A-S-H jelleri arasındaki zayıf bağlantılar da bu jellerin etkileşimiyle gözlemlenebilir. Düşük sıcaklıklarda oldukça yavaş kinetiklere sahip olan reaksiyona girmemiş YFC parçacıkları köşeli veya kısmen çözünmüş taneler olarak görülen düşük bir aktivasyon derecesini gösterir. Bu parçacıklar dolgu malzemesi olarak işlev görür ve matrisin dayanımına çok az etkisi vardır. Ayrıca, PÇ parçacıkları dehidrasyona uğrayabilir, bu da C-S-H jellerinin matris bütünlüğüne katkısını azaltır. Bu boşluklar, matris dayanımını ve yoğunluğunu düşürdüğünden, görüntü muhtemelen matris boyunca dağılmış mikro boşluklar ve kapiller yolları gösteriyor, özellikle reaksiyona girmemiş parçacıklar ve faz arayüzleri etrafında yoğunlaşan bölgelerde.

SEM görüntülerinde görülen çatlakların başlıca nedenleri, aşırı alkali nedeniyle oluşan matris uyumsuzluğu, çekme gerilmeleri ve donma sıcaklıklarının altındaki sıcaklıkların termal etkileridir. Yük taşıma kapasitesini azaltmak için çatlaklar, reaksiyona girmemiş parçacıklar etrafında ve zayıf faz temaslarında yayılmaya eğilimlidir. M1.4D10P20' nin 90 günde kompresyon dayanımı, incelenen karışımlar arasında en düşük olanıdır (47,64 MPa) ve bu değer, sırasıyla %6 ve %8 AD'ye sahip karışımlarla karşılaştırıldığında önemli ölçüde düşmüştür.

%10 AD eklemek, YFC'nin daha hızlı çözünmesini ve daha erken jelleşmesini sağlar. Aşırı alkali, fazla aktivasyona yol açabilir ve bu da güç arttırmadan yer kaplayan alkali zengin fazların (örneğin, sodyum-kalsiyum silikat hidratları) oluşmasına neden olabilir. 0°C'deki hidratasyon ve jeopolimerleşme süreçleri yavaşladığı için, yoğun ve sürekli jel ağları oluşamaz. Alkali aktivasyonun zamanla dayanım geliştirebilmesi için belirli bir oranda

YFC gereklidir ve %20 PÇ içeriği bu gereksinimi azaltır. Ayrıca, PÇ hidratasyonu ile üretilen $\text{Ca}(\text{OH})_2$, YFC aktivasyonunu artırabilir ancak düşük sıcaklıklarda daha az etkilidir. PÇ ve yüksek AD birleştirildiğinde, heterojenlik oluşabilir ve bu, farklı mekanik özelliklere sahip izole bölgeler oluşturarak matrisin zayıflamasına yol açabilir. M1.4D10P20'nin dayanımı %20,53 oranında azalmaktadır, bu da %6'lık düşük AD'nin faz oluşumu ve aktivasyon arasındaki en iyi dengeyi sağladığını göstermektedir. Daha düşük dozaj, daha az çatlak ve alkali zengin fazların oluşmasına neden olur. %28,76'lık dayanım azalması, %8 AD'nin uzun vadeli jeopolimerleşmeyi koruma avantajını vurgulamaktadır. Bu dozaj, matrisin daha iyi bir uniformluğa sahip olmasını ve jel oluşumunun yavaşça gerçekleşmesini sağlar, aynı zamanda M1.4D10P20'de görülen aşırı aktivasyonun verimsizliklerinden kaçınılır.



Şekil 6.9. M1.4D10P20 karışımının SEM görüntüsü

6.4. Sülfat Etkisi Sonrası Deney Sonuçları

6.4.1. Sülfat Etkisi Sonrası Basınç Dayanım Davranışı

YFC yerine PÇ kullanılarak %0, %10 ve %20 oranlarında yapılan değişikliklerin yanı sıra %6, %8 ve %10 AD'leri, 0°C' de 90 gün süreyle kürlenene ve ardından ek olarak 90 gün boyunca MgSO_4 'ye maruz bırakılan hibrit AACÇM basınç dayanımına olan etkisi, Şekil 6.10a'da gösterilmektedir. Sülfat saldırısı sonrasındaki dayanım değişimi ile 90 günlük basınç dayanımı arasındaki ilişki, Şekil 6.10b'de gösterilmiştir. %100 YFC içeren karışım (%0 PÇ), %6 AD ile %38,7'lik en yüksek basınç dayanımı artışını göstermiştir. Bu artış,

%10 PÇ ilavesiyle %22,4'e düşerken, YFC'nin yerine %20 PÇ eklenmesi, $MgSO_4$ saldırısına maruz kaldığında basınç dayanımında %3,6'lık bir azalmaya neden olmuştur [136]. Tamamen YFC karışımının (%0 PÇ) aksine, dayanım artışı, alkali aktivasyon sonrası son derece stabil C-A-S-H jellerinin gelişimiyle sağlanmıştır, bu da basınç dayanımında %38,7'lik bir iyileşmeye yol açmıştır [137]. Bu jeller, daha su geçirmez hale gelme ve sülfat saldırılarına karşı direnç kazanma eğilimindedir, bu da önemli mikro yapısal hasarı sınırlayarak $MgSO_4$ ' e girişi azaltır. PÇ hidratasyonu sırasında $Ca(OH)_2$ üretimi, %10 PÇ yerine koyma ile sülfat saldırısına karşı yeni bir hassasiyet alanı açar. $Ca(OH)_2$, sülfat iyonları ile reaksiyona girerek alçıtaşları ve etrenjitler oluşturur, bu da küçük mikro yapısal sorunlara yol açar ve dayanım iyileşmesini %22,4'e düşürür [138]. Yine de C-A-S-H jellerinin kısmi varlığı, bazı sülfat direncini sağlar. %20 PÇ yerine koyma, önemli ölçüde daha yüksek kalsiyum hidroksit ve sülfat hassasiyetine neden olur. $MgSO_4$ ile, alçıtaşı ve magnezyum silikat hidratı (M-S-H) gibi genişleyen ve bozucu fazları oluşturmak için daha fazla çözünür ve bu da matrisin dengesizleşmesine yol açar.

Ayrıca, YFC seviyesinin düşürülmesi, sülfat direncine sahip C-A-S-H jellerinin oluşumunu engelleyecek ve bu da malzemeyi daha da zayıflatarak basınç dayanımında %3,6'lık bir azalmaya yol açacaktır. PÇ içeriği arttıkça, matris daha gözenekli ve geçirgen hale gelir, bu da sülfat iyonlarının girişini kolaylaştırır ve bozulmayı hızlandırır. Ayrıca, YFC'nin sağladığı yoğun ve birleşik jel ağının kaybı, hasarı daha da kötüleştirecektir.

%8 AD'de, %100 YFC (0% PÇ) içeren karışım, %4,2'lik bir basınç dayanımı artışı gösterdi ve bu, %10 PÇ yerine koyma ile %21,1' e yükseldi, ancak YFC' nin yerine %20 PÇ eklenmesi, $MgSO_4$ saldırısına maruz kaldığında %8,6'lık bir basınç dayanımı azalmaya yol açtı. %100 YFC karışımının alkali aktivasyonu, C-A-S-H jelleri üretir. Bu jeller, sülfat saldırısı altında daha yoğun ve stabil olup, basınç dayanımının artmasına katkıda bulunmuştur [139]. Bu arada, M-S-H, Mg^{2+} iyonlarının C-A-S-H jellerinin alüminosilikat ağı ile etkileşimi sonucu oluşur. Düşük konsantrasyonlarda, bu faz gözenekli yapıyı iyileştirir ve dayanımı yaklaşık %4,2 oranında artırır. %8 AD'de aktivatör, cüruf parçacıklarını tamamen çözmek ve aşırı gözeneklilik ya da aşırı reaksiyona girme olmadan stabil bağlayıcı fazlar oluşturmak için yeterli alkali sağlayacaktır.

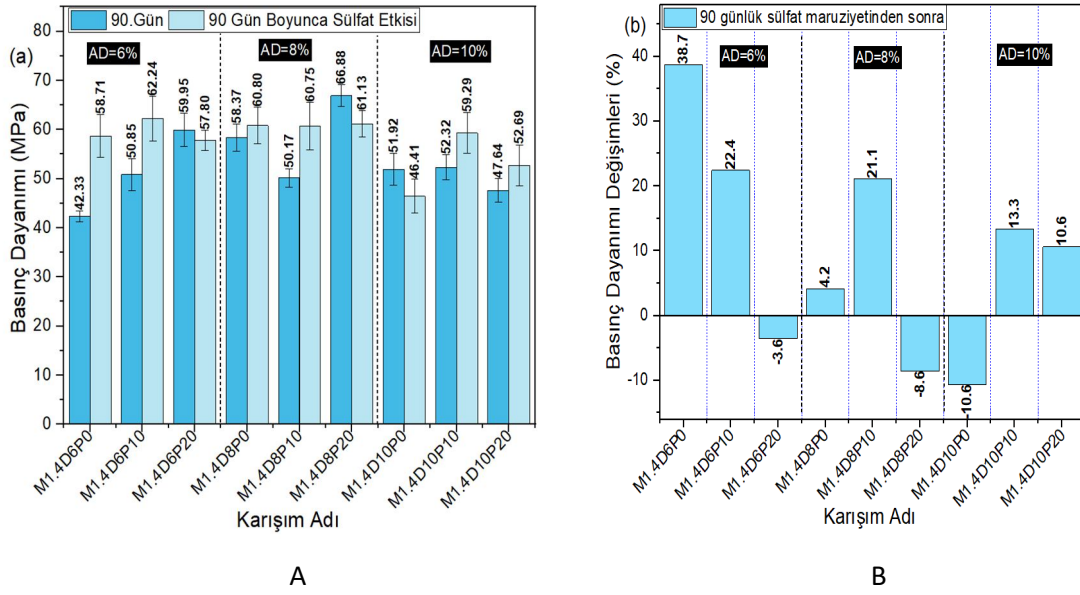
Parçacıkları tamamen çözer ve aşırı reaksiyon veya fazla gözeneklilik olmadan stabil bağlayıcı fazlar üretir. YFC' nin kısmi olarak PÇ ile yer değiştirilmesi, C-S-H ve Ca (OH)₂'den türetilen yeni C-S-H jellerinin oluşmasına neden olur, bu jeller YFC aktivasyonu sonucu oluşan C-A-S-H jellerine tamamlayıcıdır. Böyle bir karışım kompozit matrisi, daha yoğun ve sıkı bağlı bir bileşim oluşturur. PÇ hidratasyonu sırasında üretilen Ca (OH)₂'nin, YFC'den gelen alümina zengin fazlarla reaksiyona girerek oluşan ek C-A-S-H jelleri, MgSO₄' ye karşı direncin artırılmasına ekstra katkı sağlar ve bu da %21,1'lik önemli bir dayanım artışına yardımcı olmuştur. Ancak, zayıf da olsa, Ca (OH)₂ sülfat saldırılarına duyarlıdır; %10 PÇ yerine koyma seviyelerinde oldukça düşüktür. Bu nedenle, alçıtaşı ve etrenjit gibi genişleyen fazlar daha az oluşacaktır. Mikro yapı, yine de büyük ölçüde stabil bağlayıcı fazlar tarafından yönetilmektedir. Daha yüksek bir PÇ konsantrasyonu, YFC miktarını azaltma eğilimindedir, bu da sülfat varlığında daha az sülfat dirençli C-A-S-H jellerinin oluşmasına ve daha az stabil bir matrisin ortaya çıkmasına neden olur. Yaklaşık %8,6'lık gözlemlenen dayanım düşüşü, yoğun hidratasyon ürünlerinin eksikliğine ve %20 PÇ karışımındaki beklenen gözenekli yapıda sülfat saldırısının genişleyen gerilmeleri nedeniyle oluşan mikro çatlakların gelişimine bağlanabilir. Ancak, %8 AD, etkili YFC parçalanmasını teşvik etmek için yeterlidir, bu da güçlü jeopolimerleşmeyi ve C-A-S-H jellerinin oluşumunu sağlar. Ancak, ek yerine koymalar bu dengeyi bozduğunda, sistemin performansı giderek PÇ içeriğine daha fazla bağlı hale gelir. %8 AD'de serbest alkali, daha yüksek PÇ konsantrasyonlarında alkali zengin fazların üretimine yol açabilir, bu fazlar matris hacmini doldurur ancak dayanım açısından önemli bir katkı sağlamaz.

%100 YFC içeren karışım (0% PÇ), %10 AD'de MgSO₄ saldırısına maruz kaldığında %10,6'lık bir basınç dayanımı azalması gösterdi. %10 YFC'nin PÇ ile yerine konması durumunda basınç dayanımı %13,3 arttı; ancak, PÇ yerine koyma oranı %20'ye çıkarıldığında dayanım artışı %10,6'ya düştü. Tam bir YFC sisteminde alkaliyle aktive olma, esasen sülfatlara karşı dirençli olan C-A-S-H hidrojjellerinin oluşumuna yol açar. Ancak, MgSO₄'ye maruz kaldığında, Mg²⁺ iyonları C-A-S-H jellerini delerek daha az birleşik M-S-H kullanır ve bu da yapılarını dengesiz hale getirir. C-A-S-H' nin M-S-H'ye dönüşmesi, %10,6'lık bir basınç dayanımı düşüşüne neden olduğundan, matris bütünlüğünü önemli ölçüde zayıflatır ve mikro yapısal zayıflığa yol açar [139, 140]. Bu sistem, ek Ca fazlarının eksikliği nedeniyle sülfat saldırısına karşı zayıf bir direnç gösterir. Ayrıca, %10 PÇ eklenmesi, PÇ hidratasyonu sırasında C-S-H jelleri gibi ek hidratasyon

ürünlerinin oluşumunu teşvik eder, bu da YFC aktivasyonu ile oluşturulan C-A-S-H jellerini tamamlar ve daha yoğun ve birleşik bir matris oluşmasına yol açar. PÇ hidratasyonu sırasında üretilen $\text{Ca}(\text{OH})_2$, YFC'deki alümina zengin fazlarla reaksiyona girerek daha fazla C-A-S-H jeli üretir. Bu ek reaksiyon, matrisin stabilitesini artırır ve gözenekliliği azaltarak sülfat direncini iyileştirir. %10 PÇ yerine koyma oranında, üretilen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarı nispeten küçüktür, bu da sülfat saldırısı altında alçıtaşı ve etrenjit gibi genişleyen ürünlerin gelişimini en aza indirir. Bu nedenle, basınç dayanımında %13,3'lük bir net artış meydana gelir.

%20 PÇ yerine koyma oranında, PÇ hidratasyonu sırasında daha yüksek miktarda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ üretilir. Bu faz, sülfat iyonlarına karşı son derece reaktiftir ve genişleyen alçıtaşı ve etrenjit oluşturur. Bu nedenle, matrisin bütünlüğünü zayıflatan mikro çatlaklara yol açar ve bu da basınç dayanımını azaltır. PÇ' nin baskın kısmı, YFC miktarını artırarak sülfat dirençli C-A-S-H jellerinin gelişimini azaltır. Hidratasyon ürünlerindeki değişiklikler, sistemi MgSO_4 ' ten gelen kimyasal saldırılara daha duyarlı hale getirir. Artan PÇ yüzdesi, hidratasyon ürünlerinin tamamlanmamış yerleşimi nedeniyle daha fazla boşluk yaratır ve genişleyen gerilmeler nedeniyle mikro çatlaklar oluşur, bu da sonunda matrisin daha da zayıflamasına ve ek hidratasyon ürünlerinden elde edilen iyileşmelerin dengeye gelmesine neden olur.

%10 AD kullanımı, YFC ve PÇ'nin çözünmesi için yüksek alkali seviyelerini artırır ve hidratasyon ürünlerinin oluşumunu hızlandırır. Bu, dayanım gelişimini hızlandırırsa da alkali zengin fazların, örneğin sodyum-kalsiyum silikat hidratlarının oluşma olasılığını artırır; bu fazlar uzun vadeli dayanım ve dayanıklılık açısından pek katkı sağlamaz. Yüksek AD, alkali miktarlarının aşırı şekilde artmasına yol açabilir, bu da hidratasyon ürünlerinin dengesini bozarak sülfat kaynaklı bozulmalara karşı duyarlılıklarını artırır, özellikle yüksek PÇ yerine koyma oranlarında.



Şekil 6.10. a-) Sülfat Etkisi Sonrası Basınç Dayanımı b-) SES Sonrası Basınç Dayanım Değişimi

6.4.2. Sülfat Etkisi Sonrası Ultrasonik Hız Ölçümü (UPV)

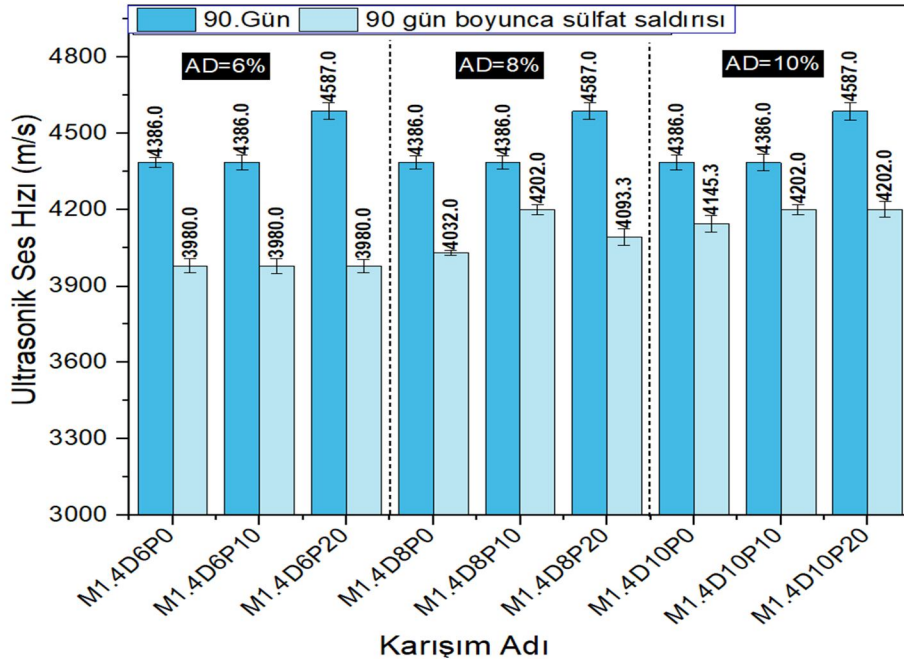
Şekil 6.11, 0°C'de 90 gün boyunca kürlen ve ardından 90 gün sülfat maruziyetine tabi tutulan örneklerin UPV sonuçlarını sunmaktadır. Sülfat maruziyeti sonrasında tüm karışımlarda UPV değerlerinde bir azalma gözlemlenmiş olup, bu durum sülfat saldırısı nedeniyle iç matrisin bozulduğunu göstermektedir. Bu azalma, genişleyen sülfat bileşenlerinin (örneğin etrenjit veya alçıtaşı) oluşumu nedeniyle mikro yapının bozulduğunu ve bu durumun matrisin sürekliliğini bozarak malzemenin yoğunluğunu ve bütünlüğünü azalttığını yansıtmaktadır.

%6 AD seviyesinde, UPV, sırasıyla 0%, %10 ve %20 PÇ ile YFC'nin yer değiştirdiği karışımlar için %9,3, %9,3 ve %13,2 oranında azaldı. Tüm bu değerler, sülfatlar nedeniyle mikro yapısal bozulmanın artan seviyelerinin, PÇ içeriğinin artmasıyla meydana geldiğini göstermektedir. %20 PÇ karışımından kaynaklanan daha büyük UPV düşüşü, PÇ'nin hidratasyonu ile üretilen daha yüksek $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarlarının, sülfat iyonlarıyla reaksiyona girerek genişleyen ve yıkıcı fazlar (örneğin alçıtaşı ve etrenjit) oluşturmaya bağlı olabilir ve bu da matris bütünlüğünün bozulmasına ve boşlukların artmasına yol açarak UPV düşüşünü, daha düşük PÇ içeriğine sahip karışımlara göre daha şiddetli hale getirmektedir. Buna karşın, 0% ve 10% PÇ karışımları, alkali aktivasyonu yapılmış YFC'de oluşan baskın

sülfat dirençli C-A-S-H jelleri nedeniyle daha az etkilenmiş olup, bu da onların sülfat saldırılarından daha az etkilendiğini göstermektedir.

%8 AD seviyesinde, %0 PÇ içeren karışımda %8,07'lik daha yüksek bir UPV azalışı kaydedilirken; %10 PÇ içeren karışımda %4,19'luk bir azalma, %20 PÇ ile yer değiştiren YFC karışımında ise %10,76'luk bir azalma kaydedilmiştir. %10 PÇ karışımındaki UPV azalışı en düşük olduğundan, bu durum sülfat direncinin, C-S-H ve kalsiyum- C-A-S-H jellerinin dengeli bir şekilde oluşmasının bir fonksiyonu olarak arttığını, bu durumun matrisin yoğunluğunu artırarak sülfat tahribatına karşı daha az hassasiyet gösterdiğini ima etmektedir. Aksine, %20 PÇ içeren karışımda en yüksek UPV kaybı kaydedilmiştir; bu, karışımdaki PÇ hidratasyonu ile üretilen yüksek $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarının sülfat iyonlarıyla reaksiyona girerek alçıtaşı ve etrenjit gibi genişleyen fazlar oluşturması, bu fazların matrisin bozulmasına ve gözenekliliğin artmasına yol açması ile açıklanabilir. %0 PÇ içeren karışımda ise, sadece YFC aktivasyonu ile oluşan ve PÇ hidratasyon ürünleri ile artırılmayan C-A-S-H jelindeki kovalan bağlar nedeniyle mütevazı bir UPV azalması meydana gelmiştir, bu da sülfat direncinin sınırlı olduğunu göstermektedir.

%10 AD seviyesinde, %0, %10 ve %20 PÇ ile yer değiştirilmiş YFC karışımlarında sırasıyla %5,49, %4,19 ve %8,39 oranında UPV azalışı gözlemlenmiştir. %10 AD'de, %0 PÇ, %10 PÇ ve %20 PÇ ile yer değiştirilmiş YFC karışımlarının UPV kayıpları sırasıyla %5,49, %4,19 ve %8,39'dur. %10 PÇ karışımındaki minimum UPV azalması, C-S-H ve C-A-S-H jellerinin oluşumu arasında optimum bir dengenin sağlandığını ve bu jellerin matrisin yoğunluğunu arttırarak sülfat direncini artırdığını gösterir. Aksine, %20 PÇ karışımındaki daha yüksek UPV azalması, daha yüksek $\text{Ca}(\text{OH})_2$ üretiminden kaynaklanmaktadır; bu, sülfat iyonlarıyla reaksiyona girerek alçıtaşı ve etrenjit gibi genişleyen fazlar oluşturur ve nihayetinde mikro yapısal düzeyde hasara ve daha fazla gözenekliliğe yol açar. %0 PÇ karışımındaki orta düzeydeki UPV azalması, YFC aktivasyonu sırasında oluşan sülfat direncine sahip C-A-S-H jellerinin kararlılığıyla ilişkilidir. Ancak, PÇ'den başka hidratasyon ürünlerinin yokluğu, %10 PÇ karışımına kıyasla daha düşük bir yoğunlaşma ile sonuçlanır ve bu da matrisin sülfat tahribatına karşı daha az dirençli olmasına yol açar.



Şekil 6.11. Sülfat Etkisi Sonrası Ultrases Hız Grafiği

6.4.3. Sülfat Etkisi Sonrası Kütle Artışı

Sülfat saldırısına maruz kalan örneklerin 90 gün boyunca kütle artışıyla ilgili yapılan çalışmaların bulguları Şekil 6.12'de şematik olarak sunulmuştur. Tüm karışımlar kütle artışına yol açtı; ancak, en yüksek birikmiş kütle artışı, 6%, %8 ve %10 AD ile aktive edilen, %20 PÇ içeren karışımlara bağlıydı.

%20 PÇ içeren karışımlarda gözlemlenen nispeten daha büyük kütle artışı, PÇ'nin hidrasyon sırasında oluşturduğu daha yüksek $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarından kaynaklanmaktadır. Bu faz, sülfat iyonlarıyla reaksiyona girer ve jips ve etrenjit gibi genişleyen ürünler oluşturur, bu da örneklerin kütlesinin önemli ölçüde artmasına neden olur. Ayrıca, yüksek PÇ içeriğiyle daha fazla porozite beklenir, bu da sülfat iyonlarının daha derinlere nüfuz etmesine olanak tanır ve bunun sonucunda daha fazla sülfatla ilişkili bileşiklerin oluşmasına yol açar [137]. Buna karşılık, daha düşük dozajdaki PÇ karışımları, çoğunlukla sülfatlarla reaksiyona girme eğiliminde olmayan ve sülfatlara maruz kaldığında en dayanıklı olan C-A-S-H jellerini içerdiğinden daha küçük bir kütle artışı gösterdi [141].

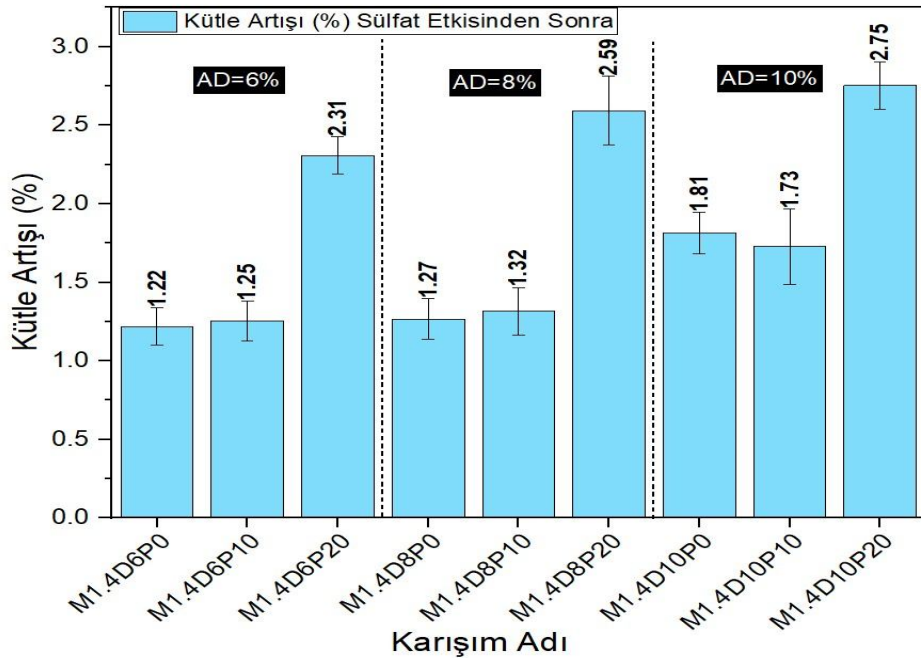
Ayrıca, artan AD tüm karışımların kütle artışında karşılık gelen bir iyileşmeye yol açtı. Bu durum, yüksek AD seviyelerinde artan alkali seviyesinin, öncüllerin çözünmesini

hızlandırarak, C-S-H ve C-A-S-H jelleri gibi hidrasyon ürünlerinin oluşumunu desteklemesinden kaynaklandı. Ancak, yüksek AD seviyesi aynı zamanda PÇ içeren karışımlarda sülfat iyonlarının etkileşimini artırarak, hidrasyon sırasında PÇ tarafından $\text{Ca}(\text{OH})_2$ üretimini teşvik etti. Bu şekilde üretilen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarı yüksek AD seviyelerinde artar ve kısa süre içinde jips ve etrenjit gibi tipik genişleyen sülfat reaksiyon ürünleri oluşur, bu da daha büyük kütle artışlarına katkıda bulunur. Ancak bu eğilim, daha fazla $\text{Ca}(\text{OH})_2$ içeren yüksek PÇ'li karışımlarda daha belirgindir. Diğer taraftan, daha düşük PÇ içeriğine sahip karışımlar, mikro yapılarının sülfatlara dayanıklı C-A-S-H jellerine dayandığı için yüksek AD koşullarında kütle kazançlarında çok daha az artış gösterir. Bu jeller, genişleyen reaksiyon ürünlerinin oluşumunu sınırlarken sülfat saldırısına karşı daha iyi direnç sağlar.

%6 AD'de, sırasıyla %0, %10 ve %20 PÇ ile değiştirilen YFC karışımlarında sülfat maruziyeti sonucu kütle artışında sırasıyla %1,22, %1,25 ve %2,31 artış gözlemlendi. %20 PÇ konsantrasyonuna sahip karışım, yüksek $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oranından kaynaklanan sülfatla ilgili genişleyen fazların (özellikle jips ve etrenjit) çok daha geniş bir şekilde oluşması nedeniyle en yüksek kütle artışını sergilemiştir. Bu fazlar, PÇ hidrasyonunun sonucu olarak önemli bir kütle artışı sağlar. Diğer taraftan, kütle artışı, büyük ölçüde sülfata dayanıklı C-A-S-H jellerinden oluşan mikro yapılara sahip olan %0 ve %10 PÇ karışımları için önemli ölçüde azalır. %10 PÇ karışımında, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarının ılımlı olması nedeniyle, sülfatla reaksiyona giren ürünlerin oranı daha düşük olduğu için kütle artışı 0% karışıma kıyasla biraz daha küçük ancak gözle görülür bir artış gösterir.

%8 AD ile, sülfat maruziyeti sonucu kütle artışı sırasıyla %0, %10 ve %20 PÇ ile değiştirilen YFC karışımlarında %1,22, %1,32 ve %2,59 olarak gözlemlenmiştir. %20 PÇ karışımı, kütle artışında en yüksek değeri göstermiştir; bu, özellikle PÇ hidrasyonu sonucu daha fazla $\text{Ca}(\text{OH})_2$ üretilmesi ve bunun sülfat iyonlarıyla reaksiyona girerek jips ve etrenjit gibi genişleyen sülfat reaksiyon ürünlerinin daha fazla oluşmasına yol açmasıyla ilişkilidir. Bu durum, kütle artışında önemli bir artışa neden olmuştur. %10 PÇ karışımında ise daha ılımlı bir artış gözlemlenmiştir; kütle artışı, daha az C-A-S-H jellerinin çökmesiyle, C-S-H oluşumunun ılımlı bir katkısını göstermektedir. Diğer taraftan, çok az miktarda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sülfat reaksiyonuna katılabilir ve bu, %20 PÇ karışımına kıyasla önemsizdir. Buna karşılık, 0% PÇ karışımı, matrisi büyük ölçüde YFC aktivasyonu sonucu

oluşan sülfata dayanıklı C-A-S-H oluştuğu için en düşük kütle artışını kaydetmiştir. Ca (OH)₂ yokluğu, genişleyen sülfat reaksiyon ürünlerinin oluşumunu engeller ve böylece sülfat maruziyeti altında daha iyi stabilite sağlar. %10 AD ile sülfat maruziyeti nedeniyle kütle artışı, sırasıyla %0, %10 ve %20 PÇ ile değiştirilmiş YFC karışımları için %1,81, %1,73 ve %2,75 arttı. %20 PÇ karışımında gözlemlenen en yüksek kütle artışı, sülfat reaksiyon ürünlerinin, örneğin jips ve etrenjit gibi genişleyen bileşiklerin önemli ölçüde oluşmasına bağlanmaktadır. PÇ hidratasyonu sırasında üretilen yüksek miktarda Ca (OH)₂, sülfat iyonları ile reaksiyona girerek kütle artışına neden olur. Ayrıca, daha yüksek PÇ içeriği, sülfat iyonlarının daha derin penetrasyonuna izin veren daha fazla poroziteye yol açarak bu etkileri artırır. %10 PÇ karışımı, %20 PÇ karışımına kıyasla biraz daha düşük bir kütle artışı gösterdi. Bu, C-S-H ve C-A-S-H jellerinin dengeli bir şekilde oluşmasından kaynaklanmaktadır; bu jeller, sülfat saldırısına karşı daha iyi direnç sağlar ve genişleyen fazların üretimini sınırlar. %0 PÇ karışımı, çoğunlukla YFC aktivasyonu ile oluşan sülfata dayanıklı C-A-S-H jellerinden oluştuğundan, en küçük kütle artışını gösterdi. Bu karışımda Ca (OH)₂ bulunmaması, sülfatla ilişkili reaksiyon ürünlerinin oluşumunu azaltarak, sülfat maruziyeti altında daha büyük bir stabilite sağlar.



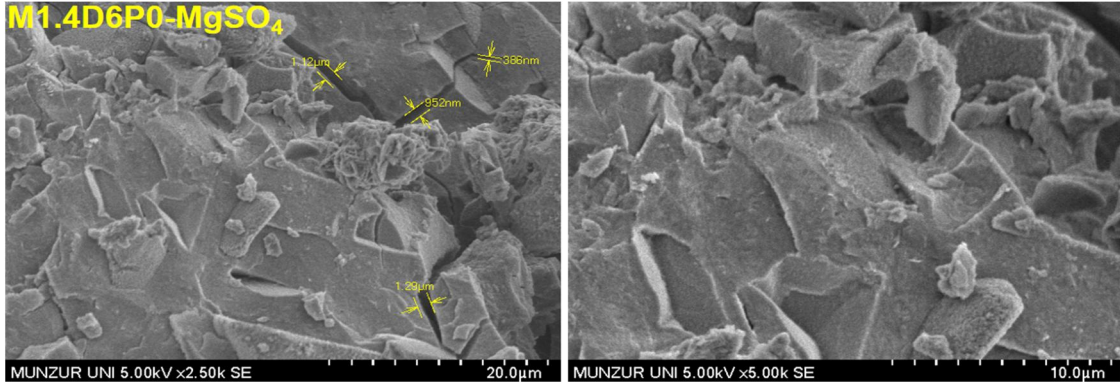
Şekil 6.12. Sülfat Etkisi Sonrası Kütle Artışı Grafiği

6.4.4. Sülfat Etkisi Sonrası SEM gözlemleri

Şekil 6.13, 90 gün süresince $MgSO_4$ 'ye maruz kalan M1.4D6P0 karışımının SEM görüntüsünü göstermektedir. $MgSO_4$ koşullarında 90 gün geçtikten sonra, M1.4D6P0 (%100 YFC ve %6 AD aktivasyonu içerir) SEM görüntüsünde şu özellikler gözlemlenmektedir: C-A-S-H jellerinin oluşumu ile açıklanan önemli bir yoğunlaşma. Bu jeller, sülfata karşı dirençleri ile ünlüdür, bu da kompresif dayanımda %38,7'lik bir artışı açıklamaktadır. Mikro çatlama ya da jips veya etrenjit gibi genişleyen sülfat kaynaklı fazların çok az belirtisi gözlemlenmiştir, bu da C-A-S-H jellerinin sağladığı yüksek sülfat direncini göstermektedir. C-A-S-H jellerinin stabil şekilde üretimi, alkali zengin, yapısal olmayan fazların aşırı oluşumunu engelleyerek ve PÇ' siz bütünlüğü koruyarak sülfat direncini artırmıştır. %6 AD, YFC'yi aktive etmek için yeterli alkali sağlamış ve bu durum düşük sıcaklıklarda ve $MgSO_4$ de geçirilen süreye rağmen mikro yapının bütünlüğünü korumasını sağlamıştır.

PÇ bulunmadığı için, sülfat saldırılarından sorumlu olan $Ca(OH)_2$ ortadan kaldırılmıştır. Bu durum, genellikle PÇ içeren karışımlarda yaygın olarak bulunan jips ve etrenjit gibi yıkıcı genişleyen fazların oluşumunu engellemiştir. Sistem tamamen AAC kullanılarak jel oluşumuna dayandı ve C-A-S-H jelleri, sülfat iyonlarına karşı daha iyi kimyasal stabilite gösterdi. SEM görüntüsü, kompresif dayanımın arttığını destekleyerek, matrislerin oldukça yoğun ve iyi bağlanmış olduğunu, reaksiyona girmemiş cüruf parçacıklarının ise sınırlı olduğunu ortaya koymuştur. Bu muhtemelen, güç artışına katkıda bulunan ince, birbirine bağlı jel ağı aracılığıyla olmuştur. $MgSO_4$ ortamındaki performans, %6 AD gibi düşük bir AD ile %100 YFC'nin sülfat zengini ortamlarda kullanılabileceğini göstermektedir. PÇ' nin olmaması, sülfat kaynaklı genişlemelere karşı duyarlılığı en aza indirirken, stabil C-A-S-H jelleri uzun vadeli dayanıklılığı ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesini sağlamıştır. SEM görüntüsü, M1.4D6P0'nin sülfatlara karşı dayanıklı uygulamalar için umut verici bir aday olduğunu desteklemektedir, özellikle soğuk ortamlarda veya agresif kimyasal koşullarda. $MgSO_4$ maruziyeti, 90 günlük kürlenme sonrasında $0^\circ C$ ' deki koşula kıyasla mikro yapıda olumlu bir değişiklik, daha büyük yoğunlaşma ve çatlak azaltımı sağlamıştır (Şekil 6.13.). PÇ'nin yokluğu ve C-A-S-H jellerinin baskınlığı, karışımı sülfat geçişine karşı çok dirençli hale getirmiş ve jips veya etrenjit gibi genişleyen fazların oluşumunu en aza indirmiştir. Bu reaktivite, düşük kürlenme sıcaklığı ($0^\circ C$) ile sınırlı olsa da sülfat

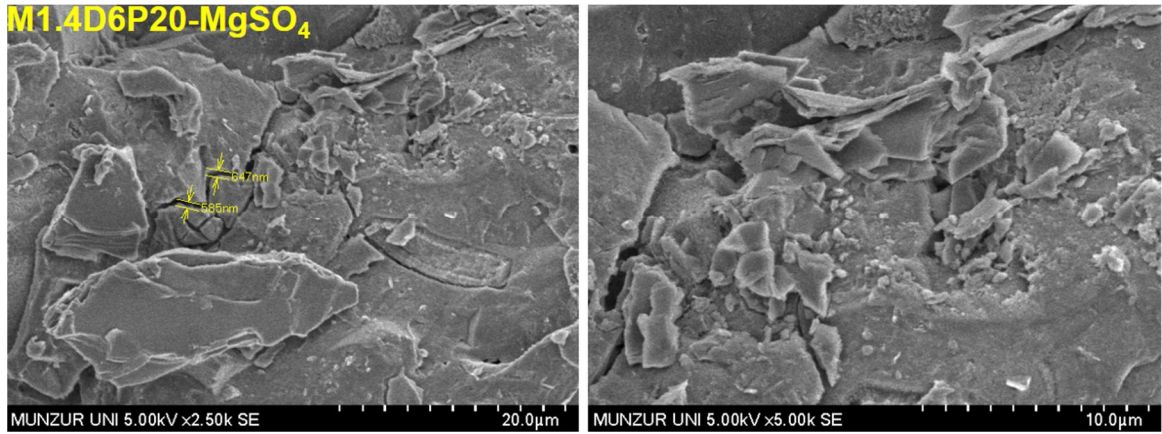
saldırısından fayda sağlanmış ve matrisin yoğunlaşması ile karışımın mekanik özellikleri ve dayanıklılığı artmıştır[142]. SEM karşılaştırması, M1.4D6P0'nin sülfat maruziyetine karşı dayanıklı olduğunu göstermektedir. Bu, sülfat saldırısı nedeniyle daha yoğun, daha uyumlu ve mekanik olarak üstün bir matrise dönüştü, çünkü PÇ' nin yokluğu ve sülfatlara dayanıklı C-A-S-H jellerinin karışım üzerindeki dengeleyici etkileri ile iyileştirilmiştir.



Şekil 6.13. Sülfat maruziyetinden sonra M1.4D6P0 karışımının SEM görüntüsü

Şekil 6.14, 90 gün boyunca $MgSO_4$ maruziyeti sonrası M1.4D6P20 karışımının SEM görüntüsünü göstermektedir. Genellikle SEM'de, C-S-H ve C-A-S-H tarafından çoğunlukla oluşturulan bağlayıcı jellerin açıkça görüldüğü, orta derecede yoğunlaşmış matrisler gözlemlenmektedir. Ayrıca, %20 PÇ eklenmesi, hidrasyon sırasında $Ca(OH)_2$ sağlar; bu, daha sonra YFC' deki alümina zengini fazlarla reaksiyona girerek daha fazla C-A-S-H jeli oluşturur ve yoğunlaşmaya katkıda bulunur. Bazı mikro çatlaklar görünse de ve reaktifte girmemiş YFC parçacıkları etrafında birçok boşluk kolayca görülebilse de bu durum, düşük kürleme sıcaklığı ($0^\circ C$) ve AD (%6 AD) nedeniyle YFC'nin tamamlanmamış aktivasyonunu işaret eder. Bu nedenle, daha yüksek YFC içeren karışımlarla kıyaslandığında, sülfat saldırısına karşı bazı hassasiyetler vardır. Stabil C-A-S-H jelleri, Mg^{2+} iyonlarının geçişini ve jips veya etrenjit gibi genişleyen fazların oluşumunu engelleme kapasitesine sahip gibi görünmektedir. Matrisin nispeten yoğun yapısı ve jellerin kohezyonu, sülfat maruziyeti sonrası %22,4' lük bir dayanım gelişimini açıklar; bu, %100 YFC karışımının (M1.4D6P0) elde ettiği dayanım artışına göre ikinci en iyi sonuçtur. Bu yüzdelik, erken hidrasyonun iyileştirilmesi ve böylece C-S-H ile C-A-S-H jelleri için ek Ca iyonları sağlanması olarak verilmiştir. PÇ hidrasyonunun artan oranı, matrisin kohezyonunu iyileştirerek, $MgSO_4$ kaynaklı mikro yapısal hasarın etkilerinden

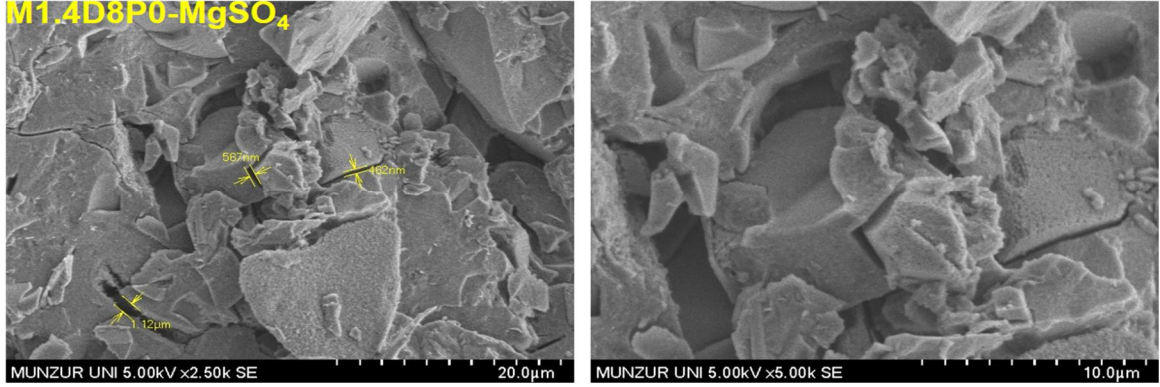
dolayı difüzyon mesafelerini azaltarak sülfat direncini artırır. PÇ hidratasyonu sırasında üretilen $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sülfat iyonlarına karşı aktiftir ve bu nedenle jips ve M-S-H gibi genişleyen fazları oluşturabilir. Her ne kadar bunlar baskın olmasa da bu fazların oluşumunun, görünür mikro çatlaklar ve boşluklar ile belirtilen bazı yerel mikro yapısal karışıklığa yol açabileceği ileri sürülebilir. Sülfat maruziyeti, bazı ek hidratasyon ve jelatinleşmeye yol açmış, böylece matrisin, 0°C' de kürlendikten sonra nispeten porlu ve çatlak eğilimli olandan daha yoğun ve daha uyumlu hale gelmesini sağlamıştır. %20 PÇ'nin eklenmesi, erken hidratasyonu iyileştirerek yoğunlaşmaya katkıda bulunmuş, ancak aynı zamanda jips gibi genişleyen fazların oluşumu yoluyla sülfat saldırısına karşı bazı hassasiyetleri de beraberinde getirmiştir. %80 YFC ve %20 PÇ'nin birleşimi, sülfat direnci ile erken hidratasyon yararları arasında bir denge kurarak, sülfat maruziyeti sonrası ikinci en büyük dayanım artışını (%22,4) elde etmiştir.



Şekil 6.14. Sülfat maruziyetinden sonra M1.4D6P20 karışımının SEM görüntüsü

Şekil 6.15, 90 gün boyunca MgSO_4 maruziyeti sonrası M1.4D8P0 karışımının SEM görüntüsünü göstermektedir. Matris, özellikle C-A-S-H jelleri için oldukça yoğun ve çok iyi şekillendirilmiş olup, bu, AAC sistemlerinin tipik bir özelliğidir. Bu C-A-S-H jelleri iyi bir kohezyon ve birbirine bağlanabilirlik sergiler, bu da sülfat maruziyeti altında yapısal kararlılığı sağlamaya yardımcı olur. Bazı kalıntı YFC parçacıkları görünmekte olup, bağlayıcı jellerle çevrilidir. Bu, %8 AD YFC'nin önemli bir kısmını çözmek için yeterli olduğunu, ancak sülfat maruziyeti altında tamamen etkinleştirilmediğini gösterir. Mikro çatlaklar ve boşluklar hala mevcuttur, ancak sülfat maruziyeti olmadan kürlenmiş karışımlara kıyasla çok daha az belirgindir. Bu mikro çatlakların, kürlenme sırasında

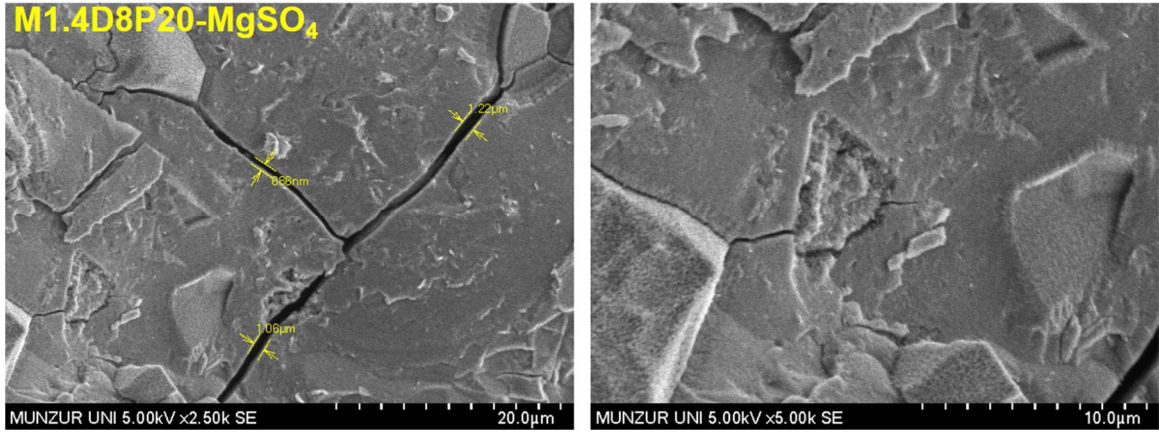
büzülmeden veya sülfat saldırısı nedeniyle oluşan hafif faz genişlemelerinden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. Stabil C-A-S-H jelleri sülfat geçişine karşı direnç gösterir, böylece $\text{Ca}(\text{OH})_2$ içeren sistemlerde sıklıkla görülen jips ve M-S-H gibi genişleyen fazların oluşumunu engeller. Diğer karışımlarla (örneğin, M1.4D6P0 veya M1.4D6P20) karşılaştırıldığında, sülfat maruziyeti sonrası %4,2'lik dayanım artışı oldukça düşük olmakla birlikte, bu, C-A-S-H jellerinin sülfat direncini temsil eder. Yüksek AD, YFC' den silika ve alümina çözünmesini genişletir, bu da daha yüksek dozlu sistemlere göre daha fazla jel oluşumuna yol açar (örneğin, M1.4D6P0). Alkali konsantrasyonlarının daha yüksek olması genellikle sodyum-kalsiyum silikat hidratları gibi fazlara yol açar, bu fazlar dayanım gelişimini desteklemez ve boşlukları doldurarak yoğunlaşmayı sınırlama eğilimindedir. Sülfat maruziyeti sonrası matris, 0°C' de kürleme sonrasına kıyasla ihmal edilebilir bir yoğunlaşma ve porozite azalması göstermiştir, jel ağında herhangi bir değişiklik olmamıştır. Bu karışımda PC' nin olmaması, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve genişleyen sülfat fazlarıyla ilişkili hassasiyetleri ortadan kaldırır. YFC aktivasyonu yoluyla oluşturulan C-A-S-H jelleri stabil kalır ve sülfat direncine sahiptir. Daha yüksek AD (%8 AD), daha düşük dozlu sistemlere kıyasla daha iyi YFC aktivasyonu ve jel oluşumu sağlar, bu da sülfat direncine katkıda bulunur. SEM analizi, M1.4D8P0 karışımının sülfat maruziyeti altında yapısal bütünlüğü koruma konusundaki etkinliğini vurgulamaktadır; stabil C-A-S-H jellerinin baskınlığı sayesinde %4,2'lik mütevazı bir dayanım artışı sağlanmıştır. 0°C kürlemeden sonra, mikro yapı, sülfat maruziyeti sonrasında iyileştirilmiş yoğunlaşma ve azalmış poroziteyi göstermektedir. PC'nin yokluğu, sülfat saldırısına karşı hassasiyetleri ortadan kaldırırken, yalnızca AAC'ye dayanmak, ek dayanım iyileştirmelerini sınırlamaktadır. Bu karışım, sülfat açısından zengin ortamlar için uygun bir seçenek olarak iyi bir sülfat direnci göstermektedir.



Şekil 6.15. Sülfat maruziyetinden sonra M1.4D8P0 karışımının SEM görüntüsü

Şekil 6.16, 90 günlük MgSO_4 maruziyeti sonrası M1.4D8P20 karışımının SEM görüntüsünü göstermektedir. SEM görüntüsü, PÇ hidratasyonu ve YFC'nin alkali aktivasyonu sayesinde C-S-H ve C-A-S-H jellerinden oluşan nispeten yoğun bir mikro yapı göstermektedir. Ancak, matris, sülfat maruziyeti öncesine kıyasla o kadar kompakt değildir ve mikro yapısal bozulma belirtileri göstermektedir. Sülfata maruz kalma nedeniyle, genellikle PÇ hidratasyonu sırasında üretilen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin Mg^{2+} ve SO_4^{2-} iyonlarıyla reaksiyona girmesi sonucu jips ve M-S-H gibi genişleyen ve bozulmaya yol açan fazlar oluşmuştur. Bu genişleyen fazlar mikro çatlaklar yaratmış, matrisin bütünlüğünü azaltmış ve sülfat maruziyeti sonrası %8,6'lık bir dayanım kaybına yol açmıştır. İlgili SEM görüntüsü, reaksiyona girmeyen YFC parçacıkları etrafında ve faz arayüzlerinde çatlakların oluştuğunu göstermektedir, bu da genişleyen sülfat fazları ve kütleme sırasında meydana gelen büzülmeden kaynaklanan gerilimlerin neden olduğu görünmektedir. Boşluk içeriğinin artışı, daha yüksek PÇ içeriğine sahip karışımlara (örneğin M1.4D8P0) kıyasla mikro yapısal bozulma ile daha yüksek poroziteye ilişkilidir. Böylece, %8 AD, YFC'yi stabilize C-A-S-H jelleri oluşturacak şekilde aktive etmek için yeterli olmuştur, ancak PÇ kullanımıyla elde edilen hidratasyon ürünleri, özellikle $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sülfat hassasiyetinin potansiyel bir kaynağıdır. Sülfat açısından zengin ortam, alkali zengin fazların oluşumunu teşvik edebilir, bu da mikro yapısal heterojenliğe yol açmış ve sülfat saldırısı altında matrisi daha da zayıflatmış olabilir. Bu durum, mikro yapıyı 0°C 'de kütleme sonrası iyi yoğunlaşmış ve uyumlu durumdan daha açık ve çatlamış bir duruma dönüştürerek sülfatın neden olduğu bozulmayı göstermektedir. %20 PÇ ekleyerek $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sülfat iyonlarıyla reaksiyona girerek genişleyen fazlar oluşturmuştur. Bu reaksiyon, gözlemlenen mikro yapısal bozulma ve dayanım kaybında önemli bir faktör olmuştur.

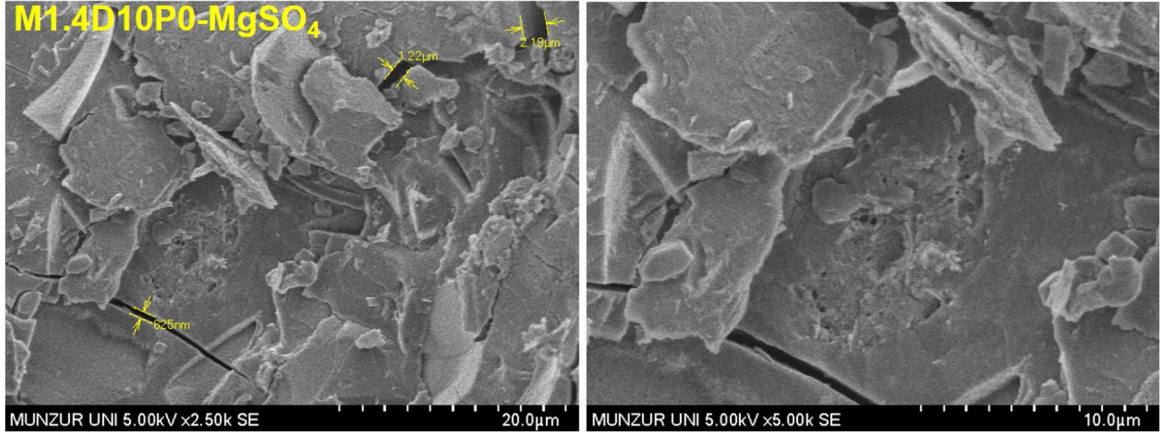
Sülfat saldırısı, jel ağını bozarak, boşluklar oluşturarak ve çatlakları yayarak matrisin bütünlüğünü azaltmıştır. Bu değişiklikler, maruziyet sonrası %8,6'lık dayanım kaybını açıklamaktadır. %8 AD, YFC'nin etkin bir şekilde aktive edilmesini ve başlangıç yoğunlaşmasını sağlasa da aynı zamanda alkali zengin fazların oluşumuna katkıda bulunmuş, bu da uzun vadeli sülfat direncini azaltmış olabilir. SEM analizi, M1.4D8P20 karışımında sülfat maruziyeti sonrası önemli mikro yapısal bozulmayı vurgulamaktadır ve bu, 0°C'de kürleme sonrası iyi yoğunlaşmış durumuyla karşılaştırılmaktadır. Genişleyen sülfat fazlarının oluşumu, artan boşluk içeriği ve mikro çatlaklar, gözlemlenen dayanım kaybını (%8,6) açıklamaktadır. %80 YFC ve %20 PÇ bileşimi, erken hidratasyon ve jel oluşumu arasında bir denge sağlasa da sülfat saldırısına karşı duyarlılığı, agresif sülfat ortamlarına uzun süreli maruziyet için daha az uygun hale getirmektedir.



Şekil 6.16. Sülfat maruziyetinden sonra M1.4D8P20 karışımının SEM görüntüsü

Şekil 6.17, 90 günlük $MgSO_4$ maruziyeti sonrası M1.4D10P0 karışımının SEM görüntüsünü göstermektedir. SEM görüntüsü, çevresel sülfat maruziyeti sonrası önemli mikro yapısal hasarı gösteren, belirgin çatlaklar ve boşluklar içeren bozulmuş bir matrisi sunmaktadır. %100 YFC karışımlarındaki ana bağlayıcı fazlar olan C-A-S-H fazlarının kararsızlaştığı, dolayısıyla bağlayıcılığının ve yoğunluğunun azaldığı görülmektedir. Reaksiyona girmeyen önemli miktarda YFC parçacığı, çevresinde mikro çatlaklarla birlikte görünmektedir. Bu durum, yüksek aktivatör miktarına (%10 AD) rağmen reaksiyonun çok eksik olduğunu açıkça göstermektedir. Bu durum, muhtemelen sülfat saldırısı sonrası çevredeki jellerin bozulmasıyla daha da şiddetlenmiş, böylece daha fazla inaktif olmuş cüruf açığa çıkmıştır. Mikro çatlaklar, özellikle reaksiyona girmeyen YFC

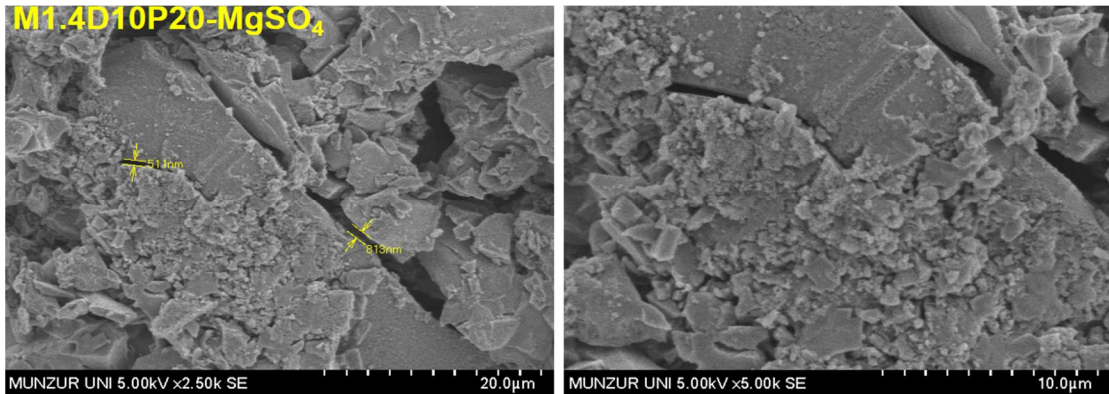
parçacıkları etrafında ve bağlayıcı fazların arayüzlerinde yaygın şekilde gözlemlenmektedir. Artan boşluk içeriği, daha yüksek poroziteye yol açmakta, bu da her zaman transfer verimliliğini ve mekanik performansı azaltmaktadır. C-A-S-H jelleri, sülfat maruziyeti nedeniyle kararsızlaşmış ve muhtemelen daha az uyumlu M-S-H fazlarına dönüşmüştür. Bu faz değişikliği, matrisi zayıflatmakta ve dolayısıyla dayanım kaybına yol açmaktadır. Alçı veya etrenjit oluşumu, PÇ ilavesinin sınırlı olmasından dolayı gerçekleşmemiş olsa da alüminosilikat matrisi yine de sülfat kaynaklı bozulmalara maruz kalmaktadır [143]. %10 AD katkısı, YFC'nin önemli bir başlangıç aktivasyonunu sağlasa da fazla alkalinite alkali zengin fazların oluşumunu teşvik etmiş olabilir. Bu fazlar, dayanımı büyük ölçüde artırmaz ve mikro yapısal heterojenliğe katkıda bulunarak sülfat direncini azaltabilir. Bu karışımın koşullandırılması, 0°C'de yoğun, iyi bağlanmış bir matristen, sülfat maruziyetiyle çok daha gözenekli, çatlamış ve zayıflamış bir malzemeye dönüşmesini sağlamıştır. Bu bozulma, özellikle PÇ hidratasyonu gibi koruyucu mekanizmaların eksikliğinde, C-A-S-H jellerinin sülfat iyonlarına karşı hassasiyetini ortaya koymaktadır. %10 AD, başlangıçtaki YFC aktivasyonunu artırmış olsa da alkali zengin fazların ve mikro yapısal heterojenliğin oluşmasına neden olmuş, bu da sülfat direncini azaltmıştır. PÇ eksikliği, jips ve etrenjit gibi genişleyen sülfat fazlarını ortadan kaldırmış, ancak alüminosilikat matrisini yalnızca C-A-S-H jellerine bağımlı bırakmıştır ve bu jeller, uzun süreli sülfat maruziyetiyle kararsızlaşmıştır. SEM analizi, sülfat maruziyeti sonrası M1.4D10P0 karışımının önemli ölçüde bozulduğunu, yaygın çatlaklar, artan porozite ve kararsızlaşmış jel ağları ile en büyük dayanım kaybını (%10,6) gösterdiğini vurgulamaktadır. 0°C' de kürlendikten sonraki nispeten kompakt ve yoğun durumu ile karşılaştırıldığında, sülfata maruz kalan matris, agresif sülfat ortamlarında yalnızca AAC sistemlerine dayanmanın sınırlamalarını göstermektedir. Yüksek AD, başlangıçtaki aktivasyonu iyileştirse de aynı zamanda uzun vadeli performansı azaltan hassasiyetlere yol açmış, bu da bu karışımı ek koruyucu önlemler olmadan uzun süreli sülfat maruziyeti için uygunsuz hale getirmiştir.



Şekil 6.17. Sülfat maruziyetinden sonra M1.4D10P0 karışımının SEM görüntüsü

Şekil 6.18, 90 günlük MgSO_4 maruziyeti sonrası M1.4D10P20 karışımının SEM görüntüsünü göstermektedir. Yapılar, belirgin C-S-H ve C-A-S-H jelleri içeren orta yoğunluklu bir matriste görülmektedir. C-S-H jelleri, PÇ hidratasyonundan kaynaklanırken, C-A-S-H jelleri, YFC'nin aktivasyonu ile matrise entegre olmuştur: bu şekilde, C-S-H ve C-A-S-H jellerinin sinerjik stabilizasyon katkısı sayesinde sülfat saldırısına karşı direnç sağlanmıştır. Reaksiyona girmeyen bazı YFC granülleri gözlemlenebilir; bu, aktivasyona rağmen hepsinin yetersiz aktivasyon enerjisi ve/veya PÇ'nin birlikte gerçekleşen hidratasyon reaksiyonları nedeniyle aktivasyona uğramadığını gösterir. Reaksiyona girmemiş granüller, non-PÇ karışımlarına kıyasla daha az görünürdür, bu da genel aktivasyonun PÇ hidratasyonu sayesinde önemli ölçüde iyileştiğini ima etmektedir. Mikro çatlaklar ve boşluklar gözlemlenebilir ancak nispeten sınırlıdır. Bu, daha yüksek boşluk oranına sahip karışımlara kıyasla sülfattan kaynaklanan bozulmalara karşı daha iyi direnç gösterebileceğini belirtebilir. Çatlaklar genellikle reaksiyona girmeyen partiküller ve faz arayüzlerinde lokalize olma eğilimindedir, bu da yalnızca küçük büzülme gerilmeleri veya lokalize genişlemelerin olduğunu gösterir. SEM görüntüsünde, sülfat hasarı olmadan matriksin büyük ölçüde sağlam olduğu görülmektedir. Sülfat maruziyeti sonrası %10,6'lık dayanım artışı, yeterince stabil jel fazlarının oluşumu ve şişme fazlarının (örneğin jips ve etrenjit) olmaması sayesinde sülfat maruziyeti nedeniyle sağlanan dayanım artışını yansıtmaktadır. PÇ hidratasyonu, boşlukları dolduran ve matriste yoğunlaşmayı artıran C-S-H jelleri üretmiştir [144]. PÇ hidratasyonunda oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$, YFC ile ikincil reaksiyonlara girerek daha fazla C-A-S-H jeli üretmiş ve sülfatlara karşı dayanıklılığı artırmıştır. PÇ hidratasyonundan oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sülfat iyonlarıyla reaksiyona girerek

küçük miktarlarda jips veya M-S-H oluşturabilir; bu da matristeki lokalize bölgeleri zayıflatabilir. Yüksek AD, YFC' nin optimal aktivasyonunu sağlamış ve onu güçlü bir C-A-S-H jel ağı içinde etkinleştirmiştir. Ancak, çok yüksek alkali, dayanımı artırmayan ve boşlukları işgal eden alkali zengin fazların oluşumunu teşvik etmiş olabilir. Sülfata maruziyet sonrası mikro yapı, neredeyse tüm yapısını koruyarak sadece lokalize küçük bozulmalar göstermektedir. Gözlemlenen %10,6'lık dayanım artışı, hem C-S-H hem de C-A-S-H jellerinin varlığı sayesinde sülfat saldırısına karşı matriksin dayanıklılığını yansıtmaktadır. Bu, %20 PÇ eklenmesiyle erken hidratasyonu ve C-S-H jellerinin üretimini iyileştirmiş, böylece matrisi yoğunlaştırmış ve sülfata karşı direnç sağlamıştır. Belki de biraz daha $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sülfatlar ile reaksiyona girmiştir, ancak bu, söz konusu matrise fazla zarar vermeyecektir. Bu yüksek AD, YFC'nin mükemmel bir şekilde aktivasyonunu sağlayacak ve jellerin oluşumunu teşvik edecektir, ancak uzun vadeli stabiliteyi, özellikle çok agresif koşullarda, alkali zengin fazların oluşumuyla azaltabilir. M1.4D10P20'nin sülfat maruziyeti sonrası SEM analizi, karışımın sağlam performansını, mikro yapısal bozulmanın çok küçük olduğu ve dayanım artışının %10,6 olduğu bir durumu göstermektedir [136, 145]. PÇ hidratasyonu ve YFC aktivasyonunun sinerjik etkileri, sülfat girişine ve bozulmasına karşı dirençli stabil bir matris oluşturmuştur. Sülfat öncesi durumu ile karşılaştırıldığında, matriksin yoğunlaşması ve birleşmesi çoğunlukla korunmuş, bu da bu karışımın orta düzeyde sülfat maruziyetine sahip ortamlarda uygun olduğunu göstermektedir. Ancak, lokalize çatlaklar ve boşluklar, AD'nin veya PÇ içeriğinin optimize edilmesi gibi potansiyel iyileştirme alanlarını vurgulamaktadır [146] .



Şekil 6.18. Sülfat maruziyetinden sonra M1.4D10P20 karışımının SEM görüntüsü

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, 0°C’de kürlenene, farklı PÇ içeriği ve AD’ye sahip hibrit AACPC harçlarının mekanik özelliklerini, mikro yapısal özelliklerini ve sülfat direncini kapsamlı bir şekilde değerlendirmiştir. Bulgular, bu değişkenlerin etkileşimi hakkında önemli bilgiler sunmakta ve soğuk iklimlere uygun sürdürülebilir inşaat malzemeleri geliştirmek için rehberlik sağlamaktadır. AACPC harçlarının basınç dayanımı hem PÇ içeriği hem de AD tarafından önemli derecede etkilenmiştir:

- a. %100 YFC içeren karışımlar, düşük sıcaklıklarda YFC'nin reaktivitesinin azalması nedeniyle daha yavaş bir dayanım gelişimi göstermiştir. Ancak, bu karışımlar, C-A-S-H jellerinin stabilitesinden faydalanmış ve bu jeller uzun vadeli dayanıklılık ve üstün sülfat direnci sağlamıştır.
- b. YFC'nin kısmi olarak PÇ ile yerine konması, PÇ' nin hızlı hidratasyonu ve C-S-H jellerinin oluşumu nedeniyle erken yaş dayanım gelişimini hızlandırmıştır. Ancak, daha yüksek PÇ içeriğinde (%20) uzun vadeli dayanım ve dayanıklılık, sülfat saldırısına olan artan duyarlılık nedeniyle olumsuz etkilenmiştir; bu da jips ve etrenjit gibi genişleyen fazların oluşumuyla ilişkilidir.
- c. %8 AD, etkili YFC aktivasyonu ile istenmeyen alkali zengin fazların oluşumunun minimize edilmesi arasında bir denge sağlayarak performansı optimize ettiği bulunmuştur. Tersine, daha yüksek bir AD (%10 AD), erken yaş dayanımını hızlandırmış ancak aşırı alkali kaynaklı porozite ve faz kararsızlığı nedeniyle uzun vadeli performansı azaltmıştır.
- d. Daha yüksek AD, YFC'nin çözünmesini artırarak yoğun bir C-A-S-H jel ağı oluşumunu teşvik etmiştir. Ancak, aşırı alkali, mekanik dayanım üzerinde önemli bir katkı sağlamayan ve bazen mikro yapıyı bozan alkali zengin fazların, örneğin sodyum-kalsiyum silikat hidratlarının gelişimine yol açmıştır.

- e. PÇ'nin Rolü: PÇ'nin dahil edilmesi, C-S-H jelleri gibi tamamlayıcı hidratasyon ürünlerinin oluşumu yoluyla matris yoğunlaşmasını artırmıştır. Orta düzeyde PÇ içeriği (%10) bu hidratasyon ürünleriyle matrisin birleşmesini ve dayanıklılığını iyileştirmiştir. Ancak, yüksek PÇ içeriği (%20) Ca (OH)₂ oluşumunu artırmış, bu da sülfat iyonlarıyla reaksiyona girerek genişleyen fazlar oluşturmuş ve mikro yapısal bozulmalara yol açmıştır.
- f. Soğuk Hava Etkileri: 0°C' de kürlenme, reaksiyon kinetiğini yavaşlatmış ve tüm karışımlarda reaktif olmayan YFC parçacıkları ve boşlukların oluşmasına yol açmıştır. Ancak, bu etkiler, orta düzeyde PÇ içeriği ve optimal AD kullanılarak hafifletilmiştir. Bu, erken hidratasyonu ve matris yoğunlaşmasını artırarak daha iyi performans elde edilmesini sağlamıştır.
- g. %100 YFC Karışımlarında Üstün Performans: %100 YFC içeren karışımlar, stabil C-A-S-H jel bileşenlerinin baskınlığı sayesinde olağanüstü sülfat direnci sergilemiştir. Bu jeller, sülfatın nüfuz etmesini ve bozulmayı engellemiştir. Bu karışımlar, sülfat maruziyeti sonrasında bazı durumlarda %38,7'ye kadar güç artışları göstermiştir.
- h. PÇ İçeren Karışımların Hassasiyeti: PÇ içeren karışımlar, PÇ içeriği arttıkça azalan sülfat direnci sergilemiştir. PÇ hidratasyonu sırasında oluşan yüksek Ca (OH)₂ seviyeleri, sülfat iyonlarıyla reaksiyona girerek jips ve etrenjit gibi genişleyen fazlar oluşturmuş, bu da mikro yapı zayıflamasına ve güç kaybına yol açmıştır.
- i. Aktivasyon Dozu Etkisi: Daha yüksek AD, erken yaş gücü gelişimini iyileştirirken, aynı zamanda alkali zengin fazların ve yerel mikro çatlakların oluşumu nedeniyle PÇ içeren karışımların sülfat kaynaklı bozulmalara karşı hassasiyetini artırmıştır.

Sonuçlar, alkali aktivasyonu yapılmış sistemlerin, soğuk hava koşullarında inşaat için geleneksel PÇ tabanlı malzemelere sürdürülebilir alternatifler olarak potansiyelini vurgulamaktadır. Özellikle orta seviyede PÇ içeriği (%10) ve AD (%8 AD) ile doğru şekilde optimize edilmiş karışımlar, sıfırın altındaki kür koşullarında tatmin edici mekanik performans ve dayanıklılık sergilemiştir. Bu sistemler,

endüstriyel bir yan ürün olan cürufu kullanarak ve PÇ kullanımını en aza indirerek inşaat faaliyetlerinin karbon ayak izini azaltma konusunda uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır.

Gelecekteki Araştırmalar İçin Öneriler

Karışımların Optimizasyonu: Gelecek çalışmalarda, YFC'nin reaktivitesini artırmak ve özellikle PÇ içeren karışımlarda faz istikrarsızlıklarını azaltmak için karıştırılmış aktivatörler, alternatif ham maddeler veya yardımcı malzemelerin kullanımı incelenmelidir.

Aşırı Koşullarda Dayanıklılık: Bu sistemlerin, birleşik mekanik, termal ve kimyasal stres koşulları altında (örneğin, donma-çözülme döngüleri) performansları daha ayrıntılı bir şekilde incelenmelidir.

Büyütme ve Pratik Uygulama: Bu bulguları gerçek dünya uygulamalarında doğrulamak için büyük ölçekli denemeler yapılmalı, lojistik zorluklar, ekonomik uygunluk ve uzun vadeli çevresel faydalar ele alınmalıdır.

Alternatif Aktivatör Sistemleri: Potasyum bazlı veya karışık alkali sistemleri gibi alternatif aktivatörler üzerine yapılan araştırmalar, alkali kaynaklı poroziteyi azaltırken düşük sıcaklık ortamlarında yüksek performansı korumaya yardımcı olabilir.

Bu çalışma, hibrit AACPC harçlarının performansı üzerinde PÇ içeriği, AD dozu ve kür koşullarının etkileşimi hakkında kapsamlı bir anlayış sunmaktadır. Bulgular, mekanik performans, dayanıklılık ve sürdürülebilirlik arasında bir denge sağlamak için bu değişkenlerin optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu malzemelerin zorlu soğuk hava koşullarında iyi performans gösterme potansiyelini sergileyerek, bu araştırma daha yeşil ve dayanıklı inşaat uygulamalarının geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Mei Y., Zhao L., Nong X., Yang T., Zhang X., Wang R. and Wang X.. Field test study on early strain development law of mass concrete in cold weather. *Case Studies in Construction Materials*. (2022); 17: e01455.
- [2] Barna LA., Seman PM. and Korhonen C.. Energy-efficient approach to cold-weather concreting. *Journal of Materials in Civil Engineering*. (2011); 23(11): 1544-1551.
- [3] Yu K., Jia M., Yang Y. and Liu Y.. A clean strategy of concrete curing in cold climate. Solar thermal energy storage based on phase change material. (2023); 331: 120375.
- [4] Liu YS., Sun FZ., Y and, Yang YZ .. Experimental and numerical research on development of synthetic heat storage form incorporating phase change materials to protect concrete in cold weather *Renew Energ.* (2020); 149: 1424-1433.
- [5] Zhang HE., Ai JH., Ren Q., Zhu XP. and He B., ZW. Jiang. Understanding the strength evolution of alkali-activated slag pastes cured at subzero temperature. *Cement Concrete Comp.* (2023); 138.
- [6] Alzaza A., Ohenoja K. and 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 Comp.* (2021); 122.
- [7] Alzaza A., Ohenoja K. and Illikainen M., One-part alkali-activated blast furnace slag for sustainable construction at subzero temperatures. *Construction and Building Materials*. (2021); 276.
- [8] Ju C., Ye RR., Wu YF., Sun PF., Liu and Yang YZ.. Effect of Alkali Cation on Performance of Alkali-Activated Slag Mortar in Cold Environments. *Separations*. 2022; 9(12).
- [9] Liu Y., Sun F., Yu K. and Yang Y.. Experimental and numerical research on development of synthetic heat storage form incorporating phase change materials to protect concrete in cold weather. *Renew Energ.* (2020); 149: 1424-1433.
- [10] Yasien AM., Bassuoni MT. and Ghazy A.. Phase change material nanocomposites as an internal curing aid for nano-modified concrete under cold weather. *Construction and Building Materials*. (2024); 411.

- [11] Demirboğa R., Karagöl F., Polat R. and MA. Kaygusuz. The effects of urea on strength gaining of fresh concrete under the cold weather conditions. *Construction and Building Materials*. (2014); 64: 114-120.
- [12] Yasien AM., Bassuoni MT., Abayou A. and A. Ghazy. Nano-Modified Concrete as Repair Material in Cold Weather. *Aci Mater J*. (2021); 118(2): 149-160.
- [13] Zhang G., Yang HL., Ju C. and Yang YZ. Novel selection of environment-friendly cementitious materials for winter construction: Alkali-activated slag/Portland cement. *Journal of Cleaner Production*. (2020); 258..
- [14] Haque M.A. and Chen B.. Research progresses on magnesium phosphate cement: A review. *Construction and building materials*. (2019); 211: 885-898.
- [15] Wang S., Jian LM., Shu ZH., Wang JF., Hua X. and Chen LY.. Preparation, properties and hydration process of low temperature nano-composite cement slurry. *Construction and Building Materials*. (2019); 205: 434-442.
- [16] Zhang H., Sarker PK., Wang Q., He B. and Jiang Z.. Strength and toughness of ambient-cured geopolymer concrete containing virgin and recycled fibres in mono and hybrid combinations. *Construction and Building Materials*. (2021); 304: 124649.
- [17] Koksall F., Bayraktar OY., Bodur B., Benli A. and Kaplan G.. Insulating and fire-resistant performance of slag and brick powder based one-part alkali-activated lightweight mortars. *Structural Concrete*. (2023); 24(3): 3128-3146.
- [18] Bodur B., Bayraktar OY., Benli A., Kaplan G., Tobbala DE. and Tayeh B.. 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. *Journal of Building Engineering* (2023); 76.
- [19] Bayraktar OY., Eshtewi SST, Benli A., Kaplan G., Toklu K and Gunek F.. The impact of RCA and fly ash on the mechanical and durability properties of polypropylene fibre-reinforced concrete exposed to freeze-thaw cycles and MgSO₄ with ANN modeling. *Construction and Building Materials*. (2021); 313.
- [20] Gencel O., Bayraktar OY., Kaplan G., Benli A., Martínez-Barrera G., Brostow W., Tek M. and Bodur B.. Characteristics of hemp fibre reinforced foam concretes with fly ash and Taguchi optimization. *Construction and Building Materials*. (2021); 294.
- [21] Bayraktar OY., Özel HB., Benli A., Yılmazoğlu MU., Türkel İ., Dal BB., Şevik H. and Kaplan G.. Sustainable foam concrete development: Enhancing durability and performance through pine cone powder and fly ash incorporation in alkali-activated geopolymers. *Construction and Building Materials*. (2024); 457: 139422.

- [22] Bayraktar OY., Benli A., Bodur B., Öz A. and Kaplan G.. Performance assessment and cost analysis of slag/metakaolin based rubberized semi-lightweight geopolymers with perlite aggregate: Sustainable reuse of waste tires. *Construction and Building Materials*. (2024); 411.
- [23] Arslan S., Öz A., Benli A., Bayrak B., Kaplan G. and Aydin AC.. Sustainable use of silica fume and metakaolin in slag/fly ash-based self-compacting geopolymer composites: Fres physico-mechanical and durability properties. *Sustain Chem Pharm*. (2024); 38.
- [24] Karatas M., Dener M., Mohabbi M. and Benli A.. A study on the compressive strength and microstructure characteristic of alkali-activated metakaolin cement. *Materia-Brazil*. (2019); 24(4).
- [25] Balun B., and Karatas M, Influence of curing conditions on pumice-based alkali activated composites incorporating Portland cement. *J Build Eng*. (2021); 43.
- [26] Turkoglu M., Bayraktar OY., Benli A. and 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.
- [27] Benli A.. Sustainable use of waste glass sand and waste glass powder in alkali-activated slag foam concretes: Physico-mechanical, thermal insulation and durability characteristics. *Construction and Building Materials*. (2024); 438.
- [28] Zhang HE., Shi XS. and Wang QY.. Effect of Curing Condition on Compressive Strength of Fly Ash Geopolymer Concrete. *Aci Mater J*. (2018); 115(2): 191-196.
- [29] Amran M., Murali G., Khalid NHA., Fediuk R., Ozbakkaloglu T., Lee YH., Haruna S. and Lee YY.. Slag uses in making an ecofriendly and sustainable concrete: A review. *Construction and Building Materials*. (2021); 272.
- [30] Ju C., Liu YS., Jia MJ., Yu KY., Yu ZY. and Yang YZ.. Effect of calcium oxide on mechanical properties and microstructure of alkali-activated slag composites at sub-zero temperature. *Journal of Building Engineering*. (2020); 32.
- [31] Neupane K., Chalmers D. and Kidd P.. High-strength geopolymer concrete-properties, advantages and challenges. *Advances in Materials*. (2018); 7(2): 15-25.
- [32] Abubakr AE., Soliman AM. and Diab SH.. Effect of activator nature on the impact behaviour of Alkali-Activated slag mortar. *Construction and Building Materials*. (2020); 257.

- [33] Duxson P., SW. Mallicoat SW., Lukey v, Kriven WM. and Van Deventer JS,. The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers,.Colloid Surface A. (2007); 292(1): 8-20.
- [34] Atiş CD., Bilim C., Çelik and Karahan O.. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. Construction and Building Materials. (2009); 23(1): 548-555.
- [35] Shi ZG., Shi CJ., Wan S. and Zhang ZH.. Effects of alkali dosage and silicate modulus on alkali-silica reaction in alkali-activated slag mortars. Cement and Concrete Research. (2018); 111: 104-115.
- [36] Fang S., Lam ESS., Li B. and Wua B.. Effect of alkali contents, moduli and curing time on engineering properties of alkali activated slag. Construction and Building Materials. (2020); 249.
- [37] Wongs A., Boonserm K., Waisurasingha C., Sata V. and Chindaprasirt P.. Use of municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash in high calcium fly ash geopolymer matrix. Journal of Cleaner Production. (2017); 148: 49-59.
- [38] Yang KH., Cho AR. and Song JK.. Effect of water-binder ratio on the mechanical properties of calcium hydroxide-based alkali-activated slag concrete. Construction and Building Materials. (2012); 29: 504-511.
- [39] Rivera O., Long W., Weiss Jr C., Moser R., Williams B., Torres-Cancel K., Gore E. and Allison PJ.. Effect of elevated temperature on alkali-activated geopolymeric binders compared to portland cement-based binders. Cement Concrete Research. (2016); 90: 43-51.
- [40] Provis JLJ.. Alkali-activated materials. Cement concrete research. (2018); 114: 40-48.
- [41] Davidovits J.. Geopolymer chemistry and applications. Geopolymer Institute. 2008.
- [42] Glukhovskiy V., Rostovskaja G. and Rumyna G.. High strength slag-alkaline cements. Proceedings of the seventh international congress on the chemistry of cement. 1980; 164-168.
- [43] Gebregziabihier BS., Thomas R. and Peethamparan SJ.. Very early-age reaction kinetics and microstructural development in alkali-activated slag. Cement Concrete Composites. (2015); 55: 91-102.
- [44] 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; 372-376.

- [45] Nuryadı H. and Özşahin BJ.. Çelik ve Karma Taşıyıcı Sistemli Sanayi Bina Örneklerinin Kaba Yapım Maliyetlerinin Trakya Bölgesi için Karşılaştırılması. Kırklareli Üniversitesi Muhendislik ve Fen Bilimleri Dergisi. (2023); 9(2): 418-442.
- [46] Habert G., Miller SA., John VM., Provis JL., Favier A., Horvath A. and Scrivener KLJ.. Environment, Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth Environment*. (2020); 1(11): 559-573.
- [47] Krausmann F., Lauk C., Haas W. and DJ. Wiedenhofer DJ.. From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy. . *Global environmental change*. (2018); 52: 131-140.
- [48] Provis JL. and Bernal SAJ.. Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*. (2014); 44(1): 299-327.
- [49] Yurt Ü. and Bekar FJ.. 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.
- [50] Lian C., Wang Y., Liu S., Hao H. and Hao YJ.. Experimental study on dynamic mechanical properties of fly ash and slag based alkali-activated concrete. *Construction Building Materials*. (2023); 364: 129912.
- [51] Provis JL. and Van Deventer JSJ.. *Geopolymers: structures, processing. properties and industrial applications*, Elsevier. 2009.
- [52] Balun B.. Alkalilerle aktive edilmiş bitlis yöresi pomzası içeren hibrit bağlayıcıların üretilebilirliğinin incelenmesi. (2019).
- [53] Glukhovsky V.J., *Soil silicates*. Kiev, USSR. Gostroiizdat Publish. (1959).
- [54] I. Garcia-Lodeiro, Palomo A. and AJ. Fernández-Jiménez AJ., An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders. *Handbook of alkali-activated cements. mortars concretes*. (2015); 19-47.
- [55] Shi C., Roy D. and Krivenko P.. *Alkali-activated cements and concretes*. CRC press. 2003.
- [56] Provis JLJ.. Alkali-activated materials. *Cement concrete research*. (2018); 114: 40-48.

- [57] Angulo-Ramírez DE., de Gutiérrez RM. and Puertas FJC., Alkali-activated Portland blast-furnace slag cement: Mechanical properties and hydration. *Construction Building Materials*. (2017); 140: 119-128.
- [58] Fernández-Jiménez A., Palomo J. and Puertas FJ.. Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour. *Cement concrete research*. (1999); 29(8): 1313-1321.
- [59] Aydın S. and Baradan BJ.. Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars. *Composites Part B: Engineering*. (2014); 57: 166-172.
- [60] Bilim C., Karahan O., Atiş CD. and Ilkentapar SJ.. Influence of admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars subjected to different curing condition. *Materials Design*. (2013); 44: 540-547.
- [61] Collins F. and Sanjayan JGJ.. Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. *Cement concrete research*. (1999); 29(3): 455-458.
- [62] Fernandez-Jimenez A., Flores E., Maltseva O., Garcia-Lodeiro I. and Palomo AJ.. Hybrid alkaline cements: Part III. Durability and industrial applications, *Romanian Journal of Materials*. (2013); 43(2): 68-73.
- [63] Bernal SA., De Gutiérrez RM., Pedraza AL., Provis JL., Rodriguez ED. and Delvasto S.. Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes. *Cement Concrete Research*. (2011); 41(1): 1-8.
- [64] Awoyera P. and Adesina A.. Durability properties of alkali activated slag composites: short overview. Springer. 2020.
- [65] Ye H., Chen Z., Huang LJC. and research c.. Mechanism of sulfate attack on alkali-activated slag: The role of activator composition. *Cement Concrete Research*. (2019); 125: 105868.
- [66] Carabba L., Moricone R., Scarponi GE., Tugnoli A. and Bignozzi MCJ.. Alkali activated lightweight mortars for passive fire protection: A preliminary study. *Construction building materials*. (2019); 195: 75-84.
- [67] Rovnaník P., Bayer P. and Rovnaníková PJC. Materials Characterization of alkali activated slag paste after exposure to high temperatures. *Construction Building Materials*. (2013); 47: 1479-1487.
- [68] Bakharev T., Sanjayan J. and Y.-BJ. Cheng. Resistance of alkali-activated slag concrete to carbonation. *Cement Concrete Research*. (2001); 31(9) :1277-1283.

- [69] He J., Gao Q., Wu Y., He J. and Pu XJ.. Study on improvement of carbonation resistance of alkali-activated slag concrete. *Construction Building Materials*. (2018); 176: 60-67.
- [70] Pacheco-Torgal F., Abdollahnejad Z., Camões A., Jamshidi M. and Ding YJ.. Durability of alkali-activated binders: a clear advantage over Portland cement or an unproven issue. *Construction Building Materials*. (2012); 30: 400-405.
- [71] Shahrajabian F. and Behfarnia KJ.. The effects of nano particles on freeze and thaw resistance of alkali-activated slag concrete. *Construction building materials*. (2018); 176: 172-178.
- [72] Wang S.-D., Pu X.-C., Scrivener K. and Pratt PJ.. Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems. *Advances in cement research*. (1995); 7(27): 93-102.
- [73] Sevim UKJ., Colemanite ore waste concrete with low shrinkage and high split tensile strength. *Materials Structures*. (2011); 44: 187-193.
- [74] Hajjaji W., Andrejkovičová S., Zanelli C., Alshaaer M., Dondi M., Labrincha J. and Rocha FJ.. Composition and technological properties of geopolymers based on metakaolin and red mud. *Materials Design*. (2013); 52: 648-654.
- [75] Bingöl Ş. and Çavdar AJRi.. A new nomogram proposal to determine concrete compressive strength by combined nondestructive testing methods. *Research in Nondestructive Evaluation*. (2018;); 29(1): 1-17.
- [76] Büchel KH., Moretto H.-H. and Werner D.. *Industrial inorganic chemistry*. John Wiley & Sons. 2008.
- [77] Fifinatasha S., Al Bakri AM., Kamarudin H., Zarina Y., Rafiza A. and AEB JJ.. Liyana. Reviews on the different sources materials to the geopolymer performance. *Reviews on the Different Sources Materials*. (2013); 7(12): 3835-3842.
- [78] Pacheco-Torgal F., Castro-Gomes J. and Jalali SJ.. Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction building Materials*. (2008); 22(7): 1305-1314.
- [79] Van Deventer J., Provis J., Duxson P. and Lukey GJ.. Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products. *Journal of hazardous materials*. (2007); 139(3): 506-513.

- [80] Rashad AM., Mosleh YA. and Gharieb MJ.. Preparatory Study about Effect of Feldspar on properties of Alkali-activated slag concrete. *ACI Materials Journal*. (2023); 120(2): 53-63.
- [81] Liu M., Zhang Y., Wang C. and Ma ZJ.. Reusing thermoactivated waste paste/concrete powder for sustainable alkali-activated materials: Effects of thermoactivated temperature. *Construction Building Materials*. (2024); 437: 136973.
- [82] Zhang H., Ai J., Ren Q., Zhu X., He B. and Jiang ZJ.. Understanding the strength evolution of alkali-activated slag pastes cured at subzero temperature. *Cement Concrete Composites*. (2023); 138: 104993.
- [83] Ouellet-Plamondon C. and Habert G.. Life cycle assessment (LCA) of alkali-activated cements and concretes. *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*, Elsevier. 2015; 663-686.
- [84] Kumar KA., Shetty KK., Selvaraj R., Vinayagam R. and Samanth AJ.. Manganese metal ion removal from aqueous solution using industrial wastes derived geopolymer. *Environmental Nanotechnology, Monitoring Managemen*. (2024); 22: 100999.
- [85] Provis JL. and Bernal SAJ.. Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*. (2014); 44(1): 299-327.
- [86] Siddique R. and Klaus JJ.. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science*. (2009); 43(3-4): 392-400.
- [87] Kop M. ve Yazıcıoğlu SJ.. 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.
- [88] Balçıkanlı M., Özbay E. ve Türker HTJ.. Alkalilerle Aktive Edilmiş Harçların Çekip Çıkarma Ve Aşınma Dirençlerinin Belirlenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. (2015); 4(2): 87-98.
- [89] Özsoy EFJ., Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Alkali Aktivasyonlu Kompozitlerin Yüksek Sıcaklık Performanslarının Araştırılması. *International Journal of Pure Applied Sciences*. 2024; 10(2): 418-432.
- [90] Roy DMJ.. Alkali-activated cements opportunities and challenges. *Cement concrete research*. (1999); 29(2): 249-254.
- [91] Krishna R., Mishra J., Adetayo A., Das S. and Mustakim SJ.. 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).

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

[93] Xu H. and Van Deventer JJI.. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. (2000); 59(3): 247-266.

[94] 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.

[95] Koca CJ.. 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.

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

[97] Kaya M., Koksall F., Gencel O., Munir MJ. and Kazmi SMS.. Influence of micro FeO and MgO on the physical and mechanical properties of the zeolite and kaolin based geopolymer mortar. J Build Eng. (2022); 52.

[98] Damtoft J.S., Lukasik J., Herfort D., Sorrentino D. and Gartner EM.. Sustainable development and climate change initiatives. Cement Concrete Res. (2008); 38(2): 115-127.

[99] Juenger MCG., Winnefeld F., Provis JL. and Ideker JH.. Advances in alternative cementitious binders. Cement Concrete Res. (2011); 41(12): 1232-1243.

[100] Zhou W., Yan C., Duan P., Liu Y., Zhang Z., Qiu X. and Li D.. A comparative study of high-and low- Al_2O_3 fly ash based-geopolymers: The role of mix proportion factors and curing temperature. Mater Design. (2016); 95: 63-74.

[101] Habert G., de Lacaillerie JBD. and Roussel N.. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. J Clean Prod. (2011); 19(11): 1229-1238.

[102] Lokuge W., Wilson A., Gunasekara C., Law DW. and Setunge S.. Design of fly ash geopolymer concrete mix proportions using Multivariate Adaptive Regression Spline model. Constr Build Mater. (2018); 166: 472-481.

- [103] Bingöl Ş.. Farklı cüruf türlerinden geopolimer harç üretimi. Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi. (2022); 4(2): 173-178.
- [104] Pehlivan AOJ.. Effect of alkali content and activator modulus on mechanical properties of alkali activated mortars. Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi. (2020); 10(2): 177-185.
- [105] Çelikten S. ve Atabey İİJ.. Farklı Silis Ve Alümin Kaynaklarının Atık Mermer Tozu Esaslı Alkali İle Aktive Edilmiş Harçlarının Özelliklerine Etkisi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi. (2021); 9(2): 396-405.
- [106] Şinik O. Geopolimer betonlarda dayanıklılık özelliklerinin araştırılması. Afyonkocatepe University. 2019.
- [107] Yaman G., Gül G., Arslan Yüce P. ve Günal A.. Sodyum Hidroksitin Tatlısu Midyelerinin Hemosit Sayıları Üzerine Etkileri. Gazi Üniversitesi, 5th International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences Iceans. 2024; 1570-1574.
- [108] Chadwick SSJ.. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. Reference Services Review. (1988); 16(4): 31-34.
- [109] Cao RL., Jia ZJ., Zhang SQ., Chen C., Gao YY. and Zhang YM.. Effect of low-calcium and high-magnesium ferronickel slag on the microstructure and micromechanical properties of alkali-activated blended ground granulated blast furnace slag. Constr Build Mater. (2023); 406.
- [110] Gürsel E. ve Erenson C., Agrega Türü Ve Mekanik Özelliklerinin Yüksek Dayanımlı Betonların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi. Hazır Beton Kongresi İstanbul.2017.
- [111] Gleick P.H. and Howe CWJ.. Water in crisis: a guide to the world's fresh water resources. Climatic Change. (1995); 31(1): 119-122.
- [112] Falkenmark M. and Rockström J.. Balancing water for humans and nature: the new approach in ecohydrology. Earthscan. 2004.
- [113] Conshohocken West, PA.ASTM C109/C109M-20, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens) ASTM International, 2020.
- [114] Conshohocken West, ASTM C597, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, Am. Soc. Test. Mater. PA, USA. (2016) 1-4. <https://doi.org/10.1520/C0597-09>.

- [115] Hibbeler RC.. Mechanics of materials, Pearson Education India.2005.
- [116] Merioua A., Bezzar A. and Ghomari FJ.. Non-destructive electrical methods for measuring the physical characteristics of porous materials. Journal of Nondestructive Evaluation. (2015); 34(2): 13.
- [117] Yan X., Jiang L., Guo M., Chen Y., Zhu P., Jin W. and Zha JJ.. Using EDTA-2Na to inhibit sulfate attack in slag cement mortar under steam curing. Construction Building Materials. (2020); 265: 120324.
- [118] Yan X., Jiang L., Guo M., Chen Y., Zhu P., Jin W. and Zha JJ.. Using EDTA-2Na to inhibit sulfate attack in slag cement mortar under steam curing. Construction Building Materials. (2020); 265:120324.
- [119] Dener M., Altunhan U. and Benli A.. A green binder for cold weather applications: enhancing mechanical performance of alkali-activated slag through modulus, alkali dosage, and Portland cement substitution. Arch Civ Mech Eng. (2024); 24(3).
- [120] Rees CA., Provis JL., GC. Lukey GC. and van Deventer JSJ.. In situ ATR-FTIR study of the early stages of fly ash geopolymer gel formation. Langmuir. (2007); 23(17): 9076-9082.
- [121] M. Ben Haha M., Le Saout G., Winnefeld F. and Lothenbach B.. Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags. Cement and Concrete Research. (2011); 41(3): 301-310.
- [122] Angulo-Ramirez DE., de Gutierrez RM. and Puertas F.. Alkali-activated Portland blast-furnace slag cement: Mechanical properties and hydration. Construction and Building Materials. (2017); 140: 119-128.
- [123] García-Lodeiro I., Fernández-Jiménez A. and Palomo A.. Variation in hybrid cements over time. Alkaline activation of fly ash–portland cement blends. Cement Concrete Res. (2013); 52: 112-122.
- [124] Fernández-Jiménez A. and Puertas F.. Effect of activator mix on the hydration and strength behaviour of alkali-activated slag cements. Adv Cem Res. (2003); 15(3): 129-136.
- [125] Krizan D. and Zivanovic B.. Effects of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali–slag cements. Cement and concrete research. (2002); 32(8): 1181-1188.
- [126] Singh A., Bhadauria SS, Mudgal M. and Kushwah . Effect of alkali activator dosage on compressive and tensile strength of ground granulated blast furnace slag based geopolymer concrete. Canadian Journal of Civil Engineering. (2022); 49(1): 73-82.

- [127] Jiao ZZ., Wang Y., Zheng WZ. and Huang WX.. Effect of dosage of sodium carbonate on the strength and drying shrinkage of sodium hydroxide based alkali-activated slag paste. *Construction and Building Materials*. (2018); 179: 11-24.
- [128] Kim MJ., Ishida T. and Cho WJ.. Characteristics of micro structure and strength development of alkali activated GGBS-FNS hybrid cement. *Construction and Building Materials*. (2023); 408.
- [129] Nasr D., Pakshir AH. nad Ghayour H.. The influence of curing conditions and alkaline activator concentration on elevated temperature behavior of alkali activated slag (AAS) mortars. *Construction and Building Materials*. (2018); 190: 108-119.
- [130] Zivica V.. Effects of type and dosage of alkaline activator and temperature on the properties of alkali-activated slag mixtures. *Construction and Building Materials*. (2007); 21(7): 1463-1469.
- [131] Ye W., Feng T., Sun W. and Gómez-Zamorano LYJ.. Enhancing steel slag cement mortar performance under low-temperature curing through alkali activation: mechanisms and implications. *Frontiers in Materials*. (2025); 121576078.
- [132] Marvila MT., de Azevedo ARG. and Júnior JATL., CMFJJo.MR. Vieira. Technology, Activated alkali cement based on blast furnace slag: effect of curing type and concentration of Na₂O. *Journal of Materials Research*. (2023); 23: 4551-4565.
- [133] Ye W., Feng T., Sun W. and Gómez-Zamorano LYJ.. Enhancing steel slag cement mortar performance under low-temperature curing through alkali activation: mechanisms and implications. *Frontiers in Materials*. (2025); 12: 1576078.
- [134] Zhai Q. and Kurumisawa KJ.. Effect of accelerators on Ca (OH)₂ activated ground granulated blast-furnace slag at low curing temperature. *Cement concrete composites* (2021); 124104272.
- [135] Gruskovnjak A., Lothenbach B., Holzer L., Figi R. and Winnefeld F.. Hydration of alkali-activated slag: comparison with ordinary Portland cement. *Adv Cem Res*. (2006); 18(3): 119-128.
- [136] Bakharev T., Sanjayan JG. and Cheng YB.. Sulfate attack on alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*. (2002); 32(2): 211-216.
- [137] Komljenovic M., Bascarevic Z., Marjanovic N. and Nikolic V.. External sulfate attack on alkali-activated slag. *Construction and Building Materials*. (2013); 49: 31-39.

- [138] Ibrahim M., Salami BA., Khallaf Z., Bahraq AA. and Adewumi AA.. Evaluating long-term durability of nanosilica-enhanced alkali-activated concrete in sulfate environments towards sustainable concrete development. *Construction and Building Materials*. (2024); 438.
- [139] Aydin S. and Baradan B.. Sulfate resistance of alkali-activated slag and Portland cement based reactive powder concrete. *Journal of Building Engineering*. (2021); 43.
- [140] Gruyaert E., Van den Heede P., Maes M. and De Belie N.. Investigation of the influence of blast-furnace slag on the resistance of concrete against organic acid or sulphate attack by means of accelerated degradation tests. *Cement and Concrete Research*. (2012); 42(1): 173-185.
- [141] Beltrame NA., da Luz CA., Perardt M. and Hooton RD.. Alkali activated cement made from blast furnace slag generated by charcoal: Resistance to attack by sodium and magnesium sulfates. *Construction and Building Materials*. (2020); 238.
- [142] Al-Kutti W., Nasir M., Johari MAM., Islam AS., Manda AA. and Blaisi NIJ.. An overview and experimental study on hybrid binders containing date palm ash, fly ash, OPC and activator composites. *Construction Building Materials*. (2018); 159: 567-577.
- [143] Rojas-Martínez A., González-López J., Guerra-Cossío M. and Hernández-Carrillo G.. Sulphate-based activation of a binary and ternary hybrid cement with portland cement and different pozzolans. *Constr Build Mater*. (2024); 421: 135683.
- [144] Turkoglu M., Bayraktar O.Y., Benli A. and Kaplan G.. Effect of cement clinker type, curing regime and activator dosage on the performance of one-part alkali-activated hybrid slag/clinker composites. *J Build Eng*. (2023); 68: 106164.
- [145] Chindaprasirt P., Sriopas B., Phosri P., Yoddumrong P., Anantakarn K. and Kroehong W.. Hybrid high calcium fly ash alkali-activated repair material for concrete exposed to sulfate environment. *Journal of Building Engineering*. (2022); 45.
- [146] Mohapatra AK. and Pradhan B.. Hybrid alkali activated cements (HAACs) system: A state-of-the-art review on fresh, mechanical, and durability behaviour. *Construction and Building Materials*. (2022); 361.