

T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



**ATIK BETON ÇAMURU İÇERİKLİ TEK BİLEŞENLİ
ALKALİLERLE AKTİVE EDİLEN MALZEMELERİN
FİZİKSEL, MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ**

BERK DEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOÇ. DR. OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

NİSAN - 2025

KASTAMONU

TEZ ONAYI

Berk DEMİR tarafından hazırlanan “ATIK BETON ÇAMURU İÇERİKLİ TEK BİLEŞENLİ ALKALİLERLE AKTİVE EDİLEN MALZEMELERİN FİZİKSEL, MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 17.04.2025 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Doç. Dr. Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR Kastamonu Üniversitesi
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Gökhan KAPLAN Atatürk Üniversitesi
Jüri Üyesi	Dr. Öğr.Üyesi Mehmet Uğur YILMAZOĞLU Kastamonu Üniversitesi

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü	Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ
----------------	-----------------------	-------

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Berk DEMİR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK BETON ÇAMURU İÇERİKLİ TEK BİLEŞENLİ ALKALİLERLE AKTİVE EDİLEN MALZEMELERİN FİZİKSEL, MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ

BERK DEMİR

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN:DOÇ. DR. OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

Beton üretiminin bir yan ürünü olan beton çamuru, uygunsuz bertarafı nedeniyle önemli çevresel zorluklar ortaya koymaktadır. Bu çalışma, alkali aktiveli kompozitlerde (AAC'ler) öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GBFK) için kısmi ikame olarak öğütülmemiş beton çamuru atığı (UCS) ve öğütülmüş beton çamuru atığının (GCS) potansiyelini araştırmaktadır. Akıcılık, basınç ve eğilme dayanımı, görünür gözeneklilik, su emilimi, sorptivite ve sülfat maruziyeti, donma-çözülme döngüleri, yüksek sıcaklıklar ve asit saldırısı altında dayanıklılık testleri dahil olmak üzere kapsamlı bir deneysel program yürütülmüştür. UCS ikamesi akışkanlığı önemli ölçüde azaltırken (%30'da -%38,53'e kadar), GCS daha ince parçacıkları nedeniyle daha iyi işlenebilirliği koruyarak minimal bir etkiye sahipti (%30'da -%4,59). 90 günde, %5 ve %10'luk UCS değişimi basınç dayanımını %15,5 ve %9,0 oranında artırırken, %20 ve %30'luk UCS %8,2 ve %13,7'lik dayanım azalmasına yol açtı. Buna karşılık, tüm GCS karışımları referansı (%100 GBFS) geride bırakarak, sırasıyla %5; %10; %20 ve %30'luk değiştirme seviyelerinde %26,2; %21,5; %5,6 ve %5,2'lik dayanım kazanımları elde etti. 90 günde, %5; %10 ve %20'lik UCS değişimi eğilme dayanımını %33,2; %24,2 ve %2,5 oranında artırırken, %30'luk UCS %6,9'luk bir azalmaya yol açtı. Tüm GCS karışımları, değiştirme seviyesine bağlı olarak %6,5 ile %46,8 arasında değişen dayanım kazanımları gösterdi. AAC karışımlarındaki basınç dayanımı kaybı 800°C'de %69,1 ile %77,7 arasında değişmiştir. Bu, yüksek sıcaklıklara sürekli maruz kalma nedeniyle tüm karışımların sergilediği önemli bir termal bozulmayı göstermektedir. Test edilen karışımlardan, GBFS'nin %20 GCS ikamesini içeren karışım en düşük dayanım kaybını gösterirken, %30 UCS ikamesi en yüksek puanı almıştır. %5 ve %10 GCS karışımları referanstan (%34,3) daha düşük dayanım kaybı göstermiştir. Ancak, daha yüksek GCS seviyelerinde (%20 ve %30); dayanım kaybı referansı aşmış ve %30 GCS karışımı en yüksek bozulmayı (%53,6) göstermiştir. Benzer şekilde, %5 UCS karışımı en düşük dayanım kaybına sahipti. En ciddi basınç dayanımı kaybı (%35,3); magnezyum sülfat maruziyetinden sonra GCS30'da meydana gelirken, UCS30 için en yüksek kayıp H₂SO₄'ye maruziyetten sonra gözlenmiştir. UCS ve GCS'nin eklenmesi hem H₂SO₄ hem de MgSO₄ ortamlarında mukavemet kaybını artırdı.

ANAHTAR KELİMELER:Alkali Aktiveli Kompozitler, Beton Çamuru Atığı, Dayanıklılık, Mikroyapısal Analiz, Mekanik Özellikler.

Nisan 2025, 87 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

PHYSICAL, MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF MATERIALS ACTIVATED WITH SINGLE COMPONENT ALKALI CONTAINING WASTE CONCRETE SLUDGE

BERK DEMİR

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

Concrete sludge waste, a by-product of concrete production, poses significant environmental challenges due to its improper disposal. This study investigates the potential of unground concrete sludge waste (UCS) and ground concrete sludge waste (GCS) as partial replacements for ground granulated blast furnace slag (GBFK) in alkali-activated composites (AACs). An extensive experimental program was conducted including tests on flowability, compressive and flexural strength, apparent porosity, water absorption, sorptivity and durability under sulphate exposure, freeze-thaw cycles, elevated temperatures and acid attack. UCS substitution significantly reduced the flowability (up to -38.53% at 30%), while GCS had minimal impact (-4.59% at 30%), maintaining better workability due to its finer particles. At 90 days; 5% and 10% UCS modification increased compressive strength by 15.5% and 9.0%; while 20% and 30% UCS resulted in 8.2% and 13.7% strength reduction. In contrast, all GCS mixtures outperformed the reference (100% GBFS) with strength gains of 26.2%; 21.5%; 5.6% and 5.2% at 5%; 10%; 20% and 30% modification levels, respectively. At 90 days; 5%; 10% and 20% UCS modification increased flexural strength by 33.2%; 24.2% and 2.5%; while 30% UCS resulted in a 6.9% reduction. All GCS mixtures showed strength gains ranging from 6.5% to 46.8%; depending on the modification level. The compressive strength loss in AAC mixtures ranged from 69.1% to 77.7% at 800°C. This indicates a significant thermal degradation exhibited by all mixtures due to continuous exposure to high temperatures. Of the tested mixtures, the mixture containing 20% GCS replacement of GBFS showed the lowest strength loss, while 30% UCS replacement scored the highest. 5% and 10% GCS mixtures showed lower strength loss than the reference (34.3%). However, at higher GCS levels (20% and 30%), the strength loss exceeded the reference and the 30% GCS mixture showed the highest degradation (53.6%). Similarly, the 5% UCS mixture had the lowest strength loss. The most severe compressive strength loss (35.3%) occurred in GCS30 after magnesium sulfate exposure, while the highest loss for UCS30 was observed after H₂SO₄ exposure. The addition of UCS and GCS increased the strength loss in both H₂SO₄ and MgSO₄ environments.

KEYWORDS: Alkali Activated Composites, Concrete Mud Waste, Durability, Microstructural Analysis, Mechanical Properties.

April 2025, 87 Page

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının gerekleőtirilmesinde bana rehberlik eden ve destek veren sayın hocam Doç. Dr. Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR'a ve yine desteklerinden ötürü Doç. Dr. Ahmet BENLİ hocamıza teşekkür ederim. Ayrıca tez çalıőmam sırasında desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen aileme en içten teőekkürlerimi sunarım. Tez jürime katılan saygıdeğer hocalarım ve Doç. Dr. Gökhan KAPLAN'a ve Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Uğur YILMAZOğLU'na teşekkür ederim. Yapmıő olduğum tez çalıőmamın bilim dünyasına katkıda bulunmasını temenni ederim.

BERK DEMİR

Kastamonu, 2025

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Araştırma Açığı.....	4
1.2 Araştırmanın Önemi.....	5
2. LİTERATÜR TARAMASI	6
2.1 Atık Beton Çamuru	6
3. MATERYAL METOD	7
3.1 Materyal	7
3.2 Metod	10
3.2.1 Karışım Oranları	10
3.2.2 Döküm ve Kütleme Süreci	11
3.2.3 Testler	12
4. TARTIŞMA	14
4.1 Taze Özellikler	14
4.2 Basınç Dayanımı	17
4.3 Eğilme Dayanımı	21
4.3.1 Kuru Birim Ağırlık	23
4.3.2 Görünür Gözeneklilik ve Su Emme	26
4.3.3 Su Emme Katsayısı (Sorptivite)	28
4.4 28 Günlük Kür Süresi Sonrası Mikroyapısal Değişimler	31
4.5 Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı	36
4.5.1 Basınç Dayanımı	36
4.5.2 Ağırlık Kaybı	38
4.5.3 Görsel Görünüm	41
4.5.4 Mikro Yapısal Değişimler (800°C Sonrası)	42
4.6 Donma Çözünme	46
4.6.1 Basınç Dayanımı	46
4.6.2 Donma-Çözünme Maruziyeti Sonrası Ağırlık Değişimi	48
4.6.3 Görsel Görünüm	50
4.6.4 100 D-Ç Döngüsünden Sonra Mikroyapısal Değişiklikler	52
4.7 Asidik ve Magnezyum Sülfat (MgSO ₄) Etkisi.....	56
4.7.1 Kompresif Dayanım	56
4.7.2 Ağırlık Kaybı	61
4.7.3 Görsel Durum	65
4.7.4 H ₂ SO ₄ ve MgSO ₄ Sonrası Mikro Yapısal Değişiklikler	67
4.7.4.1 H ₂ SO ₄ sonrası mikro yapısal değişiklikler	67

4.7.4.2 MgSO ₄ sonrası mikro yapısal değişiklikler.....	69
5. SONUÇ.....	74
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ.....	87



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1 GBFS, UCS ve GCS'nin parçacık boyutu	8
Şekil 3.2 GBFS ve CS'nin XRD görüntüleri	9
Şekil 3.3 CS'nin SEM görüntüleri	9
Şekil 3.4 Silika kumunun parçacık boyut dağılımı	10
Şekil 3.5 Çökeltme havuzundan elde edilen beton çamuru	10
Şekil 3.6 Deneysel çalışmada kullanılan malzemeler	10
Şekil 4.1 Akış çapları ve taze birim ağırlık grafiği	17
Şekil 4.2 7; 28 ve 91 gün sonraki basınç dayanımları.....	20
Şekil 4.3 7; 28 ve 91 günlük eğilme dayanımları	23
Şekil 4.4 Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı	23
Şekil 4.5 28 günlük fırında kurutma yoğunluğu	25
Şekil 4.6 Basınç dayanımı ve kuru yoğunluk.....	26
Şekil 4.7 Gözeneklilik ve su emilimi	28
Şekil 4.8 Basınç dayanımı ve gözeneklilik arasındaki ilişki.....	28
Şekil 4.9 Sorptivite.....	30
Şekil 4.10 Sorptivite arasındaki ilişki	31
Şekil 4.11 28 günlük kür süresi sonrası Referans karışımın (100% GBFS) SEM görüntüsü.....	32
Şekil 4.12 28 günlük kür süresi sonrası UCS30 içeren karışımın SEM görüntüsü.....	34
Şekil 4.13 28 günlük kür süresi sonrası GCS30 içeren karışımın SEM görüntüsü.....	35
Şekil 4.14 Basınç dayanımı.....	38
Şekil 4.15 Yüksek sıcaklığa maruz kalma durumunda dayanım değişimleri	38
Şekil 4.16 Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası ağırlık kaybı	41
Şekil 4.17 Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası ağırlık kaybı	41
Şekil 4.18 800°C sonrası görsel görünüm.....	42
Şekil 4.19 Yüksek sıcaklığa (800°C) maruz kalan Referans numunelerin mikro yapısı	43
Şekil 4.20 Yüksek sıcaklığa (800°C) maruz kalan UCS30 numunelerin mikro yapısı	44
Şekil 4.21 Yüksek sıcaklığa (800°C) maruz kalan GCS30 numunelerin mikro yapısı	45
Şekil 4.22 Basınç dayanımı.....	47
Şekil 4.23 15 ve 30 D-Ç döngüsüne maruz kalma sonrası dayanım azalması.....	48
Şekil 4.24 Ağırlık kaybı	50
Şekil 4.25 Dayanım ve ağırlık kaybı arasındaki ilişki D-Ç döngülerinden sonra.....	50
Şekil 4.26 50 donma-çözülme (D-Ç) döngüsünden sonra görsel görünüm	51
Şekil 4.27 100 donma-çözülme (D-Ç) döngüsünden sonra görsel görünüm	52
Şekil 4.28 100 donma-çözülme (D-Ç) döngüsünden sonra referans karışımının (100% GBFS) SEM görüntüsü.....	53
Şekil 4.29 100 donma-çözülme (D-Ç) döngüsünden sonra %30 UCS içeren AAC karışımının SEM görüntüsü.....	54

Şekil 4.30 100 donma-çözülme (D-Ç) döngüsünden sonra %30 GCS içeren AAC karışımının SEM görüntüsü	55
Şekil 4.31 Basınç dayanımı	58
Şekil 4.32 H ₂ SO ₄ 'ye maruz kalma sonucu dayanım kaybı	58
Şekil 4.33 Basınç dayanımı	60
Şekil 4.34 MgSO ₄ 'ye maruz kalma sonrası dayanım kaybı	60
Şekil 4.35 H ₂ SO ₄ sonrası ağırlık kaybı	65
Şekil 4.36 MgSO ₄ sonrası ağırlık kaybı	65
Şekil 4.37 H ₂ SO ₄ maruziyeti sonrası görsel durum	66
Şekil 4.38 MgSO ₄ maruziyeti sonrası görsel durum	66
Şekil 4.39 Referans Numunelerin H ₂ SO ₄ 'ya maruz kaldıktan sonra mikro yapısı	67
Şekil 4.40 UCS30 numunelerin H ₂ SO ₄ 'ya maruz kaldıktan sonra mikro yapısı	68
Şekil 4.41 GCS30 numunelerin H ₂ SO ₄ 'ya maruz kaldıktan sonra mikro yapısı	69
Şekil 4.42 Referans numunelerin mikro yapısı MgSO ₄	70
Şekil 4.43 UCS30 numunelerin mikro yapısı MgSO ₄	72
Şekil 4.44 GCS30 Numunelerin mikro yapısı MgSO ₄	73

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1 CS ve GBFS'nin kimyasal bileşimleri.....	8
Tablo 3.2 Karışım oranları (kg/m ³)	11



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

CaO	: Kalsiyum Oksit
C-A-S-H	: Kalsiyum Alimosilikat Hidrat
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrat
H₂SO₄	: Sülfirik Asit
MgSO₄	: Magnezyum Sülfat

Kısaltmalar

AAC	: Alkali Aktiviteli Kompozitler
CS	: Beton Çamuru
GBFS	: Granüle Yüksek Fırın Cürufu
GCS	: Öğütülmüş Beton Çamuru
UCS	: Öğütülmemiş Beton Çamuru

1. GİRİŞ

İnşaat sektörü, küresel karbon emisyonlarına ve kaynak tüketimine en büyük katkıda bulunanlardan biridir. Portland çimento üretimi tek başına, klinker üretiminin yüksek enerji talepleri ve kireç taşının karbonsuzlaştırılması nedeniyle dünya çapındaki CO₂ emisyonlarının yaklaşık %8'ini oluşturmaktadır (Benli, 2024; Zhu, vd., 2025). Sürdürülebilirlik endişeleri arttıkça, daha düşük çevresel etkiye sahip alternatif bağlayıcı sistemlerine olan talep artmıştır. Alkali aktiveli kompozitler (AAC'ler), birincil bağlayıcı olarak endüstriyel yan ürünleri kullanma, klinker üretimine olan bağımlılığı azaltma ve sera gazı emisyonlarını düşürme kabiliyetleri nedeniyle geleneksel çimento esaslı malzemelere sürdürülebilir bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır (Turkoğlu, vd., 2023; Zhang, vd., 2025). Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GBFS), yüksek puzolanik aktivitesi ve alkali çözeltilerle aktive edildiğinde kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum alüminosilikat hidrat (C-A-S-H) fazları oluşturma kabiliyeti nedeniyle alkali aktiveli sistemlerde en yaygın kullanılan öncüllerden biridir (Bayraktar, vd., 2024; Yang, vd., 2025). Ancak, GBFS'nin bulunabilirliği ve maliyeti bölgesel olarak değişmekte olup, mekanik ve dayanıklılık performansından önemli ölçüde ödün vermeden GBFS'nin kısmen yerini alabilecek alternatif tamamlayıcı malzemeler üzerine araştırma yapılmasını teşvik etmektedir (Huseien, vd., 2019). Beton, modern kentsel inşaatlarda yaygın olarak kullanılmaktadır ve altyapı projelerindeki önemi, yılda 4,3 milyar tonluk tahmini küresel tüketimiyle vurgulanmaktadır (Marvila, vd., 2022; Wang, vd., 2024). Ancak beton üretimi önemli miktarda karbondioksit emisyonu ve beton çamuru atığı (CS) üretmektedir (He, vd., 2020). CS'nin birincil nedenleri arasında karışım değişiklikleri, lojistik kayıplar, aşırı sipariş ve teknik özelliklere uyulmaması yer almaktadır (Xuan, vd., 2018). CS'nin çevresel etkisi, betona olan talebin artmasıyla paralel olarak artmaktadır. Dünya çapında yıllık yeni beton atığı üretimi 165 ila 330 milyon ton arasında değişmektedir (Iizuka, vd., 2017). Avrupa'da taze beton atığı toplam üretimin yaklaşık %1,0 ila %4,0'ını oluştururken, Hong Kong'da bu rakam yaklaşık %1,5'tir (Kazaz ve Ulubeyli, 2016; Tam, 2008). Ek olarak, CS'nin yüksek pH değeri nedeniyle, mevcut atık yönetim stratejileri yetersizdir ve geleneksel geri dönüşüm yöntemlerini etkisiz hale getirir. Sonuç olarak, karıştırma istasyonlarında veya inşaat sahalarında

büyük miktarlarda atığın uygunsuz şekilde işlenmesi çevresel yükü önemli ölçüde artırır ve sonuçta çöp sahalarına atılmasına yol açar (Sealey, vd., 2001). İnşaat sektörünün sürekli büyümesi göz önüne alındığında, beton çamuru atığının verimli bir şekilde geri dönüştürülmesi çevresel sürdürülebilirlik için kritik bir gerekliliktir. CS'yi etkili bir şekilde yönetmek ve kullanmak için kapsamlı araştırmalar yürütülmüş ve potansiyel uygulamaları araştırılmıştır (Xuan, vd., 2016). CS, öncelikle kalsiyum hidroksit ve kısmen tepkimeye girmemiş Sıradan Portland Çimentosu (OPC) parçacıklarından oluşur (Liu, vd., 2023; Xuan, vd., 2016). CS'nin beton üretiminde yaygın bir şekilde dahil edilmesi, ağır metallerin sızmasını önemli ölçüde azaltır (Audo, vd., 2016). Bununla birlikte, nispeten iri parçacıkların varlığı nedeniyle OPC'deki maksimum ikame oranı %2 ile sınırlıdır ve yüksek alkali ortamlarda uzun süreli depolama sonucunda reaktivitesi düşük kalır (He, vd., 2020). Değiştirme oranını artırmak ve geri dönüşüm verimliliğini iyileştirmek için, bazı çalışmalar %15 değiştirme oranında basınç dayanımını artırdığı kanıtlanmış bir teknik olan bilyalı öğütme kullanmıştır (Ren, vd., 2022).

Bununla birlikte, öğütlemeyle ilişkili yüksek enerji tüketimi ve mevcut geri dönüşüm stratejilerinin OPC'ye olan sürekli bağımlılığı, bu işlemler sırasında oluşan karbondioksit emisyonları sorununu ele almada başarısız olmaktadır.

CS'nin alkalinitesiyle birlikte yüksek kalsiyum (Ca) ve silisyum (Si) içeriği, önceki çalışmalarla kanıtlandığı gibi, onu alkali aktive edilmiş sentezde umut verici bir alternatif bağlayıcı yapar (Chen, vd., 2022; Oh, vd., 2021; Ye, vd., 2022). Canfield ve diğerleri, kalsiyum içeriğindeki artışın uçucu kül (FA) bazlı jeopolimerlerde C-A-S-H jelinin oluşumunu kolaylaştırdığını ve böylece bunların kararlılığını ve mekanik dayanımını iyileştirdiğini öne sürmektedir (Canfield, vd., 2014). Dahası, daha yüksek bir Si/Al molar oranı, gelişmiş mekanik performansa katkıda bulunur (Liu, vd., 2023; Ulugöl, vd., 2021).

CS ve FA kombinasyonu jeopolimer üretimi için yaygın olarak incelenmiş olsa da, GBFS ile kullanımıyla ilgili araştırmalar sınırlı kalmaya devam etmektedir ve bu karışım için optimum alkali koşullar henüz belirlenmemiştir. Çalışmalar, yükseltilmiş kürlenmenin hem CS hem de FA bazlı jeopolimerlerin mekanik özelliklerini

geliştirdiğini doğrulasa da (Chen, vd., 2022; Junaid, vd., 2014; Oh, vd., 2021; Tang, vd., 2020; Ye, vd., 2022), CS'yi GBFS ile birleştiren jeopolimerler üzerindeki etkisi hala belirsizdir. Bu nedenle, CS'yi AAC formülasyonlarına dahil etmek, çevresel etkiyi en aza indirirken atık kullanımını teşvik ederek dairesel ekonomi ilkeleriyle uyumludur.

CS, öncelikle alkali aktivasyonu için gerekli olan kalsiyum oksit (CaO), silika (SiO₂) ve alüminadan (Al₂O₃) oluşur (Wu, vd., 2022). Ancak, AAC sistemlerindeki reaktivitesi ve performansı büyük ölçüde parçacık inceliğine ve işleme koşullarına bağlıdır (Liu, vd., 2023). İşlenmemiş formunda, öğütülmemiş beton çamuru (UCS), daha kaba bir parçacık boyutu dağılımına, daha düşük yüzey alanına ve azaltılmış puzolanik reaktiviteye sahiptir.

Buna karşılık, mekanik öğütme işlemine tabi tutulan öğütülmüş beton çamuru (GCS), geliştirilmiş incelik, geliştirilmiş yüzey alanı ve artan reaktivite sergiler ve bu da onu AAC'lerde kısmi GBFS ikamesi olarak kullanılmaya daha uygun hale getirir (Zhang, vd., 2022; Zhao, vd., 2020).

CS'yi AAC'lere dahil etmenin potansiyel faydalarına rağmen, taze, mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkileri yeterince araştırılmamıştır. GBFS'nin UCS veya GCS ile değiştirilmesi, parçacık morfolojisi ve su emme özelliklerindeki farklılıklar nedeniyle işlenebilirliği, priz süresini ve akışkanlığı etkileyebilir. Ayrıca, CS'nin basınç ve eğilme dayanımı üzerindeki etkisi, yapısal performansını değerlendirmek için çok önemlidir. Önceki çalışmalar, orta düzeyde CS ikamesinin (\leq %10) gelişmiş parçacık paketleme ve çekirdeklenme etkileri nedeniyle mekanik özellikleri artırabileceğini, aşırı ikame düzeylerinin (\geq %20) ise artan gözeneklilik ve azalan jeopolimerizasyon verimliliği nedeniyle dayanım düşüşlerine yol açabileceğini öne sürmüştür (Keppert, vd., 2021; Zhang, vd., 2022). Ek olarak, AAC'lerde UCS ve GCS kullanımının çevresel ve ekonomik etkileri de dikkate alınmalıdır. CS'nin tamamlayıcı bir malzeme olarak kullanılması, yalnızca depolama alanı atıklarını ve bertarafıyla ilişkili çevresel tehlikeleri azaltmakla kalmaz, aynı zamanda GBFS'ye uygun maliyetli bir alternatif de sağlar. CS gibi endüstriyel yan ürünler, bakır hammaddelere olan ihtiyacı azaltarak sürdürülebilir inşaat uygulamalarına katkıda

bulunur ve böylece AAC'lerin somut karbon ayak izini düşürür. Ancak, pratik uygulama, ekonomik uygulanabilirliği korurken AAC'lerin performansının geleneksel standartları karşılamasını veya aşmasını sağlamak için karışım tasarımlarının dikkatli bir şekilde optimize edilmesini gerektirir.

Bu çalışma, GBFS'nin UCS ve GCS ile değiştirilmesinin alkali aktive edilmiş kompozitlerin taze özellikleri, mekanik davranışı ve dayanıklılığı üzerindeki etkilerini araştırmaktadır. İşlenebilirliği, basınç ve eğilme dayanımı gelişimini, mikro yapısal özellikleri ve çevresel bozulmaya karşı direnci değerlendirmek için kapsamlı bir deneysel program yürütülmüştür. Araştırma, UCS ve GCS'nin AAC karışımlarının taze özellikleri ve işlenebilirliği üzerindeki etkisini değerlendirmeye, farklı değiştirme seviyelerinde AAC'lerin basınç ve eğilme dayanımı gelişimini değerlendirmeye ve SEM ve XRD tekniklerini kullanarak UCS ve GCS katılımıyla indüklenen mikro yapısal değişiklikleri analiz etmeye odaklanmaktadır. Ayrıca, çalışma, AAC'lerin sülfat saldırısı, asit saldırısı, donma-çözülme döngüleri ve yüksek sıcaklık maruziyeti altındaki dayanıklılık performansını incelerken, AAC uygulamalarında sürdürülebilirlik ve performansı dengelemek için UCS ve GCS'nin optimum ikame seviyelerini belirlemektedir. UCS ve GCS'nin AAC üretimine dahil edilmesinin ekonomik ve çevresel uygulanabilirliği de sürdürülebilir bir yaklaşımın parçası olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmanın bulguları, aşırı koşullarda performans tutarlılığını sağlarken alternatif bağlayıcı bileşimlerini optimize ederek sürdürülebilir AAC gelişiminin ilerlemesine katkıda bulunmaktadır. UCS ve GCS'yi AAC formülasyonlarına entegre ederek, bu araştırma atık değerlendirmesine ilişkin değerli bilgiler sağlamakta ve çevresel etkisi azaltılmış çevre dostu inşaat malzemelerini teşvik etmektedir. Sonuçlar, endüstriyel atıkların değerlendirilmesi için daha verimli stratejilerin geliştirilmesine, AAC'lerin mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin artırılmasına ve daha sürdürülebilir inşaat malzemelerine geçişin desteklenmesine yardımcı olacaktır.

1.1 Araştırma Açığı

AAC'lere olan ilgi artmasına rağmen, UCS ve GCS'nin sürdürülebilir bağlayıcılar olarak potansiyeli yeterince araştırılmamıştır. Mevcut çalışmalar, bu malzemelerin

reaktivitesi, mikroyapısal evrimi ve sülfat saldırısı, donma-çözülme döngüleri ve yüksek sıcaklık gibi zorlu koşullar altındaki uzun vadeli dayanıklılığı konusunda kapsamlı bir anlayış sunmamaktadır. Parçacık inceliğinin jeopolimerizasyon verimliliği, mekanik performans ve gözenek yapısındaki değişimler üzerindeki etkisi de yeterince incelenmemiştir. Ayrıca, UCS ve GCS'nin AAC'lerde kullanımının ekonomik ve çevresel fizibilitesi daha fazla değerlendirme gerektirmektedir. Bu çalışma, UCS ve GCS'nin işlenebilirlik, dayanım, dayanıklılık ve mikroyapısal gelişim üzerindeki etkilerini sistematik olarak değerlendirerek, sürdürülebilir ve yüksek performanslı AAC'lerin geliştirilmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

1.2 Araştırmanın Önemi

Bu çalışma, UCS ve GCS'nin alternatif bağlayıcılar olarak değerlendirilmesi yoluyla sürdürülebilir AAC'lerin gelişimine katkı sağlamakta, atık değerlemesini teşvik etmekte ve bakir malzemelere olan bağımlılığı azaltmaktadır. GBFS'nin kısmen değiştirilmesiyle, bu araştırma AAC'lerin sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi potansiyelini artırırken, mekanik performans, dayanıklılık ve mikroyapısal evrim gibi önemli konuları ele almaktadır. Çalışmanın ana odak noktalarından biri, UCS ve GCS bazlı AAC'lerin donma-çözülme döngüleri, sülfat saldırısı, asit saldırısı ve yüksek sıcaklık gibi agresif çevresel koşullara karşı direncini değerlendirmektir. Ayrıca, çalışma jeopolimerizasyon verimliliği, reaksiyon kinetiği ve gözenek yapısı gelişimi hakkında değerli bilgiler sunarak, beton çamurunun çevre dostu bir inşaat malzemesi olarak AAC'lere dahil edilmesinin endüstriyel uygulanabilirliğini desteklemektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Atık Beton Çamuru

Ülke ekonomisini etkileyen inşaat sektörünün en önemli kolu olan hazır beton, yapılacak yapının şartnamelere uymasında yani kalitesinde ön plana çıkan bir malzemedir. Araştırmaların çoğu betonun farklı alanlarda kullanılması ve kalitesine yönelik olsa da, üretimin artması sonucu oluşan atıkların geri dönüşümü için yapılan yaptırımlar araştırmaları atıkların geri dönüşümü veya bertarafı üzerine yoğunlaştırmıştır.

Atık beton çamuru hazır beton tesislerinin bir atığıdır. Bu atıklar tesiste oluşturulmuş havuzlarda toplanır. Atık beton çamuru; beton üretilen tesisin bulunduğu sahadaki tüm atıklardan oluşmaktadır. Sahaya üretim esnasında dökülen beton, katkı, agrega ve beton dökümü için kullanılan araçların döküm sonrası betondan arındırılmak için temizlenmesinden oluşan atık beton çamurunun bertarafı oldukça maliyetlidir. Bu atığın geri dönüşümüyle kazanılabilmesi ülke ekonomisi ve çevre temizliğine olumlu katkılar sunacaktır.

Yapılan literatür çalışmasında, transmikser dolum esnasında oluşan kaçakların, yanlış üretilen betonların, müşteriler tarafınca iadesi gerçekleştirilen betonun ve beton pompası ve transmikserlerin temizliği esnasında açığa çıkan atık betonların sayısal verilerine ulaşılamamıştır.

3. MATERYAL METOD

3.1 Materyal

Bu çalışmada kullanılan hammaddeler arasında beton çamuru (CS) ve granüle yüksek fırın cürufu (GBFS) bulunmaktadır. CS ve GBFS'nin kimyasal bileşimleri Tablo 1'de gösterilmiş olup, alkali aktive kompozitlerin özelliklerini etkileyen temel oksitleri vurgulamaktadır. CS; %48,6 oranında kalsiyum oksit (CaO) içermekte olup, bu oran GBFS'ye (%39,5) kıyasla daha yüksektir ve kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) oluşumunu teşvik ederek erken dayanım gelişimine katkı sağlamaktadır. Ancak, CS'nin silika (SiO₂) ve alümina (Al₂O₃) içerikleri sırasıyla %11,9 ve %2,9 olup, GBFS'ye kıyasla (%36,6 SiO₂ ve %8,1 Al₂O₃) daha düşüktür; bu da uzun vadeli dayanım açısından kritik olan aluminosilikat fazlarının oluşumunu sınırlayabilir.

CS'nin ateş kaybı (LOI) %30,5 gibi yüksek bir değere sahiptir, bu da içerisinde reaktif olmayan veya uçucu bileşenlerin bulunduğunu ve matris gözenekliliğini artırabileceğini göstermektedir. GBFS'nin özgül ağırlığı 2,86 g/cm³ iken, CS'nin özgül ağırlığı 2,78 g/cm³'tür. Öğütülmemiş beton çamuru, bir çökeltme havuzundan toplanmış, 105°C'de kurutulmuş ve 125 mikron elek ile elenmiştir. Öğütülmüş beton çamuru ise 105°C'de kurutulmuş, 250 mikron elek ile elenmiş ve bilyalı değirmende 60 dakika boyunca öğütülerek inceliği ve reaktivitesi artırılmıştır.

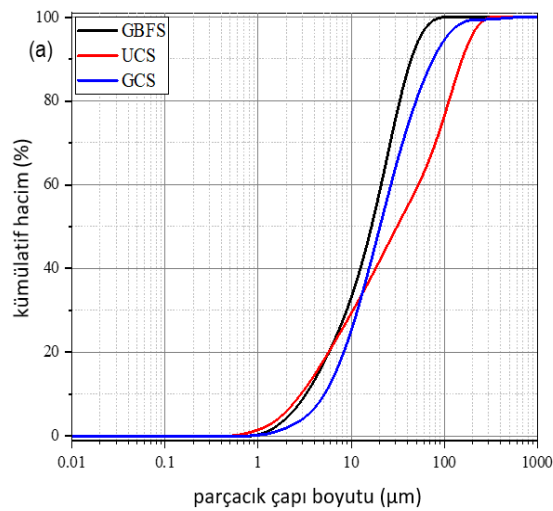
Bu hammaddeler kullanılarak alkali aktive kompozitler hazırlanmış ve erken dayanım gelişimini teşvik etmek amacıyla 85°C'de 24 saat boyunca kürlenmiştir. Şekil 3.1, GBFS, öğütülmemiş beton çamuru (UCS) ve öğütülmüş beton çamurunun (GCS) detaylı karakterizasyonunu sunmaktadır. Parçacık boyutu dağılımı, GBFS'nin daha ince parçacıklara sahip olduğunu ve alkali aktive sistemde daha iyi reaktivite sağladığını göstermektedir. Buna karşılık, UCS daha geniş ve iri bir parçacık boyutu dağılımına sahiptir, bu da düşük reaktivite ve artan gözenekliliğe yol açabilir (Şekil 3.1). Öğütme işlemi sonrası GCS, önemli ölçüde küçülmüş parçacık boyutuna sahip olup, yüzey alanı artmış ve alkali aktivatörle etkileşimi iyileştirilmiştir.

X-ışını difraksiyonu (XRD) analizleri, GBFS ve CS'deki kristal ve amorf fazları ortaya koymaktadır. GBFS ağırlıklı olarak amorf cam fazlarından oluşmakta olup, alkali aktivasyon altında yüksek puzolanik reaktivite sağlamaktadır. Buna karşılık, CS; portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ve kalsit (CaCO_3) gibi kristal fazlar içermektedir, bu da önceki beton kullanımından kaynaklanan hidratasyon ürünlerinin varlığını göstermektedir. CS'nin daha yüksek kristal içeriği, özellikle alkali aktive sistemlerde reaktivitesini azaltabilir, ancak malzeme ince öğütüldüğünde (GCS gibi) bu etkiler azaltılabilir (Şekil 3.2).

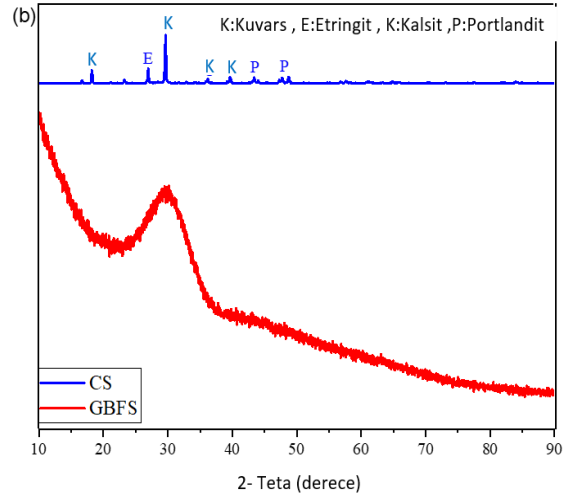
Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri, CS'nin yüksek oranda gözenekli ve düzensiz bir mikro yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır; özellikle UCS büyük, köşeli parçacıklar içermekte olup, bu durum dolgu verimliliğini düşürebilir ve AAC karışımlarında boşluk oranının artmasına, dolayısıyla mekanik dayanımın azalmasına neden olabilir. Ancak, öğütme işlemi sonrası (GCS), parçacıklar daha ince ve küresel hale gelerek daha yoğun ve bütünleşmiş bir matris oluşumuna katkı sağlamaktadır (Şekil 3.3). UCS'nin gözenekli yapısı ayrıca daha fazla alkali aktivatör absorbe edebileceğini göstermekte olup, bu da işlenebilirlik ve priz süresi üzerinde etkili olabilir.

Tablo 3.1 CS ve GBFS'nin kimyasal bileşimleri

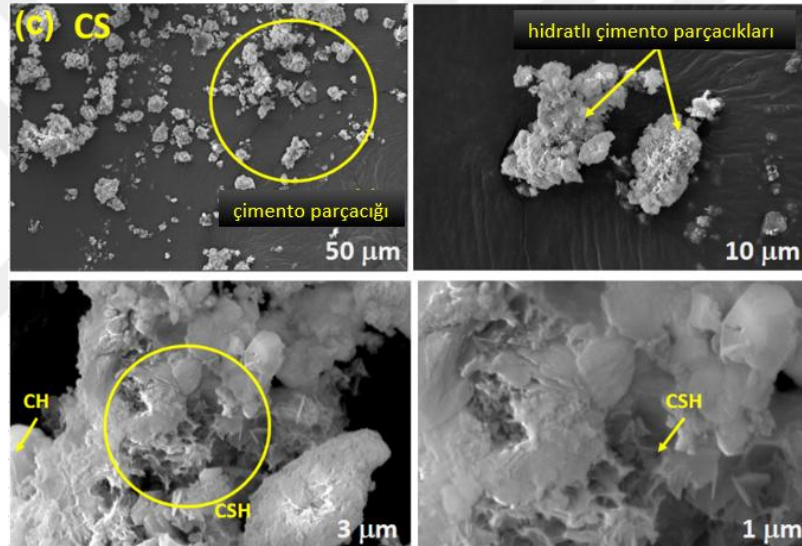
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	SO ₃	LOI
GBFS	39,5	36,6	8,1	1,4	0,2	0,5	12,9	0,2	0,5
CS	48,6	11,9	2,9	2,1	0,2	0,1	2,5	1,1	30,5



Şekil 3.1 GBFS, UCS ve GCS'nin parçacık boyutu

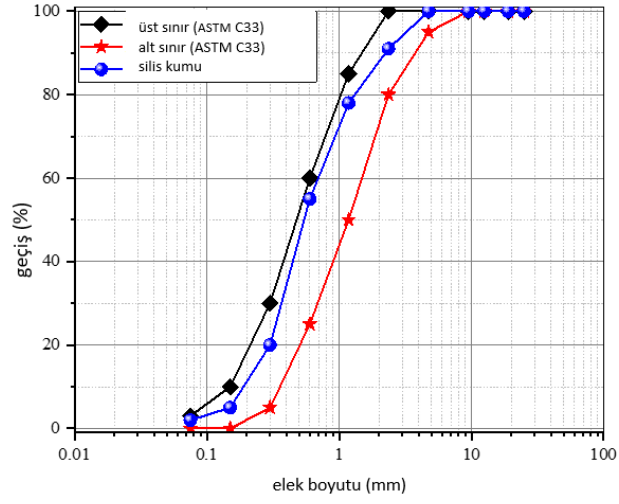


Şekil 3.2 GBFS ve CS'nin XRD görüntüleri



Şekil 3.3 CS'nin SEM görüntüleri

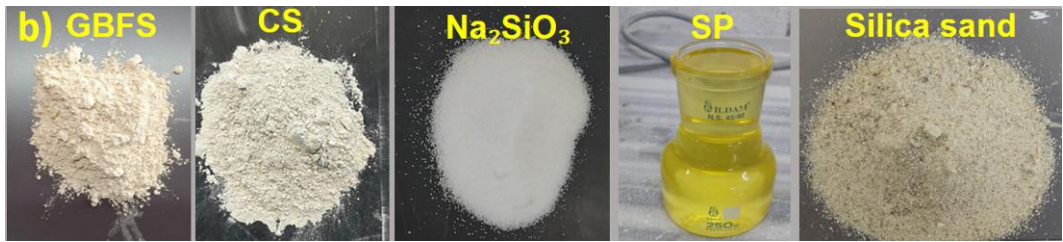
Öğütülmüş veya öğütülmemiş GBFS ve CS, sodyum metasilikat kullanılarak alkalin aktive edildi. Sodyum metasilikat tozunun mol ağırlığı 122,06 g/mol ve özgül ağırlığı 2,61'dir. Deneysel çalışmada kullanılan malzemeler Şekil 3.6'da sunulmuştur.



Şekil 3.4 Silika kumunun parçacık boyut dağılımı



Şekil 3.5 Çökeltme havuzundan elde edilen beton çamuru



Şekil 3.6 Deneysel çalışmada kullanılan malzemeler

3.2 Metod

3.2.1 Karışım Oranları

Alkali aktive kompozit (AAC) karışımlarının tasarımı, mekanik performans, dayanıklılık ve sürdürülebilirlik arasındaki dengeyi sağlamak amacıyla optimize

edilmiştir. Bu çalışmada, granüle yüksek fırın cürufu (GBFS) ve beton çamuru (CS) öğütülmemiş (UCS) veya öğütülmüş (GCS) formda kullanılmıştır. Toplam bağlayıcı içeriği 750 kg/m^3 olarak belirlenmiş ve GBFS'nin ikame seviyeleri %5; %10; %20 ve %30 olacak şekilde ayarlanmıştır.

Sabit bir su/bağlayıcı oranı korunmuş, sodyum metasilikat (%15 bağlayıcı ağırlığı) aktivatör olarak kullanılmış ve $37,5 \text{ kg/m}^3$ süper akışkanlaştırıcı (SP) eklenerek işlenebilirlik artırılmıştır. Karıştırma işlemi şu şekilde gerçekleştirilmiştir: kuru bileşenler 145 rpm hızda 1 dakika karıştırılmış, ardından su eklenerek 145 rpm hızda 1 dakika ve 280 rpm hızda 2 dakika karıştırılarak jeopolimer hamuru oluşturulmuştur. Daha sonra, pomza agregası ve köpük kademeli olarak eklenmiş ve 280 rpm hızda ek karıştırma işlemi uygulanmıştır.

Taze karışımlar kalıplara dökülerek 85°C 'de 24 saat boyunca $5^\circ\text{C}/\text{dak}$ kontrollü ısıtma oranı ile ısı kürüne tabi tutulmuş, ardından soğutulup kalıptan çıkarılarak test edilmek üzere laboratuvar koşullarında saklanmıştır. Bu karışım tasarımları, geri dönüştürülmüş beton çamuru atığını içeren sürdürülebilir malzemeler üretirken, mekanik dayanımı ve dayanıklılığı koruma amacı taşımaktadır.

Tablo 3.2 Karışım oranları (kg/m^3)

Mix ID	CS tip	CS oran (%)	GBFS	CS	su	Na_2SiO_3	SP	SS
Ref	-	-	750,0	0,0	273,8	112,5	37,5	1.047,7
UCS5		5	712,5	37,5	273,8	112,5	37,5	1.043,4
UCS10		10	675,0	75,0	273,8	112,5	37,5	1.039,1
UCS20	UCS	20	600,0	150,0	273,8	112,5	37,5	1.030,4
UCS30		30	525,0	225,0	273,8	112,5	37,5	1.021,7
GCS5		5	712,5	37,5	273,8	112,5	37,5	1.043,9
GCS10		10	675,0	75,0	273,8	112,5	37,5	1.040,0
GCS20	GCS	20	600,0	150,0	273,8	112,5	37,5	1.030,4
GCS30		30	525,0	225,0	273,8	112,5	37,5	1.021,7

3.2.2 Döküm ve Kürleme Süreci

GBFS, CS (UCS ve GCS) ve sodyum metasilikat ilk olarak AAC karışımlarına 145 rpm hızında 1 dakika boyunca karıştırılarak eklendi. Daha sonra su eklenerek; 145 rpm hızda 1 dakika ve 280 rpm hızda 2 dakika karıştırılarak jeopolimer hamuru elde edildi. Pomza agregası hamura eklenerek 145 rpm hızda 1 dakika ve 280 rpm hızda 3 dakika

daha karıştırıldı. Son aşamada, karışıma köpük eklendi ve 145 rpm hızda 1 dakika, ardından 280 rpm hızda 1 dakika karıştırıldıktan sonra kalıplama işlemi gerçekleştirildi.

Taze AAC karışımları kalıplara yerleştirildikten hemen sonra ısı kürleme süreci başlatıldı. Karışımlar kalıplara döküldükten sonra üst yüzeyleri (döküm yönü) streç film ile kapatıldı. Kalıplar; 85°C'de 24 saat boyunca 5°C/dak ısıtma oranına sahip bir fırında kürleme işlemine tabi tutuldu. 24 saatlik kürleme işleminin ardından numuneler, kontrollü bir şekilde soğutulduktan sonra kalıplardan çıkarıldı. Numuneler test gününe kadar laboratuvar koşullarında muhafaza edildi.

3.2.3 Testler

Numunelerin taze hal özelliklerini değerlendirmek için ASTM C1437 (ASTM, 2015) standardı kullanılmıştır. Karışımların yayılma çapları, yayılma tablası kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, 50x50x50 mm boyutlarındaki numunelerin su emme ve görünür gözeneklilik gibi fiziksel özelliklerini değerlendirmek için ASTM C642 ASTM, 2013 standardına uyulmuştur. Aynı numunelerin bir diğer fiziksel özelliği olan fırında kurutma yoğunluğu da ölçülmüştür. Fiziksel özellikler, 28 günlük kürleme süresi sonunda değerlendirilmiştir.

Numunelerin eğilme ve basınç dayanımları 7; 28 ve 91 günlerde test edilmiştir. Mekanik özellikleri belirlemek amacıyla 40x40x160 mm boyutlarında prizma numuneleri dökülmüştür. Bu numuneler üzerinde ASTM C348 (ASTM, 2019) standardına göre üç noktalı eğilme testi gerçekleştirilmiş, ardından ASTM C349 (ASTM, 2018) standardına uygun olarak basınç dayanımları belirlenmiştir.

Numuneler; 200°C; 400°C ve 800°C sıcaklıklara maruz bırakılarak kütle kaybı ve mekanik özellikler değerlendirilmiştir. Yüksek sıcaklık dayanımı, 40x40x160 mm prizma numuneler kullanılarak incelenmiştir. 28 günlük kür süresi tamamlandıktan sonra, numuneler 10°C/dak ısıtma hızında mufla fırınında belirlenen sıcaklıklara çıkarılmıştır. 2 saat boyunca bu sıcaklıklarda bekletildikten sonra, numuneler fırından çıkarılarak ortam koşullarında soğumaya bırakılmıştır. Isıtma sonrası basınç dayanımı ve kütle kaybı belirlenmiştir.

Numuneler, ASTM C666 (ASTM, 2015) standardına göre 50 ve 100 donma-çözülme (F-T) döngüsüne tabi tutulmuş, basınç dayanımı ve ağırlık kaybı ölçülmüştür. F-T döngüleri, 40x40x160 mm prizma numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş olup, donma işlemi -20°C'de 7 saat ve çözülme işlemi +4°C'de 5 saat olarak uygulanmıştır. Numuneler, 28 günlük kür süresi tamamlandıktan sonra F-T döngülerine tabi tutulmuştur.

Ayrıca, 28 gün normal kürlenmiş numuneler, 90 gün boyunca %5 H₂SO₄ ve MgSO₄ çözeltilerine maruz bırakılmıştır. Bu maruziyetin etkilerini değerlendirmek için basınç dayanımı ve ağırlık kaybı ölçülmüştür.



4. TARTIŞMA

4.1 Taze Özellikler

Şekil 4.1; GBFS'nin UCS veya GCS ile %5; %10; %20 ve %30 oranlarında ikame edilmesinin tek bileşenli AAC karışımlarının yayılma çapı üzerindeki etkisini göstermektedir. GBFS'nin UCS veya GCS ile değiştirilmesine bağlı olarak yayılma çapı değerleri önemli ölçüde değişmiş olup, tüm ikame seviyelerinde 134 mm ile 219 mm arasında değişmiştir. Referans karışım (100% GBFS) 218 mm yayılma çapı sergilemiştir. %5; %10; %20 ve %30 UCS ikameleri sırasıyla 212 mm; 193 mm; 165 mm ve 134 mm yayılma çapları göstermiş olup, bu değerler referans karışıma kıyasla yaklaşık %2,75; %11,47; %24,31 ve %38,53'lük azalmalar anlamına gelmektedir.

UCS ikame oranının artmasıyla birlikte yayılma çapındaki kademeli azalma birkaç faktöre bağlanabilir. UCS genellikle GBFS'ye kıyasla daha iri ve düzensiz şekilli parçacıklara sahiptir, bu da kompozit matris içinde içsel sürtünmeyi artırarak karışımın serbest akışını engeller ve işlenebilirliği azaltır (Chatveera, vd., 2006). Daha büyük ve düzensiz şekilli parçacıklar genellikle daha düşük yüzey alanına sahiptir, ancak UCS ayrıca daha fazla karışım suyunu emebilen gözenekli parçacıklar içerebilir, bu da serbest su miktarını azaltarak akışkanlığı daha da sınırlandırabilir (Li, vd., 2021; Monzó, vd., 2003).

Ek olarak, UCS ilavesiyle birlikte karışımın paketleme yoğunluğu azalır, çünkü iri parçacıklar daha ince GBFS parçacıkları arasındaki boşlukları yeterince dolduramaz, bu da boşluk hacmini artırır ve parçacıklar arasındaki yağlama etkisini sınırlar (Lu, vd., 2021). UCS içinde bulunan çimento parçacıkları da akış davranışını etkileyebilir. Hidratlanmamış veya kısmen hidratlanmış çimento parçacıkları matris yoğunlaşmasına ve reaktiviteye katkıda bulunan mikro dolgular olarak hareket edebilirken, açısız şekilleri ve değişken parçacık boyutları sürtünmeyi artırarak işlenebilirliği azaltabilir (Liu, vd., 2023; Xuan, vd., 2016). Ayrıca, çimento parçacıkları alkali aktivatörlerin varlığında kısmen hidratlanabilir, bu da lokal sertleşmeye ve parçacık hareketliliğinin azalmasına yol açarak gözlemlenen yayılma çapı azalmasına katkıda bulunabilir (Amer, vd., 2021).

Bunun yanı sıra, UCS'nin GBFS'ye kıyasla daha düşük toplam reaktivitesi, erken aşama hidrasyon veya parçacık dağılımına daha az katkıda bulunarak daha fazla kohezyona ve sınırlı akışkanlığa neden olur (Wu, vd., 2022). Tüm bu faktörler daha iri parçacık boyutu, düzensiz şekiller, su emme kapasitesi, düşük reaktivite ve çimento parçacıklarının etkisi alkali aktive kompozitlerde UCS'nin işlenebilirlik ve mekanik performans açısından optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır (Duan, vd., 2022).

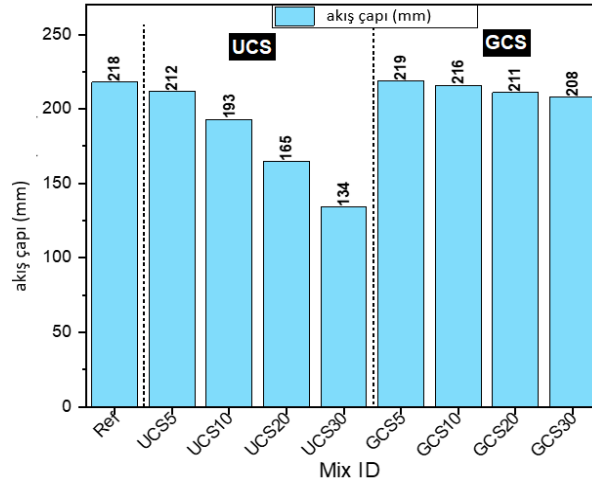
GBFS'nin %5; %10; %20 ve %30 GCS ile ikame edilmesi durumunda elde edilen yayılma çapları sırasıyla 219 mm; 216 mm; 211 mm ve 208 mm olmuştur. Referans karışıma (100% GBFS; 218 mm) kıyasla, bu ikame seviyelerindeki yayılma çapı değişimleri %5 GCS için +%0,46; %10 GCS için -%0,92; %20 GCS için -%3,21 ve %30 GCS için -%4,59 olarak hesaplanmıştır.

%5 GCS ikame seviyesinde referans karışıma kıyasla gözlemlenen hafif yayılma çapı artışı, GCS'nin ince taneli yapısına bağlanabilir. İnce GCS parçacıkları mikro dolgular olarak hareket ederek parçacık paketlemesini iyileştirebilir ve iç sürtünmeyi azaltarak daha akıcı bir matris oluşturabilir. Bu durum, partiküllerin daha kolay kaymasını sağlayarak düşük ikame seviyelerinde akışkanlığı artırabilir. Ayrıca, düşük miktarda GCS, daha büyük GBFS parçacıkları arasındaki boşlukları doldurarak alkali aktive matris içinde daha homojen bir karışım oluşmasına ve işlenebilirliğin artmasına katkıda bulunabilir.

Bu düşük ikame seviyesinde, genel hamur kohezyonu da GBFS'nin seyreltildiği için biraz azalabilir, bu da partiküllerin daha serbest hareket etmesine ve yayılma çapının artmasına neden olabilir (He, vd., 2022). CS içindeki çimento partikülleri de akışkanlığı artırmada rol oynayabilir. Hidratlanmamış veya kısmen hidratlanmış çimento partikülleri, ince dolgular gibi davranarak partikül paketlemesini iyileştirebilir ve matrisin pürüzsüzlüğünü artırabilir. Ayrıca, bu çimento partikülleri, gözenekli ve iri partiküller kadar fazla su emmediği için serbest su miktarını koruyarak karışımın akışkanlığını artırabilir.

Ancak, düşük ikame seviyelerinde, çimento partiküllerinin reaktivitesi erken sertleşmeye neden olacak kadar yüksek olmadığından, karışımın akışkanlığını koruması sağlanır. Ayrıca, düşük miktarda GCS, erken jel oluşumunu geciktirerek karışımın daha akışkan kalmasını sağlayabilir. Bu birleşik etkiler, düşük seviyelerde GCS ikamesinin, paketlenme yoğunluğunu optimize ederek ve iç sürtünmeyi azaltarak, gözenekliliği önemli ölçüde artırmadan veya reaktiviteyi azaltmadan akışkanlığı olumlu yönde etkileyebileceğini göstermektedir.

UCS ile karşılaştırıldığında GCS ikamesinin artmasıyla akış çapındaki nispeten küçük azalmalar bazı faktörlere bağlanabilir. GCS, UCS'den daha ince bir parçacık boyutuna sahiptir, bu da parçacık paketlemesini iyileştirir ve matris içindeki iç sürtünmeyi azaltır, parçacıklar arasında daha iyi yağlama sağlar ve daha yüksek değıştirme seviyelerinde bile daha yüksek işlenebilirliği korur (Li, vd., 2024). Ek olarak, GCS'nin daha ince ve daha pürüzsüz yüzey özellikleri, daha gözenekli ve düzensiz UCS parçacıklarına kıyasla su emilimini azaltır, karışımındaki serbest suyu korumaya ve akışkanlığı sürdürmeye yardımcı olur (Hwang, vd., 2017). GCS'nin daha ince parçacıkları ayrıca daha büyük GBFS parçacıkları arasındaki boşlukları doldurmada daha etkilidir, bunun sonucunda en aza indirilmiş boşluklar ve azaltılmış ayrışma riski ile daha yoğun ve daha kohezyonlu bir matris elde edilir. Dahası, daha ince GCS parçacıkları erken aşama hidrasyonuna veya jel oluşumuna daha etkili bir şekilde katkıda bulunabilir, parçacıkları daha düzgün bir şekilde dağıtabilir ve akışı kısıtlayabilecek aşırı kohezyonu önleyebilir. Toplu olarak, bu faktörler, GCS'yi bir yedek malzeme olarak kullanırken alkali aktive edilmiş kompozitlerin işlenebilirliğini optimize etmede parçacık boyutu ve yüzey özelliklerinin önemini vurgulamaktadır.



Şekil 4.1 Akış çapları ve taze birim ağırlık grafiği

4.2 Basınç Dayanımı

Şekil 4.2; GBFS'nin %5; %10; %20 ve %30 UCS veya GCS ile değiştirilmesinin AAC karışımlarının basınç dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Numuneler; 85°C'de 24 saat boyunca kürlenmiş ve ardından 7; 28 ve 90 gün boyunca ortam koşullarında kürlenmeye devam edilmiştir. Sonuçlar, tüm AAC karışımlarının basınç dayanımının kürlenme süresi uzadıkça kademeli olarak arttığını göstermektedir. Bu dayanım artışı, matrisin yoğunlaşmasını teşvik eden ve ek C-S-H ile diğer reaksiyon ürünlerinin oluşumunu sağlayan sürekli jeopolimerizasyon ve hidrasyon reaksiyonlarına bağlanabilir (Bodur, vd., 2025; Wu, vd., 2022; Yön, vd., 2013).

%5 ve %10 UCS içeren karışımlar, tüm kürlenme günlerinde (7; 28 ve 90 gün) referans karışımdan daha yüksek basınç dayanımı sergilemiştir. Ancak, %20 ve %30 UCS içeren karışımlar, tüm kürlenme sürelerinde referans karışımdan daha düşük basınç dayanımı göstermiştir. 90 günlük kür sonunda, referans karışımı (100% GBFS) 37,87 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır. Buna karşılık, %5 ve %10 UCS içeren karışımlar sırasıyla 43,74 MPa ve 41,29 MPa dayanım göstermiş olup, referansa kıyasla yaklaşık %15,5 ve %9,0 oranında artış sağlamıştır. Öte yandan, %20 ve %30 UCS içeren karışımlar sırasıyla 34,78 MPa ve 32,67 MPa dayanım göstermiş olup, referansa kıyasla yaklaşık %8,2 ve %13,7 oranında azalma kaydetmiştir.

UCS ikame seviyesinin artmasıyla birlikte basınç dayanımında gözlemlenen eğilim, birkaç birbiriyle ilişkili faktöre bağlanabilir. Düşük ikame seviyelerinde (%5 ve %10),

UCS mikro dolgu görevi görerek parçacık paketlemesini iyileştirir ve matris içindeki boşluk içeriğini azaltır, bu da daha yoğun bir mikro yapı oluşumuna ve daha yüksek dayanım elde edilmesine yol açar. Bu iyileştirilmiş paketleme verimliliği, kapiler poroziteyi azaltır ve bağlayıcı ile agrega arasındaki geçiş bölgelerinin (ITZ) güçlenmesini sağlar; bu bölgeler genellikle çatlama eğilimli kritik alanlardır (He, vd., 2020).

Ayrıca, düşük miktardaki UCS, kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve diğer hidratasyon ürünlerinin oluşumu için çekirdeklenme noktaları sağlayarak daha homojen ve tamamlanmış bir hidratasyon sürecini teşvik edebilir, bu da zamanla artan basınç dayanımına katkıda bulunur (Ismail, vd., 2014; Li, vd., 2013). Ancak, daha yüksek UCS ikame seviyelerinde (%20 ve %30); UCS'nin GBFS'ye kıyasla daha düşük puzolanik reaktivitesi nedeniyle aktif bağlayıcı malzemelerin seyreltildiği gözlemlenmiştir. Bu durum, C-S-H ve kalsiyum aluminosilikat hidrat (C-A-S-H) gibi dayanım sağlayıcı fazların üretimini sınırlayarak hidratasyon ve jeopolimerizasyon süreçlerini yavaşlatır ve yapısal matrisin zayıflamasına neden olur (Huseien, vd., 2017; Ismail, vd., 2014).

Ayrıca, UCS'nin daha iri parçacık boyutu ve düzensiz şekli, matris içinde daha yüksek porozite oluşturarak paketleme yoğunluğunu azaltır ve daha büyük kapiler boşluklar oluşturarak genel basınç dayanımını olumsuz etkiler. Bunun yanında, UCS'nin GBFS'ye kıyasla daha düşük bağlanma kapasitesi nedeniyle ITZ bölgeleri zayıf bir bağ yapısına sahip olur ve bu bölgeler yük altında mikro çatlakların oluşmasına daha yatkın hale gelir. Bu mikro çatlaklar matris içinde yayılma göstererek yük transferini bozmakta ve mekanik performansın daha da düşmesine neden olmaktadır.

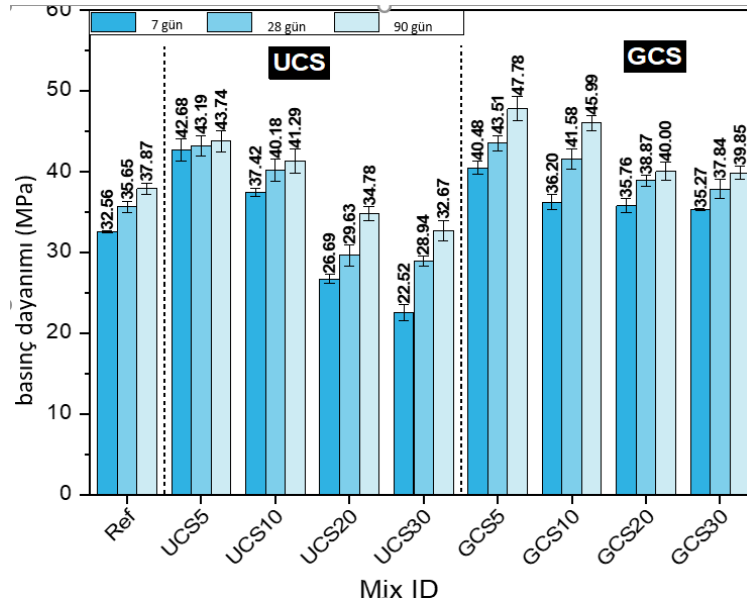
Bunun tersine, GCS içeren karışımlar, GCS değiştirme seviyesinden bağımsız olarak, 7; 28 ve 90 günlük tüm kürlenme sürelerinde referans karışıma (100% GBFS) kıyasla daha yüksek basınç dayanımları sergiledi. 90 günlük kürlenmede; %5; %10; %20 ve %30 GCS içeren karışımlar sırasıyla 47,78; 45,99; 40,00 ve 39,85 MPa basınç dayanımları gösterdi. 37,87 MPa basınç dayanımı gösteren referans karışıma (100% GBFS) kıyasla, bu değerler sırasıyla %5; %10; %20 ve %30 GCS karışımları için yaklaşık %26,2; %21,5; %5,6 ve %5,2'lik dayanım iyileştirmelerini temsil etmektedir.

90 günde artan GCS ikame seviyeleriyle birlikte basınç dayanımında gözlenen değişimler, Tablo 1'de gösterilen beton çamurunun (CS) oksit bileşiminden etkilenen birkaç birbiriyle ilişkili faktöre atfedilebilir. Daha düşük ikame seviyelerinde (%5 ve %10), daha ince GCS parçacıkları, daha büyük GBFS parçacıkları arasındaki boşlukları doldurarak parçacık paketlemesini artırır ve bu da daha yoğun, daha kohezif, kılcal gözenekliliği azaltılmış ve daha güçlü arayüz geçiş bölgeleri (ITZ'ler) içeren bir matris oluşturur (Deng, vd., 2021). Bu iyileştirilmiş paketleme yoğunluğu, yük altında daha iyi gerilim dağılımını destekleyerek referans karışıma kıyasla sırasıyla %26,2 ve %21,5 oranında gözlenen dayanım iyileştirmelerine katkıda bulunur. Ek olarak, GCS bir mikro dolgu maddesi görevi görür ve CSH ve CASH gibi hidrasyon ürünleri için çekirdeklenme alanları sağlayarak matris yoğunlaşmasını ve uzun vadeli dayanım gelişimini hızlandırır (Chen, vd., 2022; Ya, vd., 2024). CS'nin oksit bileşimi, dayanım gelişiminde kritik bir rol oynar. CS'deki (48,6%) GBFS'ye (39,5%) kıyasla daha yüksek kalsiyum oksit (CaO) içeriği, özellikle düşük ikame seviyelerinde erken aşama mukavemet gelişimini artıran CSH oluşumunu teşvik eder. Bununla birlikte, CS'deki silika (SiO₂; 11,9%) ve alümina (Al₂O₃; 2,9%) içeriklerinin GBFS'ye (36,6% SiO₂ ve 8,1% Al₂O₃) kıyasla daha düşük olması, daha yüksek ikame seviyelerinde uzun vadeli mukavemet gelişimi için kritik olan alüminosilikat ve CASH fazlarının üretimini sınırlayabilir. Ek olarak, CS'deki önemli ölçüde daha düşük magnezyum oksit (MgO) içeriği (2,5% - GBFS'de %12,9); magnezyum silikat hidrat (MSH) oluşumunu azaltarak mukavemet katkılarını daha da sınırlayabilir. Daha yüksek GCS ikame seviyelerinde (%20 ve %30); GBFS'nin ikamesi reaktif bağlayıcı içeriğini seyrelterek CSH ve diğer mukavemete katkıda bulunan fazların üretimini yavaşlatır ve böylece mukavemet iyileştirmelerini sırasıyla %5,6 ve %5,2 ile sınırlar (Wu, vd., 2021). CS'nin yüksek kızdırma kaybı (LOI) (%30,5); tepkimeye girmeyen veya uçucu bileşenlerin varlığını gösterir ve bu da gözenekliliğin artmasına ve matrisin zayıflamasına katkıda bulunur. Bu gözeneklilik, GCS'nin daha kaba parçacık boyutu ve düzensiz şekliyle birlikte, iyileştirilmiş paketleme ve hidrasyonun olumlu etkilerini kısmen telafi ederek daha yüksek ikame seviyelerinde basınç dayanımı kazanımlarının azalmasına yol açar.

Ayrıca, hem 28 hem de 90 günlük kürelemede, GCS içeren karışımlar, UCS içerenlere kıyasla üstün basınç dayanımı gösterdi. GCS içeren karışımlar, %9,2 ile %22,0

arasında değişen iyileştirmelerle UCS içeren karışımlardan daha yüksek basınc dayanımları gösterdi. En kk fark %5 ikamede (%9,2) gözlenirken, en büyük fark %30 ikamede (%22,0) meydana geldi. %10 ve %20 ikame seviyelerinde, GCS karışımları, UCS muadillerine kıyasla sırasıyla %11,4 ve %15,0 daha yüksek basınc dayanımları gösterdi. İkame seviyesi arttıca, GCS'nin UCS'ye olan üstünlüğü daha belirgin hale geldi ve bu da GCS'nin daha ince parçacık boyutunun ve artan reaktivitesinin alkali aktifli kompozitlerde daha yoğun ve daha güçlü bir matrise katkıda bulunduğunu gösterdi.

Bu gelişmiş performans, matris yoğunlaşmasını artıran ve ek CSH ve CASH fazlarının oluşumunu destekleyen GCS'nin daha ince parçacık boyutuna ve daha yüksek reaktivitesine atfedilebilir (Ismail, vd., 2014; Tian, vd., 2021). Buna karşılık, UCS'nin daha düşük puzolanik reaktivitesi, daha kaba parçacık morfolojisi ve daha yüksek gözenekliliği, özellikle daha yüksek değiştirme seviyelerinde, azaltılmış mukavemet kazanımlarıyla sonuçlandı. UCS ve GCS içeren karışımlar arasındaki basınc dayanımları farkı zamanla daha belirgin hale geldi ve bu da GCS'nin alkali aktifli kompozit sistemlerde üstün uzun vadeli mekanik faydalar sağladığını gösterdi.



şekil 4.2 7; 28 ve 91 gün sonraki basınc dayanımları

4.3 Eğilme Dayanımı

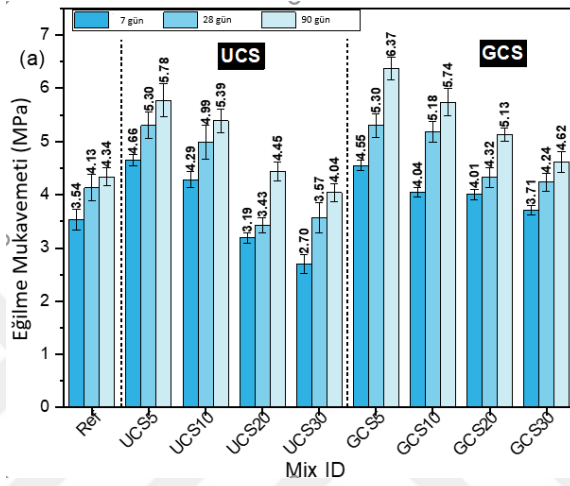
Şekil 4.3; GBFS'nin %5; %10; %20 ve %30 UCS veya GCS ile değiştirilmesinin AAC karışımlarının eğilme dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Numuneler; 85°C'de 24 saat boyunca kürlenmiş ve ardından 7; 28 ve 90 gün boyunca ortam koşullarında kürlenmeye devam edilmiştir. Sonuçlar, tüm AAC karışımlarının eğilme dayanımının kürlenme süresi uzadıkça kademeli olarak arttığını göstermektedir. Bu eğilme dayanımı artışı, matrisin yoğunlaşmasını teşvik eden ve C-S-H ile C-A-S-H fazlarının oluşumunu sağlayan sürekli jeopolimerizasyon ve hidrasyon reaksiyonlarına bağlanabilir. Bu süreç, AAC karışımlarının zaman içinde yapısal bütünlüğünü ve eğilme gerilmelerine karşı direncini artırmaktadır.

Basınç dayanımında gözlemlenen eğilime benzer şekilde, %5 ve %10 UCS içeren karışımlar daha yüksek eğilme dayanımı sergilerken, %20 ve %30 UCS içerenler tüm kürlenme yaşlarında (7; 28 ve 90 gün) referans karışıma kıyasla daha düşük eğilme dayanımı gösterdi. 90 günde, referans karışım (%100 GBFS) 4,34 MPa eğilme dayanımına ulaştı. %5; %10 ve %20'lik UCS ikameleri dayanımı sırasıyla 5,78 MPa (+%33,2); 5,39 MPa (+%24,2) ve 4,45 MPa'ya (+%2,5) çıkarırken; %30 UCS hafif bir azalmaya (4,04 MPa; -%6,9) yol açtı. %5 ve %10 UCS ikamesindeki iyileştirilmiş eğilme mukavemeti, matris yoğunlaşmasını ve çatlak köprülemesini artırırken CSH ve CASH oluşumu için çekirdeklenme alanları sağlayan UCS'nin dolgu etkisine atfedilir. Ancak, daha yüksek ikame seviyelerinde (%20 ve %30); UCS'nin azaltılmış inceliği ve düzensiz parçacık şekli, GBFS'ye kıyasla daha düşük SiO₂ ve Al₂O₃ içeriğiyle birleştiğinde, jeopolimerizasyon verimliliğinin azalmasına neden olur (He, vd., 2020). Ek olarak; %30,5'lik daha yüksek CaO içeriği ve kızdırma kaybı (LOI), tepkimeye girmemiş veya uçucu bileşenlerin varlığını gösterir, matris gözenekliliğini artırır ve ITZ'leri zayıflatır (Cantero, vd., 2020). Daha iri UCS parçacıkları ayrıca paketleme yoğunluğunu azaltarak daha zayıf bağ oluşumuna sahip daha gözenekli bir mikro yapıya yol açar ve bu da %20 ve %30 UCS ikame seviyelerinde eğilme mukavemetindeki düşüşü açıklar (Jin, vd., 2024). Buna karşılık, tüm GCS içeren karışımlar, GCS değiştirme seviyesinden bağımsız olarak tüm kürlenme yaşlarında (7; 28 ve 90 gün) üstün eğilme mukavemeti sergiledi. Özellikle, 90 günde; %5; %10; %20 ve %30 GCS içeren karışımlar, referans karışıma kıyasla sırasıyla yaklaşık %46,8;

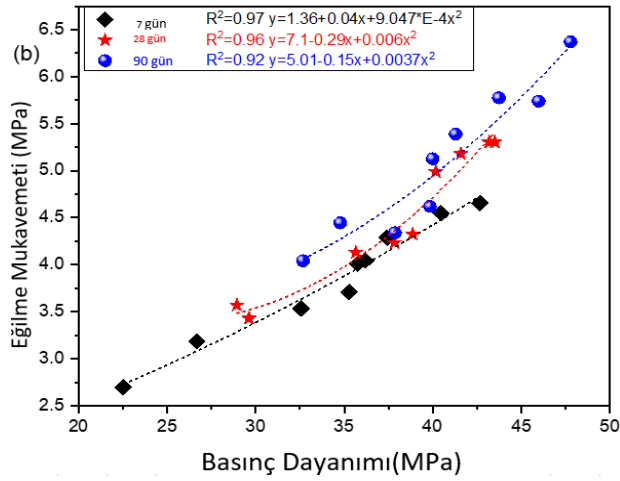
%32,3; %18,2 ve %6,5 artışa karşılık gelen 6,37; 5,74; 5,13 ve 4,62 MPa eğilme mukavemetlerine ulaştı. GCS içeren karışımlarda gözlemlenen eğilme mukavemetindeki iyileştirmeler, gelişmiş parçacık paketlemesine, jeopolimerizasyona ve matris yoğunlaştırılmasına atfedilebilir (Wang, vd., 2022). GCS'nin daha ince parçacık boyutu, boşlukları etkili bir şekilde azaltan ve iyileştirilmiş gerilim dağılımına sahip daha yoğun bir yapı oluşturan bir mikro dolgu maddesi olarak hareket etmesini sağlar. Ek olarak, GCS'deki daha yüksek kalsiyum oksit içeriği, daha fazla kohezyona ve yük taşıma kapasitesine katkıda bulunarak CSH fazlarının oluşumunu destekler (Lu, vd., 2018; Zhu, vd., 2025). Geliştirilmiş ITZ, reaksiyon ürünleri için ek nükleasyon alanları sağlayarak matrisi daha da güçlendirir. Ancak, daha yüksek GCS değiştirme seviyelerinde (%20 ve %30); GBFS'den gelen reaktif silika ve alüminadaki azalma, jeopolimerik ve CSH fazlarının oluşumunu sınırlayarak genel eğilme mukavemeti iyileştirmesini azaltır (Lu, vd., 2018; Yang, vd., 2022). Aşırı GCS içeriği ayrıca daha az reaktif faz getirerek artan mikro çatlama ve mukavemet kazanımlarında düşüşe yol açabilir (Cantero, vd., 2020). En yüksek iyileştirme %5 GCS ikamesinde (+%46,8) meydana gelir ve değiştirme seviyesi arttıkça faydalar azalır, eğilme performansının en üst düzeye çıkarılması için optimum bir GCS içeriğinin mevcut olduğunu ileri sürmektedir.

Ayrıca, hem 28 hem de 90 günlük kürlemede, GCS içeren karışımlar UCS içerenlere kıyasla daha yüksek eğilme mukavemeti gösterdi. 90 günde, %5; %10; %20 ve %30 GCS içeren karışımlar sırasıyla 6,37; 5,74; 5,13 ve 4,62 MPa eğilme mukavemetlerine ulaşırken, karşılık gelen UCS karışımları 5,78; 5,39; 4,45 ve 4,04 MPa'ya ulaştı. Bu sonuçlar, GCS karışımlarının sırasıyla %5; %10; %20 ve %30 değiştirme seviyelerinde UCS karışımlarından %10,2; %6,5; %15,3 ve %14,4 daha yüksek eğilme mukavemeti gösterdiğini göstermektedir. GCS'nin daha yüksek performansı, matris yoğunlaşmasını ve parçacık paketlemesini geliştiren, jeopolimer ağı içinde iyileştirilmiş gerilim dağılımına ve daha güçlü arayüz bağlanmasına yol açan daha ince parçacık boyutuna atfedilir (Li, vd., 2022; Ren, vd., 2020). Şekil 4.4; karışımların 7; 28 ve 90 günlük kürlemeden sonraki basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Her kürleme yaşında güçlü bir korelasyon gözlemlendi ve sırasıyla 7; 28 ve 90 günlük korelasyon katsayıları (R^2) 0,97; 0,96 ve 0,92 oldu. Basınç ve eğilme dayanımları arasındaki pozitif korelasyon, basınç dayanımı arttıkça eğilme

dayanımının da iyileştiğini göstermektedir. Bu eğilim, matrisi kademeli olarak yoğunlaştıran ve hem basınç hem de eğilme performansını geliştiren devam eden hidrasyon ve jeopolimerizasyon süreçlerine atfedilebilir. 90 gündeki biraz daha düşük R^2 değeri, mikro yapısal değişimlerin ve zaman içindeki faz dönüşümlerinin daha sonraki aşamalarda mukavemet ilişkisini etkilemiş olabileceğini düşündürmektedir (Benli, 2024).



Şekil 4.3 7; 28 ve 91 günlük eğilme dayanımları



Şekil 4.4 Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı

4.3.1 Kuru Birim Ağırlık

Şekil 4.5; GBFS'nin %5; %10; %20 ve %30 UCS veya GCS ile değiştirilmesinin AAC karışımlarının kuru birim ağırlığı üzerindeki etkisini göstermektedir. Numuneler,

85°C’de 24 saat boyunca kürlenmiş ve ardından 28 gün boyunca ortam koşullarında küremeye devam edilmiştir.

Karışımların kuru birim ağırlıkları 1962 kg/m³ ile 2154 kg/m³ arasında değişmiştir. %20 UCS içeren karışım en düşük kuru birim ağırlığına sahip olup, referans karışıma (2011 kg/m³) kıyasla %2,44’lük bir azalma göstermiştir. Buna karşılık, %5 GCS içeren karışım en yüksek kuru birim ağırlığını sergileyerek referans karışıma göre %7,12’lik bir artış göstermiştir. Gözlemlenen kuru birim ağırlık değişimleri, malzeme özellikleri ve mikro yapı farklılıklarına bağlıdır. %20 UCS içeren karışımın en düşük kuru birim ağırlığını göstermesi, UCS’nin daha iri partikül yapısına, yüksek gözenekliliğe ve GBFS’ye kıyasla daha düşük özgül ağırlığa sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu faktörler, boşluk içeriğinin artmasına ve yoğunluğun azalmasına neden olmuştur (Prosek, vd., 2019).

Buna karşılık; %5 GCS içeren karışımın en yüksek kuru birim ağırlığına sahip olması, GCS’nin daha ince partikül boyutuna sahip olmasına bağlanmaktadır. Bu durum, daha iyi paketleme verimliliği sağlayarak jeopolimer jel oluşumunu artırmakta ve daha yoğun bir matris oluşturmaktadır. Bu faktörler, yüksek UCS içeriği ile yoğunluk azalmasını ve düşük GCS içeriği ile yoğunluk artışını açıklamaktadır.

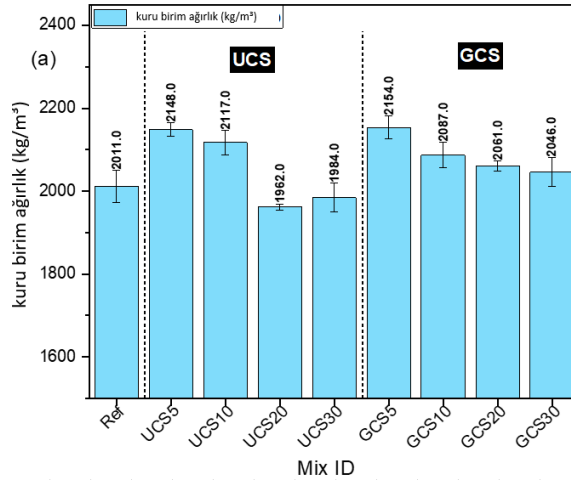
%5 ve %10 UCS içeren karışımlar referans karışıma kıyasla daha yüksek birim ağırlık gösterirken, %20 ve %30 UCS içerenler daha düşük birim ağırlık sergilemiştir. Öte yandan, tüm GCS içeren karışımlar referans karışıma kıyasla daha yüksek birim ağırlık göstermiştir. %5; %10 ve %30 UCS içeren karışımlar sırasıyla 2148 kg/m³, 2117 kg/m³ ve 1984 kg/m³ birim ağırlık değerlerine sahip olmuş olup; %5 ve %10 UCS ikamelerinde sırasıyla %6,81 ve %5,26’lık bir artış; %30 UCS içeren karışımda ise %1,34’lük bir azalma gözlemlenmiştir. Benzer şekilde; %10; %20 ve %30 GCS içeren karışımlar sırasıyla 2087 kg/m³; 2061 kg/m³ ve 2046 kg/m³ birim ağırlık değerlerine sahip olmuş olup, referans karışıma göre sırasıyla %3,78; %2,49 ve %1,74’lük bir artış göstermiştir.

Birim ağırlıktaki bu değişimler, malzeme özellikleri, parçacık boyutu dağılımı ve UCS ile GCS’nin jeopolimer matris içindeki mikro yapısal etkilerinden kaynaklanmaktadır.

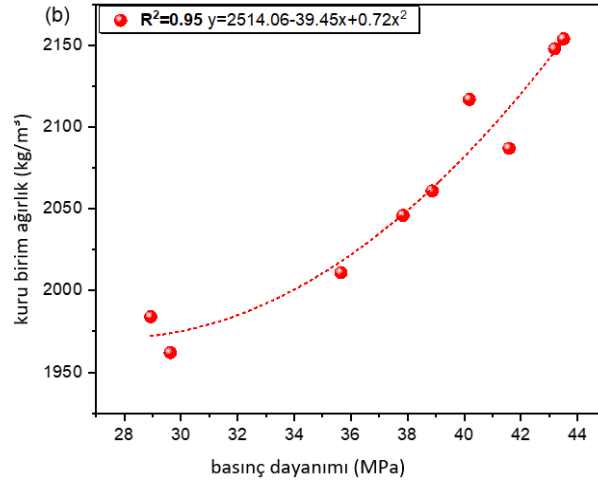
Düşük UCS ikame seviyelerinde (%5 ve %10), iyileşen parçacık paketlenme, matris yoğunlaşmasını artırarak boşlukları azaltmış ve birim ağırlık artışına yol açmıştır (Wu, vd., 2022). Ancak, UCS içeriği %20 ve %30 seviyelerine yükseldiğinde, daha iri parçacık yapısı ve düzensiz morfolojisi daha fazla boşluk oluşumuna neden olarak paketlenme verimliliğini azaltmış ve birim ağırlığı düşürmüştür. Ayrıca, UCS'nin yüksek ateş kaybı (LOI) değeri, reaktif olmayan veya uçucu bileşenlerin varlığını göstererek gözenekliliği artırmakta ve yoğunluğu düşürmektedir (Wu, vd., 2022).

Buna karşılık, GCS, tüm ikame seviyelerinde daha yüksek birim ağırlık sağlamıştır. Bunun nedeni, daha ince partikül boyutunun matris sıkışmasını artırması ve boşluk içeriğini azaltmasıdır. GCS parçacıklarının artan yüzey alanı, jeopolimerizasyon reaksiyonlarını daha iyi teşvik ederek daha yoğun ve bütünleşmiş bir yapı oluşturmaktadır (Xiao, vd., 2018). Bu faktörler, GCS ile artan birim ağırlık eğilimini ve daha yüksek UCS içeriği ile gözlemlenen düşüş eğilimini açıklamaktadır.

Şekil 4.6; 28 günlük kür süresi sonunda AAC karışımlarının kuru birim ağırlığı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Yüksek R² değeri (0,95); bu iki parametre arasında güçlü bir korelasyon olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.5 28 günlük fırında kurutma yoğunluğu



Şekil 4.6 Basınç dayanımı ve kuru yoğunluk

4.3.2 Görünür Gözeneklilik ve Su Emme

Şekil 4.7; GBFS'nin %5; %10; %20 ve %30 UCS veya GCS ile değiştirilmesinin AAC karışımlarının gözeneklilik ve su emme özellikleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Numuneler, 85°C'de 24 saat boyunca kürlenmiş ve ardından 28 gün boyunca ortam koşullarında kürlenmeye devam edilmiştir.

Karışımların gözenekliliği %4,23 ile %7,77 arasında değişmiş olup, en düşük gözeneklilik %5 GCS içeren karışımda gözlemlenmiş ve referans karışıma (%6,59) kıyasla %35,8'lik bir azalma sağlamıştır. Buna karşılık; %20 UCS içeren karışım en yüksek gözenekliliğe sahip olmuş ve referans karışıma göre %17,9'luk bir artış göstermiştir. Gözeneklilikteki bu değişimler, malzeme özellikleri, reaktivite ve parçacık paketleme verimliliğinden kaynaklanmaktadır. %5 GCS içeren karışımın en düşük gözenekliliği göstermesi, daha ince partikül boyutuna sahip olmasına bağlanmaktadır. Bu durum, paketleme verimliliğini artırarak jeopolimerizasyonu geliştirmekte ve daha az boşluk içeren daha yoğun bir matris oluşturmaktadır (Bogas, vd., 2019). Buna karşılık; %20 UCS içeren karışımın en yüksek gözenekliliğe sahip olması, UCS'nin iri ve düzensiz şekilli parçacıklarının paketleme verimliliğini azaltarak boşluk içeriğini artırmasından kaynaklanmaktadır (Meng, vd., 2021).

Karışımların su emme kapasitesi %1,54 ile %4,00 arasında değişmiştir. En düşük su emme oranı; %5 UCS içeren karışımda gözlemlenmiş olup, referans karışıma (%3,49) kıyasla %55,9'luk bir azalma sağlamıştır. Buna karşılık; %20 UCS içeren karışım en

yüksek su emme oranına sahip olmuş ve referans karışıma göre %14,6'lık bir artış göstermiştir. %5 UCS içeren karışımın en düşük su emme oranına sahip olması, parçacık paketleme yoğunluğunun artması ve jeopolimerizasyonun güçlenmesi ile ilişkilidir (Wu, vd., 2021). Buna karşılık; %20 UCS içeren karışımın en yüksek su emme oranına sahip olması, artan gözeneklilik ve azalan matris bütünlüğü nedeniyle su girişine daha fazla izin vermesinden kaynaklanmaktadır.

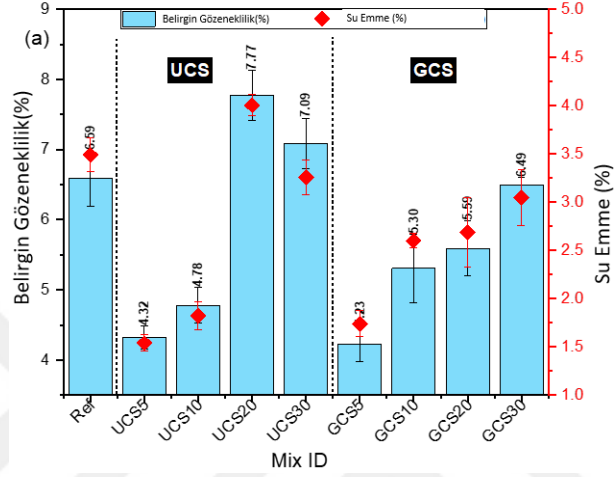
%5 ve %10 UCS içeren karışımlar referans karışıma kıyasla daha düşük gözeneklilik ve su emme özellikleri gösterirken, %20 ve %30 UCS içerenler daha yüksek gözeneklilik ve su emme sergilemiştir (Sun, vd., 2022). Buna karşılık, tüm GCS içeren karışımlar referans karışıma kıyasla daha düşük gözeneklilik ve su emme oranlarına sahip olmuştur.

%5; %10 ve %30 UCS içeren karışımların gözeneklilik değerleri sırasıyla %4,32; %4,78 ve %7,09 olarak belirlenmiştir. Referans karışıma (%6,59) kıyasla bu değerler, %5 UCS için %34,5; %10 UCS için %27,5'lik bir azalma ve %30 UCS için %7,6'lık bir artış göstermektedir. Benzer şekilde, %10; %20 ve %30 GCS içeren karışımlar sırasıyla %5,30; %5,59 ve %6,49 gözeneklilik değerlerine sahip olup, referans karışıma göre sırasıyla %19,6; %15,2 ve %1,5'lik azalmalar kaydetmiştir.

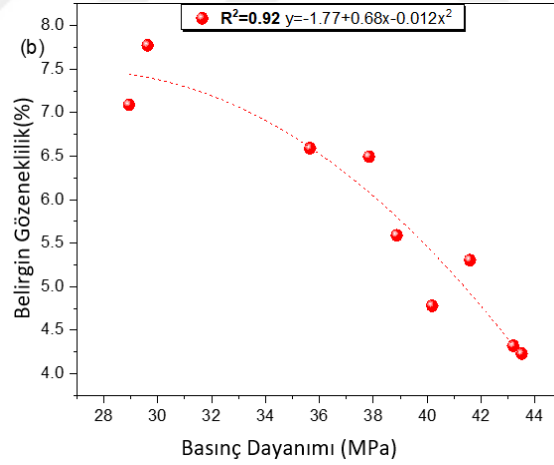
Düşük UCS ve GCS ikame seviyeleri, parçacık dağılımının iyileşmesine ve matris sıkışmasının artmasına neden olarak gözenekliliği azaltmıştır. Ancak; %30 UCS ikame seviyesinde, iri ve düzensiz UCS parçacıkları paketleme verimliliğini bozarak boşluk oluşumunu artırmış ve gözeneklilik değerini referans karışımdan daha yüksek hale getirmiştir (Sui, vd., 2021; Xiao, vd., 2018). Benzer şekilde; %10; %20 ve %30 GCS içeren karışımlar daha düşük gözeneklilik sergilemiş olup, bu durum GCS'nin daha ince partikül boyutuna sahip olması, jeopolimerizasyonu iyileştirmesi ve daha yoğun bir mikro yapı oluşturmasıyla ilişkilidir. Düşük GCS seviyelerinde gözeneklilik azalımı daha belirgin olurken, daha yüksek GCS seviyelerinde azalma etkisi sınırlı kalmış ve bağlayıcı-agrega oranındaki değişimler optimum paketlemeyi etkilemiştir.

Bu bulgular, orta seviyelerde UCS ve GCS ikamesinin matris yoğunlaşmasını iyileştirdiğini ve gözenekliliği azalttığını, ancak aşırı UCS içeriğinin parçacık

paketleme verimsizliği ve yüksek boşluk içeriği nedeniyle gözenekliliği artırdığını göstermektedir. Şekil 4.8, gözeneklilik ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Yüksek negatif korelasyon katsayısı ($R^2 = 0,92$); basınç dayanımındaki değişimlerin %92'sinin gözeneklilik farklılıklarıyla açıklanabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.7 Gözeneklilik ve su emilimi



Şekil 4.8 Basınç dayanımı ve gözeneklilik arasındaki ilişki

4.3.3 Su Emme Katsayısı (Sorptivite)

Şekil 4.9; GBFS'nin %5; %10; %20 ve %30 UCS veya GCS ile değiştirilmesinin AAC karışımlarının su emme katsayısı (sorptivite) üzerindeki etkisini göstermektedir. Numuneler; 85°C'de 24 saat boyunca kürlenmiş ve ardından 28 gün boyunca ortam koşullarında kürlenmeye devam edilmiştir.

Sorptivite değerleri 1,81 ile 4,09 kg/m² arasında değişmiştir. En dūřuk sorptivite değeri %5 UCS iğeren karışımda 1,81 kg/m² olarak gōzlemlenirken, en yūksək değer %20 UCS iğeren karışımda 4,09 kg/m² olarak belirlenmiştir. Referans karışımın sorptivite değeri 3,46 kg/m²'dir. %5 UCS iğeren karışım, referansa kıyasla %47,8'lik bir azalma sağlarken, %20 UCS iğeren karışım %18,2'lik bir artış gōstermiřtir. UCS ve GCS ikamesiyle gōzlemlenen sorptivite değişiklikleri, bu malzemelerin alkali aktive kompozitlerin (AAC) gōzeneklilięi ve mikro yapısı ūzerindeki etkilerinden kaynaklanmaktadır.

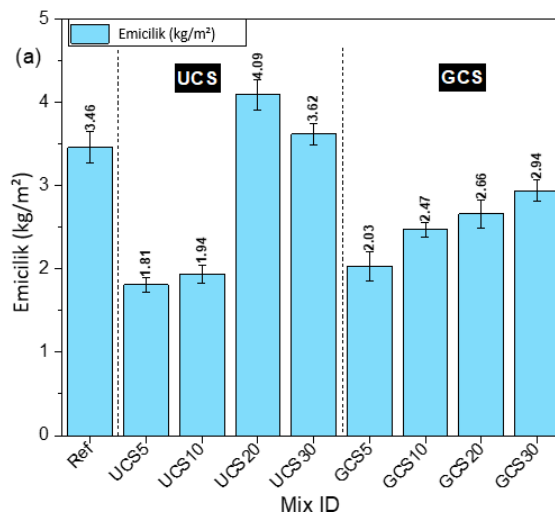
%5 UCS iğeren karışım, en dūřuk sorptivite değerine sahip olup (1,81 kg/m²); az miktardaki UCS'nin matrisin yoğunlaşmasına yardımcı olarak gōzeneklilięi ve su emme yollarını azalttığını gōstermektedir (Ma, vd., 2022). Bu, referans karışıma kıyasla %47,8'lik bir azalmaya neden olmuştur. Ancak; %20 UCS iğeren karışımda, daha gōzenekli bir yapı ve daha būyūk ya da daha bağlantılı boşluklar nedeniyle su emme artmış ve sorptivite %18,2 oranında yūkselmiřtir.

%10 UCS iğeren karışımın sorptivitesi 1,94 kg/m² olarak belirlenmiş olup, %5 UCS iğeren karışımdan daha yūksək ancak referans karışımdan daha dūřuk bir değer gōstermiřtir. Bu; %10 UCS iğeren karışımın hala nispeten yoğun olduğunu, ancak %5 UCS'ye kıyasla hafifęe artan gōzeneklilięe sahip olduğunu gōstermektedir. %30 UCS iğeren karışım ise 3,62 kg/m² sorptivite değerine ulaşarak, daha yūksək UCS seviyelerinde malzemenin daha gōzenekli hale geldiğini ve su emme oranının arttığını gōstermektedir.

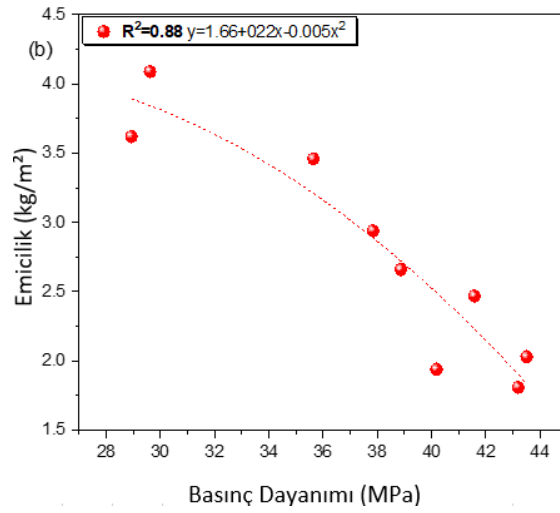
GCS iğeren karışımlarda ise sorptivite değerleri, %5 GCS iğeren karışımda 2,03 kg/m²'den %30 GCS iğeren karışımda 2,94 kg/m²'ye kadar artmıştır. Bu durum, GCS iğeriği arttıķa karışımın gōzeneklilięinin de arttığını ve bunun da daha fazla su emilmesine yol ağtığını gōstermektedir (Wu, vd., 2022). Ancak, GCS iğeren karışımların sorptivite değerleri, %30 UCS iğeren karışımın (3,62 kg/m²) altında kalmış olup, GCS'nin yūksək ikame seviyelerinde su emme oranını UCS'ye kıyasla daha az arttırdığını gōstermektedir.

Bu farklılıklar, UCS ve GCS'nin alkali aktive kompozitlerin mikro yapısı ve gözenekliliği üzerindeki etkilerine dayanmaktadır. %5 UCS içeren karışım, daha yoğun bir yapıya sahip olup daha az boşluk içerdiğinden düşük bir sorptivite değeri (1,81 kg/m²) göstermiştir. %10 UCS'de sorptivite 1,94 kg/m²'ye yükselirken, %30 UCS içeriğinde daha büyük ve bağlantılı boşluklar nedeniyle en yüksek sorptivite değeri (3,62 kg/m²) gözlemlenmiştir. GCS içeren karışımlarda ise sorptivite, %5 GCS içeriğinde 2,03 kg/m²'den %30 GCS içeriğinde 2,94 kg/m²'ye kadar artış göstermiştir. Bu durum, GCS'nin mikro çatlaklar veya gözeneklilik oluşturma eğiliminde olduğunu ve malzemeyi daha geçirgen hale getirdiğini göstermektedir (Wu, vd., 2021). Ancak, GCS içeren karışımların sorptivite değerleri, UCS içeren karışımlardan daha düşük olmuş olup, GCS'nin yüksek ikame seviyelerinde gözenekliliği UCS kadar artırmadığını göstermektedir (Ma, vd., 2022).

Şekil 4.10; sorptivite ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Yüksek negatif korelasyon katsayısı ($R^2 = 0,88$); sorptivite arttıkça basınç dayanımının azaldığını göstermektedir. Bu eğilim, daha yüksek su emme kapasitesine sahip malzemelerin genellikle daha düşük basınç dayanımı sergilediğini göstermektedir. Negatif korelasyon, gözenekliliğin artmasıyla birlikte su emme oranının yükselmesine ve bunun sonucunda daha az yoğun ve daha geçirgen bir yapı oluşarak malzemenin basınca karşı direncinin azalmasına bağlanmaktadır.



Şekil 4.9 Sorptivite



Şekil 4.10 Sorptivite arasındaki ilişki

4.4 28 Günlük Kür Süresi Sonrası Mikroyapısal Değişimler

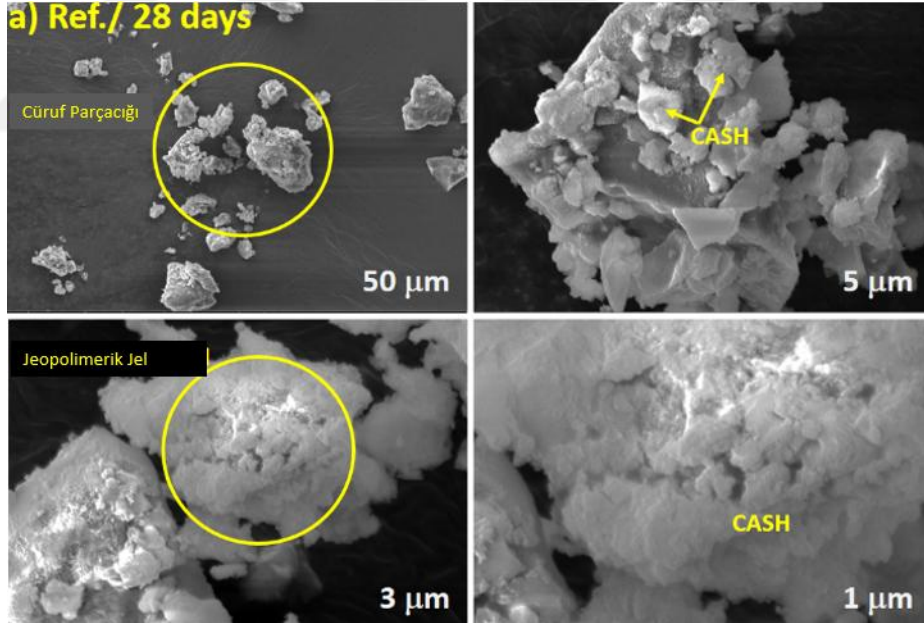
Referans karışımın (100% GBFS) SEM görüntüsü, alkaliyle aktive edilmiş sistemde GBFS'nin yüksek reaktivitesinin doğrudan bir sonucu olarak oldukça yoğun ve kompakt bir mikroyapıyı ortaya koymaktadır (Şekil 4.11). GBFS'deki ince tane boyutu ve yüksek silika (SiO_2) ile alümina (Al_2O_3) içeriği, güçlü bir jeopolimerizasyon reaksiyonunu kolaylaştırarak iyi entegre olmuş ve stabil bir matrisin oluşumuna yol açmaktadır.

Kompakt yapıya katkıda bulunan en önemli unsurlardan biri, sistem içerisindeki birincil bağlayıcı fazlar olarak görev yapan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum alüminosilikat hidrat (C-A-S-H) jellerinin yoğun oluşumudur. Bu jeller, parçacıklar arasındaki boşlukları doldurarak yoğunlaşmayı kolaylaştırır, böylece gözenekliliği azaltır ve genel mekanik dayanımı artırır. Özellikle C-A-S-H jeli, jeopolimer zincirleri üzerinde bağlayıcı bir etki sağlayarak uzun vadeli basınç dayanımı gelişimini güçlendirmektedir.

Mikroyapının gelişimi sayesinde, referans karışım 28 günlük kür süresi sonunda 35,65 MPa basınç dayanımına ulaşmış ve GBFS'nin AAC'lerde etkili bir birincil bağlayıcı olduğunu kanıtlamıştır. Bu yoğun mikroyapı, güçlü bağlanma ve kompakt matris, karışımın mükemmel mekanik özellikler sergilemesini sağlar ve yük uygulaması sırasında devreye girebilecek iç zayıflıkları bastırarak kırılmayı önler.

Referans karışımın düşük gözenekliliği ve dayanıklılığı, boşlukların ve mikro çatlakların minimal varlığı ile de doğrulanabilir. Düşük gözenekli yapılar daha az su emer ve daha az geçirgen olur, bu da donma-çözülme döngüleri ile sülfat saldırılarına karşı çevresel bozulma direncini artırır. Ayrıca, bağlayıcı ve agregalar arasındaki gelişmiş bağlanma, gerilim dağılımını daha homojen hale getirerek uzun vadeli stabiliteyi destekler.

SEM analizi, karışımın dayanım, dayanıklılık ve mikroyapısal bütünlük açısından optimal bir dengeye sahip olduğunu göstermektedir. İyi gelişmiş jeller ve yoğun mikroyapı, GBFS'nin yüksek performanslı AAC'lerin üretilmesinde önemli bir bileşen olduğunu kanıtlamaktadır. Buna karşılık, UCS ve GCS ile modifiye edilmiş karışımlar, belirli yapısal kriterler ve ağırlıklandırma seviyeleri dikkate alındığında referans karışımın performansı ve uzun vadeli dayanıklılığına göre daha düşük performans gösterebilir.



Şekil 4.11 28 günlük kür süresi sonrası Referans karışımın (100% GBFS) SEM görüntüsü

%30 UCS içeren karışım, referans karışıma (%100 GBFS) kıyasla daha gözenekli ve daha az kompakt bir mikroyapıya sahiptir (Şekil 4.12). Bu gözenekliliğin artışı, UCS'nin daha iri tane boyutuna, düzensiz morfolojisine ve daha düşük reaktivitesine bağlıdır; bu faktörler, sıkı paketleme verimliliğini ve jeopolimerizasyon sürecini olumsuz yönde etkilemektedir.

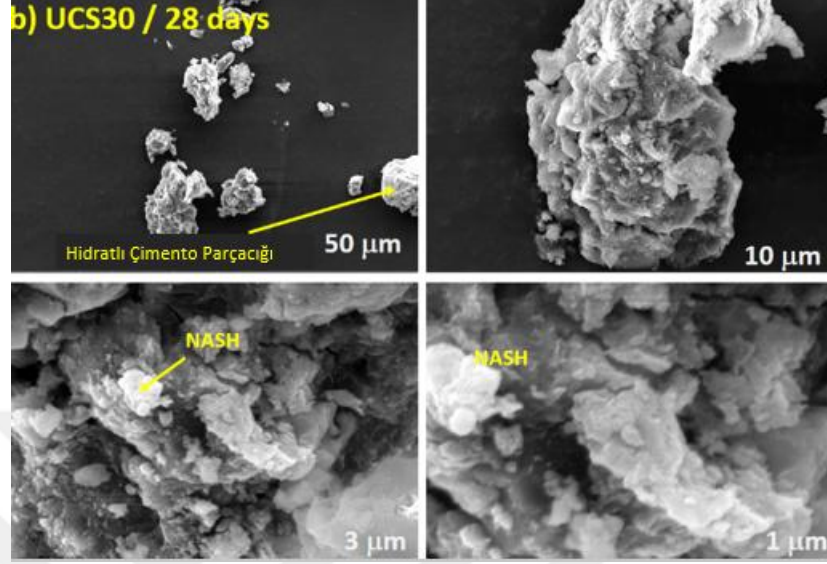
Referans karışımında, yoğun bir matris C-S-H ve C-A-S-H jellerinin geniş ölçekte gelişimiyle oluşurken; %30 UCS karışımı, iyi yapılandırılmış bir bağlayıcı faz içermediğinden, daha zayıf ve daha gözenekli bir matris ortaya çıkmaktadır. %30 GBFS'nin UCS ile değiştirilmesi, UCS partiküllerinin verimsiz paketlenmesi nedeniyle daha büyük boşluklar ve mikro çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. UCS partiküllerinin düzensiz şekli, matris içinde sıkı bir şekilde kenetlenmesini önleyerek kapiler gözenekliliği ve geçirgenliği artırmaktadır. Sonuç olarak, mikroyapıda daha fazla reaksiyona girmemiş partikül gözlemlenmekte ve bu durum genel matris bütünlüğünü daha da zayıflatmaktadır.

C-S-H ve C-A-S-H fazlarının daha az oluşması, partiküller arasındaki bağın zayıf olmasına yol açarak mekanik dayanımı düşürmekte ve yük altında mikro çatlakların oluşma olasılığını artırmaktadır. UCS, GBFS'ye kıyasla daha düşük silika ve alümina içeriğine sahip olduğundan, jeopolimerizasyon sürecinde dayanımı artıran reaksiyon ürünlerinin oluşumu sınırlı kalmaktadır. Sistemdeki Si ve Al miktarının azalması, polimerik ağın zayıflamasına neden olarak matrisi gerilim kaynaklı çatlamalara ve mekanik bozulmalara karşı daha savunmasız hale getirmektedir.

Buna ek olarak, UCS daha yüksek kalsiyum oksit içeriğine sahip olmasına rağmen, GBFS kadar puzolanik reaktiviteye sahip değildir; bu durum, jeopolimerizasyon reaksiyonunun eksik veya daha az homojen gerçekleşmesine yol açmaktadır. %30 UCS karışımında artan gözeneklilik, su emme oranının yükselmesiyle doğrudan ilişkilidir, çünkü boşluklar nemin matris içine daha fazla nüfuz etmesine olanak tanımaktadır. Yüksek su emme kapasitesi, donma-çözülme döngüleri ve sülfat saldırıları gibi dış çevresel etkenlere karşı dayanıklılığı olumsuz etkilemektedir.

Ayrıca, aşırı boşluk oluşumu nedeniyle yük taşıma ağının bozulması, basınç dayanımının düşmesine neden olarak malzemenin yapısal performansını referans karışıma kıyasla azaltmaktadır. Mikroyapısal analizler, aşırı UCS ikamesinin (%30) daha zayıf ve daha gözenekli bir matris oluşturduğunu, jeopolimerizasyon verimliliğini azalttığını, su emilimini artırdığını ve mekanik dayanımı düşürdüğünü doğrulamaktadır. Bu bulgular, alkali ile aktive edilmiş kompozitlerde işlenebilirlik,

dayanım ve dayanıklılık arasında denge sağlamak için UCS ikame seviyelerinin optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır.



Şekil 4.12 28 günlük kür süresi sonrası UCS30 içeren karışımın SEM görüntüsü

%30 GCS içeren karışım, %30 UCS karışımına kıyasla daha yoğun ve kompakt bir mikroyapıya sahiptir; ancak referans karışıma göre nispeten daha yüksek gözeneklilik göstermektedir (Şekil 4.13). GCS'nin ince taneli yapısı, sıkı paketleme verimliliğini artırarak boşluk içeriğini azaltır ve böylece çimento-hamur-agrega temas bölgesi (ITZ) içerisindeki bağ dayanımını ve bütünlüğünü artırır. Bu nedenle, GCS karışımı daha az mikro çatlak içeren, daha dayanıklı, bütünlüklü ve homojen bir matris oluşturur.

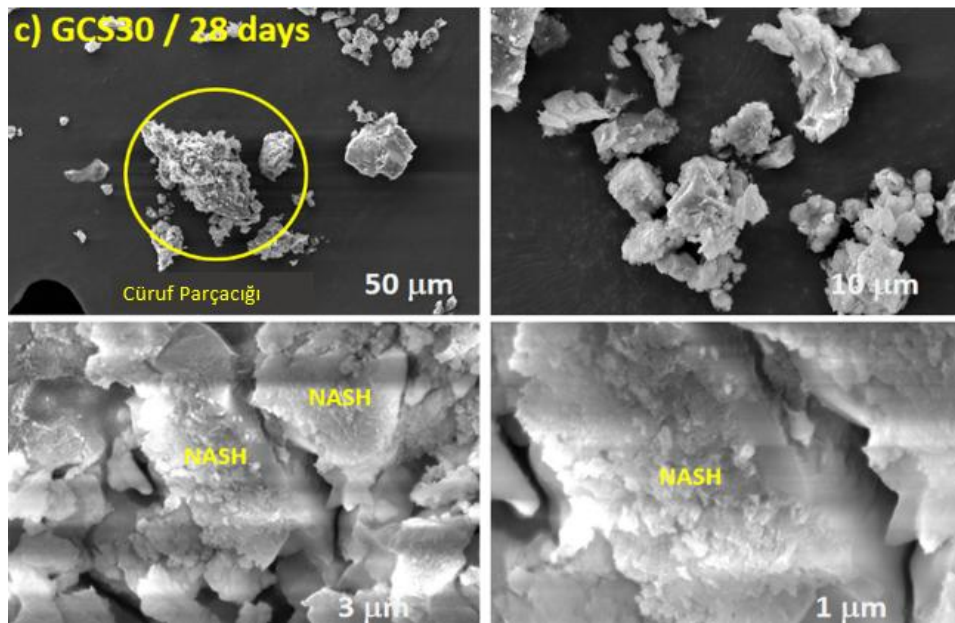
Ayrıca, GCS'nin ince ve eşit dağılımlı partikülleri, jeopolimer ağı içerisindeki boşlukları mikro düzeyde doldurarak matrisin yoğunlaşmasına katkıda bulunur. UCS karışımında ise iri ve düzensiz partikül morfolojisinin karışımın homojenliğini bozduğu ve aşırı gözenekliliğe yol açtığı gözlemlenmiştir. Her ne kadar %30 GCS ikamesi, referans karışıma kıyasla yapıyı zayıflatıyor olsa da, daha ince partikül dağılımı ve daha yüksek reaktivitesi sayesinde UCS karışımlarına kıyasla daha güçlü bir mikroyapısal bütünlük sağlar.

Daha yüksek reaktiviteye ve yüzey alanına sahip olan GCS, jeopolimerizasyon reaksiyonunu daha iyi teşvik ederek C-S-H ve C-A-S-H fazlarının ilave oluşumunu kolaylaştırır. Bu jel fazları, partiküller arası bağı güçlendirerek matrisin dayanımını

artırır ve reaksiyona girmemiş malzeme miktarını azaltır. SEM analizlerinde de gözlemlendiği üzere, bu jel fazlarının gelişimi, malzeme içerisindeki zayıf noktaların büyük ölçüde azalmasına yardımcı olmaktadır. Artan jeopolimerizasyon verimliliği, UCS karışımlarında bağlayıcı faz oluşumunu sınırlayan düşük reaktiviteye kıyasla, daha iyi mekanik özellikler ve uzun vadeli dayanıklılık sağlar.

Gelişmiş partikül dağılımı, azalan gözeneklilik ve iyileştirilmiş jel oluşumu sayesinde; %30 GCS karışımı; %30 UCS karışımına kıyasla daha yüksek basınç dayanımı ve daha düşük geçirgenlik sergilemektedir. Daha güçlü ara yüzey bağlanması ve azalan boşluk içeriği, donma-çözülme döngüleri ve sülfat saldırısı gibi çevresel bozulmalara karşı daha yüksek direnç sağlar. Bununla birlikte, aşırı GCS ikamesi, GBFS'in seyrelmesi nedeniyle reaksiyona girebilen bağlayıcı bileşenlerin toplam miktarını azaltarak belirli bir yapısal zayıflamaya yol açmaktadır.

UCS'ye kıyasla; %30 GCS karışımı daha kompakt bir mikroyapı, gelişmiş jeopolimerizasyon verimliliği ve iyileştirilmiş mekanik özellikler sunarak GBFS yerine daha etkili bir alternatif oluşturmaktadır. Ancak, optimum dayanım ve dayanıklılık elde etmek için GCS ikame seviyesi dikkatlice optimize edilmelidir, çünkü aşırı ikame, hafif bir gözeneklilik artışına ve genel mekanik performansta azalmaya neden olabilir.



Şekil 4.13 28 günlük kür süresi sonrası GCS30 içeren karışımın SEM görüntüsü

4.5 Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı

4.5.1 Basınç Dayanımı

Şekil 4.14; 28 günlük kür süresinin ardından yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan AAC karışımlarında; %5; %10; %20 ve %30 oranlarında GBFS yerine UCS veya GCS kullanmanın basınç dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Ayrıca, Şekil 4.15; 200°C ile 800°C arasındaki sıcaklıklara maruz kalmadan önce ve sonra karışımların basınç dayanımının karşılaştırmalı analizini sunmaktadır.

Tüm karışımlar, yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında basınç dayanımında bir azalma yaşamıştır. 200°C'de dayanım kaybı %0,4 ile %12,9 arasında değişmiştir, bu da AAC sisteminin mekanik bütünlüğünün sıcaklık kaynaklı bozulduğunu göstermektedir. En düşük dayanım kaybı %20 GCS karışımında gözlemlenmiştir, bu da orta düzeyde öğütülmüş GCS ikamesinin daha yoğun bir mikroyapı oluşturarak termal direnci artırdığını göstermektedir. Bu durum, geliştirilmiş partikül paketlenmesi, azalan gözeneklilik ve jeopolimer matrisi ile GCS partikülleri arasındaki daha iyi ara yüzey bağlanmasıyla açıklanabilir. Buna karşılık; %5 GCS içeren karışım en yüksek dayanım kaybını sergilemiştir. Bunun nedeni, bu düşük ikame seviyesinde yetersiz puzolanik aktivite ve eksik C-S-H ve C-A-S-H fazlarının oluşumu olabilir. Bu durum, termal bozulmaya daha duyarlı, daha zayıf bir matris oluşmasına yol açmıştır (Pan, vd., 2018; Turker, vd., 2016).

400°C'de AAC karışımlarının basınç dayanımı kaybı %12,7 ile %28,7 arasında değişmiş ve bu sıcaklığa maruz kalmanın mekanik performansta önemli bir bozulmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. GBFS yerine %20 GCS kullanılan karışım en düşük dayanım kaybını gösterirken; %30 UCS karışımı en büyük dayanım kaybını yaşamıştır.

%20 GCS karışımının üstün termal direnci, optimize edilmiş partikül paketlenmesine, gelişmiş jeopolimerizasyona ve termal olarak kararlı reaksiyon ürünlerinin (C-S-H ve C-A-S-H) artan oluşumuna bağlanabilir. GCS'nin daha ince partikül boyutu ve daha yüksek yüzey alanı, gözenekliliği azaltarak daha yoğun bir mikroyapının oluşmasını sağlar ve bağlayıcı matrisin termal stabilitesini artırır (Hussin, vd., 2015). Ayrıca,

GCS, reaktif fazların daha homojen dağılımını sağladığından, termal gerilim altında mikro çatlak ve yapısal kusurların oluşumunu en aza indirir.

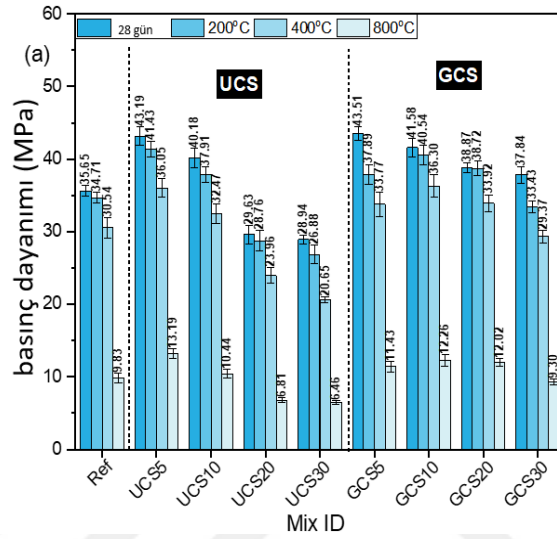
%30 UCS içeren karışımlar, en yüksek dayanım kayıplarını sergilemiştir. Bunun nedeni, UCS'nin iri ve düzensiz partikül morfolojisinin paketlenme verimliliğini azaltarak boşluk içeriğini artırması olabilir. UCS'nin GBFS'ye kıyasla daha düşük silika ve alümina içeriği, jeopolimerik ve C-S-H/C-A-S-H fazlarının oluşma olasılığını azaltarak daha zayıf ve termal olarak daha az kararlı bir matris oluşturur (Cai ve Ye, 2021). UCS'nin %30,5 oranında yüksek kızdırma kaybı değeri, uçucu veya reaksiyona girmemiş malzemelerin varlığına işaret eder; bu da yüksek sıcaklıklarda gözenekliliğin artmasına ve mikroyapının bozulmasına katkıda bulunur.

AAC karışımlarının basınç dayanımı kaybı 800°C'de %69,1 ile %77,7 arasında değişmiş ve tüm karışımların yüksek sıcaklıklara sürekli maruz kalma nedeniyle önemli ölçüde termal bozulma yaşadığı görülmüştür. Test edilen karışımlar arasında, %20 GCS ikamesi içeren karışım en düşük dayanım kaybını gösterirken, %30 UCS içeren karışım en yüksek dayanım kaybını göstermiştir. Bu durum, çok farklı bileşimlere sahip bağlayıcıların farklı termal performanslar sergileyebileceğini ortaya koymaktadır.

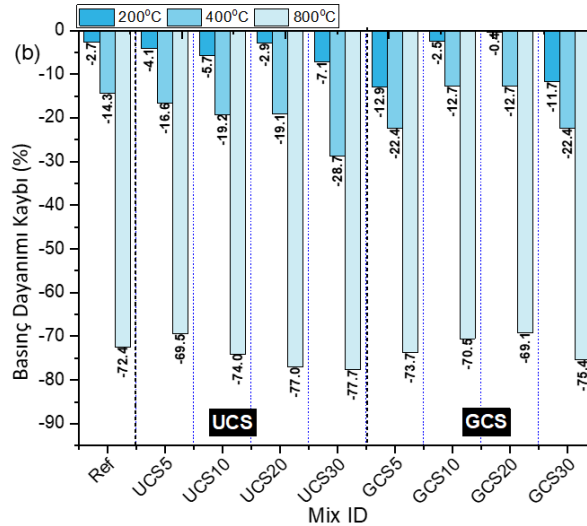
%20 GCS karışımındaki nispi dayanım kazanımı, daha yoğun bir mikroyapıya, iyi partikül paketlenmesine ve C-S-H ve C-A-S-H gibi jeopolimerizasyon ürünlerinin gelişmiş oluşumuna bağlanabilir (Pan, vd., 2018). Bu reaksiyon fazları, termal direnci artırarak aşırı ısı maruziyeti altında mikro çatlama ve yapısal arızaları azaltır (Park, vd., 2016). Ayrıca, GCS'nin daha ince partikül boyutu ve artan yüzey alanı, matris içinde daha etkili kimyasal bağlanmayı teşvik ederek, yüksek sıcaklıklarda bile daha iyi yapısal bütünlük sağlar.

Buna karşılık; %30 UCS karışımı en büyük dayanım kaybını yaşamıştır. Bu durum, UCS'nin daha düşük reaktivitesi, daha iri partikül morfolojisi ve daha yüksek gözenekliliği ile ilişkilendirilebilir. UCS'nin yüksek kızdırma kaybı (%30,5); uçucu bileşiklerin ve reaksiyona girmemiş bileşenlerin varlığını göstermektedir; bu da ısınma sırasında matrisin gözenekliliğinin artmasına neden olmuş olabilir. Ayrıca, UCS'nin

GBFS'ye kıyasla daha düşük silika ve alümina içeriği, yüksek sıcaklığa dayanıklı jeopolimerik fazların oluşumunu sınırlandırarak malzemeyi termal çatlamaya ve mekanik arızaya daha yatkın hale getirmiştir (Burciaga-Díaz ve Escalante-García, 2017). Bağlı suyun geniş çapta kaybı ve hidrate fazların ayrışması, matris yapısını daha da zayıflatarak mikro çatlak oluşumunu hızlandırmış ve dayanımın azalmasına neden olmuştur.



Şekil 4.14 Basınç dayanımı



Şekil 4.15 Yüksek sıcaklığa maruz kalma durumunda dayanım değişimleri

4.5.2 Ağırlık Kaybı

Şekil 4.16; GBFS'nin UCS veya GCS ile %5; %10; %20 ve %30 oranlarında değiştirilmesinin, 28 günlük kürleme süresinden sonra yüksek sıcaklıklara maruz

bırakılan alkali ile aktive edilmiş kompozit (AAC) karışımlarının ağırlık kaybı üzerindeki etkisini göstermektedir. Sonuçlar, tüm AAC karışımlarının termal maruziyet sonrası ağırlık kaybına uğradığını ve bu kaybın sıcaklık arttıkça arttığını göstermektedir. Bu durum, temel olarak nem buharlaşması, faz ayrışması ve mikro yapısal bozulmadan kaynaklanmaktadır.

200°C’de, ağırlık kaybı %4,84 ile %8,03 arasında değişmiş ve bu, termal olarak indüklenen kütle azalmasının ilk aşamasını ortaya koymuştur. %5 UCS içeren karışım en düşük ağırlık kaybını gösterirken; %20 UCS içeren karışım en yüksek ağırlık kaybını yaşamıştır. %5 UCS karışımında gözlemlenen düşük ağırlık kaybı, düşük ikame seviyelerinde UCS’nin daha yoğun bir matris oluşturmasına katkıda bulunarak başlangıçtaki boşlukları azalttığını ve serbest su içeriğini düşürdüğünü göstermektedir. Bu, erken aşamadaki su kaybını azaltmaya yardımcı olmuştur. UCS’nin bu düşük seviyedeki dahil edilmesi, matrisin yapışmasını artırmış olabilir, ancak ara sıcaklıklarda termal stabiliteyi etkileyebilecek gözenekliliği veya reaksiyona girmemiş madde miktarını önemli ölçüde değiştirmemiştir.

Öte yandan; %20 UCS içeren numunelerde gözlemlenen görece daha büyük ağırlık kaybı, AAC kompozitlerinin aşırı UCS ikamesi nedeniyle termal direncinin ciddi şekilde azaldığını göstermektedir. UCS’deki daha yüksek gözeneklilik nedeniyle zayıflayan parçacık paketleme verimliliği, ısıtma sırasında fiziksel ve kimyasal olarak bağlı suyun buharlaşmasına izin vermektedir. UCS içindeki bazı reaksiyona girmemiş veya kısmen hidratlanmış bileşenler, ekstra buharlaşma ve termal ayrışmayı teşvik ederek kütle kaybını daha da artırmış olabilir. Ayrıca, UCS parçacıklarının daha büyük boyutu ve düzensiz şekli, matrisin sürekliliğini bozarak nemin kaçışı için daha fazla yol sağlamış ve böylece mekanik dayanımın azalmasına neden olmuştur.

400°C’de, AAC karışımlarındaki ağırlık kaybının %11,09 ile %11,54 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu durum, büyük ölçüde nemin buharlaşmasına, faz ayrışmasına ve yapısal kararsızlığa bağlı olarak önemli bir kütle kaybını göstermektedir. GBFS’nin %5 UCS ile kısmi olarak değiştirildiği karışım en düşük dayanım kaybını gösterirken, %30 UCS ikamesine sahip karışım en fazla dayanım kaybını yaşamıştır.

%5 UCS içeren karışımın iyi termal stabilitesi, yoğun mikro yapısına bağlanabilir; bu yapı, matris bileşenleri arasındaki bağ dayanımını artırarak gözenek bağlantısını azaltmakta ve termal maruziyet sırasında mikro yapı bozulmasına yol açabilecek nem kaybını kontrol altında tutmaktadır. Bu ikame seviyesinde UCS'nin muhtemelen mikro dolgu maddesi gibi davranarak paketleme verimliliğini artırdığı ve matris bütünlüğünü koruyan C-S-H ve C-A-S-H fazlarının oluşumunu desteklediği düşünülmektedir.

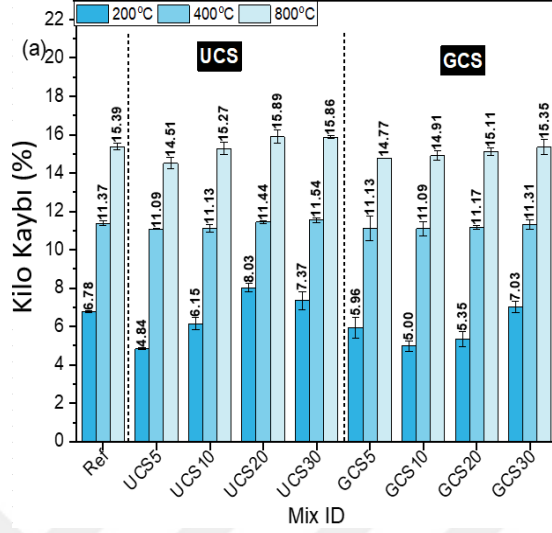
Öte yandan; %30 UCS içeren karışımdaki dayanım kaybı, aşırı UCS ikamesinin AAC kompozitlerinin termal direncini zayıflattığı görüşünü desteklemektedir. Bu etki, artan gözeneklilik ve daha yüksek UCS konsantrasyonlarında gelişen zayıf bağlayıcı faz oluşumu ile ilişkilendirilebilir. UCS'nin iri taneli ve düzensiz partikül morfolojisi, matrisin sürekliliğini bozarak nemin hızlı şekilde dışarı atılmasına ve termal genleşme nedeniyle mikro çatlamalara neden olmaktadır. Ayrıca, UCS'nin GBFS'ye kıyasla daha düşük silika ve alümina içeriği, daha düşük bir jeopolimerleşme potansiyeliyle sonuçlanarak daha zayıf ve daha az termal kararlı bir matris oluşmasına yol açmaktadır.

800°C'de, AAC karışımları %14,51 ile %15,89 arasında ağırlık kaybı göstermiştir. %5 UCS içeren karışım en düşük dayanım kaybını sergilerken, %20 UCS içeren karışım en yüksek dayanım kaybını yaşamıştır.

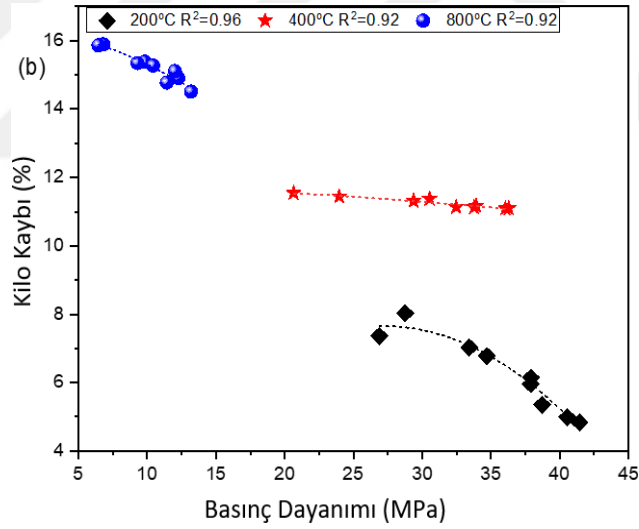
Düşük UCS ikamesi (%5); matris yoğunlaşmasını artırarak mikro çatlak oluşumunu azaltmış ve termal stabiliteyi iyileştirmiştir. Buna karşın, aşırı UCS içeriği (%20) gözenekliliği artırmış, jeopolimerleşmeyi zayıflatmış ve kristal yapılarının ayrışması nedeniyle yapısal bozulmayı hızlandırmıştır.

Bu bulgular, mekanik performans ile yüksek sıcaklık dayanımı arasındaki dengeyi sağlamak için UCS içeriğinin optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Şekil 4.17; 200°C; 400°C ve 800°C'de AAC karışımlarında basınç dayanımı ile ağırlık kaybı arasında güçlü bir ters korelasyon olduğunu göstermektedir (R^2 değerleri sırasıyla 0,96; 0,92 ve 0,92). Bu durum, termal maruziyet nedeniyle nem kaybı, faz ayrışması ve mikro yapısal hasar sonucunda meydana gelen basınç dayanımı

düşüşünün güvenilir bir şekilde ağırlık kaybı ile tahmin edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.16 Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası ağırlık kaybı



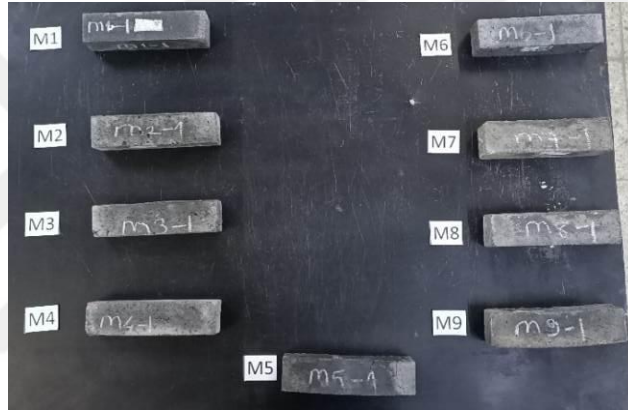
Şekil 4.17 Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası ağırlık kaybı

4.5.3 Görsel Görünüm

AAC numunelerinin 800°C'ye maruz kaldıktan sonraki genel görünümü Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Bu sıcaklık seviyesi, malzeme bozunmasına neden olmuştur. Numuneler belirgin şekilde koyulaşmış olup, bu durum büyük olasılıkla faz dönüşümü, dehidrasyon reaksiyonları ve yüksek sıcaklıklarda karbonizasyon etkileri ile ilişkilidir. Yüzey dokusu daha pürüzlü hale gelmiş olup, bu durum mikro yapısal

bozulmaya işaret etmektedir; küçük çatlaklar ve kenar aşınmaları, ısı yüklemesi nedeniyle meydana gelen genleşme ve büzülme gerilmelerinin sonucu olabilir.

Bununla birlikte, büyük ölçüde sıçrama (spalling) veya parçalanma olmaması, kompozit matrisin belli bir yapısal bütünlüğünü koruduğunu göstermektedir. Ancak yüzeydeki çatlakların ve renk değişimlerinin varlığı, mekanik performansı ciddi şekilde zayıflatabilecek bazı iç bozulmalara işaret edebilir. Bu nedenle, bozunmanın derecesini niceliksel olarak belirlemek ve görsel hasar ile basınç dayanımı kaybı arasındaki ilişkiyi doğrulamak amacıyla mikroskobik analizler ve mekanik dayanım testleri yapılmalıdır.



Şekil 4.18 800°C sonrası görsel görünüm

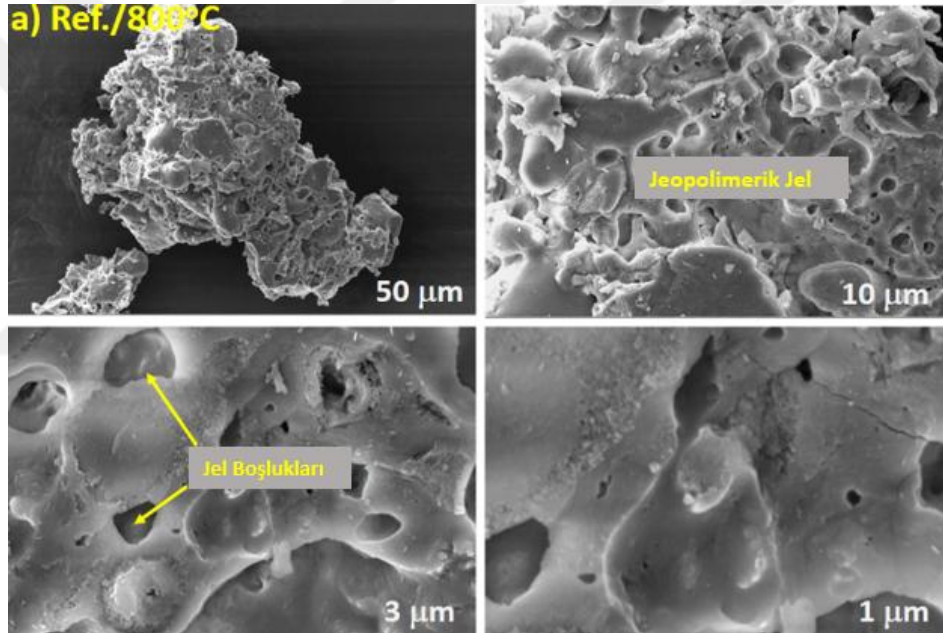
4.5.4 Mikro Yapısal Değişimler (800°C Sonrası)

Şekil 4.19; 800°C'ye maruz kalan referans karışımın (100% GBFS) SEM görüntüsünü göstermektedir ve bu durum %72,4'lük bir dayanım kaybıyla ilişkilendirilen ciddi mikro yapısal bozulmayı ortaya koymaktadır. Yüksek sıcaklığa maruz kalma, yaygın mikro çatlaklara, artan gözenekliliğe ve bağlayıcı fazın bozulmasına yol açarak bileşiğin yapısal bütünlüğünü önemli ölçüde zayıflatmaktadır. Gözlemlenen çatlaklar, matris içindeki farklı fazların farklı oranlarda genleşmesiyle ortaya çıkan termal genleşme uyumsuzluklarından kaynaklanabilir ve bu durum malzemeyi zayıflatan iç gerilmeler oluşturur.

Ayrıca, mekanik dayanım açısından kritik olan C-S-H ve C-A-S-H bağlayıcı fazları, kademeli olarak susuzlaşır ve çöker, bu da kohezyon kaybına ve artan kırılabilirliğe

neden olur (Bayraktar, vd., 2023). Fiziksel ve kimyasal olarak bağlı suyun buharlaşması, boşluk oluşumuna katkıda bulunarak gözenekliliği artırır ve yük taşıma kapasitesini düşürür (Bayrak, vd., 2023; Gencil, vd., 2022). Ek olarak, amorf fazların kristalleşmesi veya kısmi camlaşma gibi olası faz dönüşümleri, mekanik özellikleri değiştirerek dayanım kaybını hızlandırabilir.

Bu bulgular, GBFS bazlı alkali aktivasyonlu bileşiklerin aşırı termal koşullar altında kırılğan hale geldiğini vurgulamakta ve yüksek sıcaklık direncini artırmak için optimize edilmiş formülasyonlar, termal stabilizatörler veya alternatif bağlayıcı sistemlerin kullanılmasının gerekliliğine işaret etmektedir.



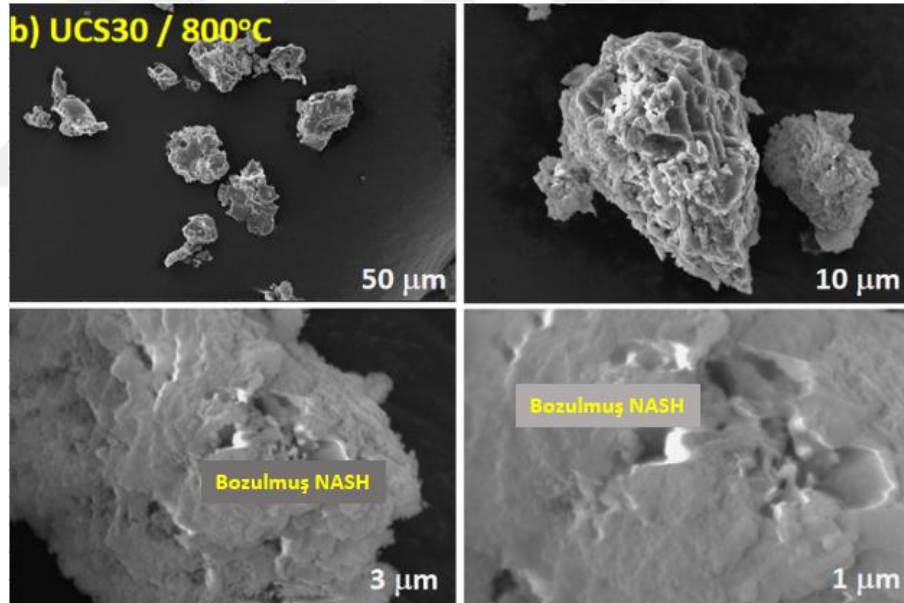
Şekil 4.19 Yüksek sıcaklığa (800°C) maruz kalan Referans numunelerin mikro yapısı

Şekil 4.20; %30 UCS ve %70 GBFS içeren AAC karışımının 800°C'ye maruz kalması sonrası elde edilen SEM görüntüsünü göstermektedir. Bu görüntü, referans karışıma (%72,4) kıyasla daha yüksek olan %77,7'lik bir dayanım kaybına karşılık gelen ciddi mikro yapısal bozulmayı ortaya koymaktadır. Artan dayanım kaybı, yaygın mikro çatlaklar, daha yüksek gözeneklilik ve zayıf faz stabilitesi ile ilişkilendirilebilir; bu faktörler mekanik performansı ciddi şekilde olumsuz etkilemektedir.

UCS'nin içeriğindeki daha iri ve daha az reaktif partiküller, matris bütünlüğünü bozarak termal genişleme uyumsuzluklarına yol açmakta ve çatlak yayılımını

artırmaktadır. Ayrıca, UCS yüksek oranda bağlı su içermekte olup, bu su yüksek sıcaklıklarda buharlaşarak boşluklar oluşturmakta ve mikro yapıyı daha da zayıflatmaktadır. C-S-H ve C-A-S-H bağlayıcı fazları önemli ölçüde susuzlaşarak çökmekte ve yük taşıma kapasitesini azaltmaktadır. Bunun yanı sıra, portlandit ve kalsit fazlarının bozunması kütle kaybını hızlandırarak gözenekliliğin artmasına neden olmaktadır (Mendes, vd., 2007).

Ek olarak, UCS tam olarak tepkimeye girmemiş veya kısmen tepkimeye girmiş bileşenler içerebilir, bu da matrisin daha az yoğun hale gelmesine ve termal direncinin daha da azalmasına neden olmaktadır. Bu bulgular, yüksek UCS içeriğinin termal stabiliteyi olumsuz etkilediğini ve AAC karışımlarında mekanik dayanım ile yangına dayanıklılığı dengelemek için optimize edilmiş ikame seviyelerinin gerekli olduğunu göstermektedir.

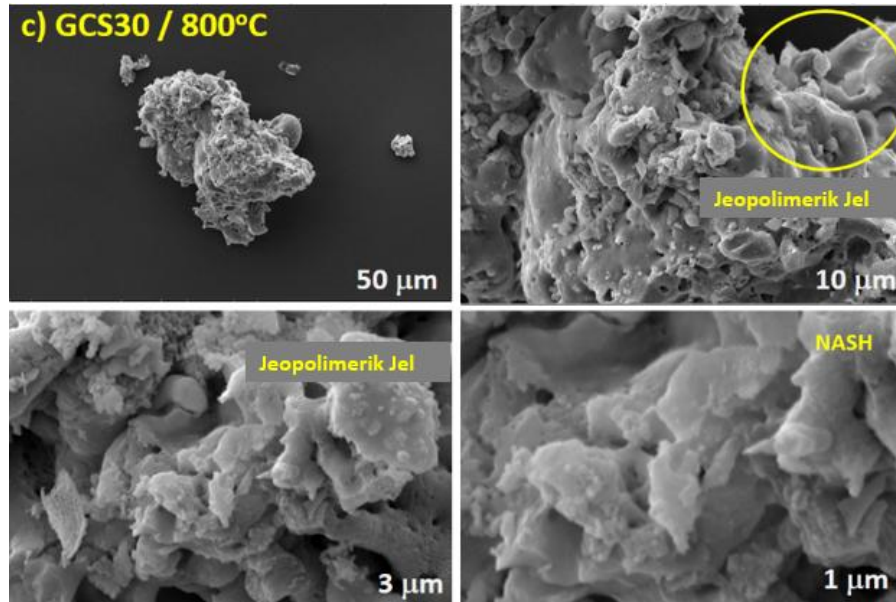


Şekil 4.20 Yüksek sıcaklığa (800°C) maruz kalan UCS30 numunelerin mikro yapısı

Şekil 4.21; %30 öğütülmüş beton çamuru (GCS) ve %70 GBFS içeren AAC karışımının 800°C'ye maruz kalması sonrası elde edilen SEM görüntüsünü göstermektedir. Bu karışım, referans karışıma (%72,4) kıyasla daha yüksek, ancak UCS30 karışımına (%77,7) göre daha düşük olan %75,4'lük bir dayanım kaybına uğramıştır. Gözlemlenen bozulma, büyük ölçüde artan gözeneklilik, mikro çatlak oluşumu ve faz bozunmasına bağlanmaktadır; bu faktörler mekanik performans üzerinde olumsuz etkilere sahiptir.

UCS ile karşılaştırıldığında, GCS partikülleri daha ince ve daha homojen dağılmış olup, partikül paketlenme verimliliğini artırarak büyük boşlukları azaltma potansiyeline sahiptir. Ancak, yüksek sıcaklıklarda malzeme yine de önemli bir bozulma göstermektedir. GBFS ve GCS fazları arasındaki termal genişleme uyumsuzluğu, iç gerilmeler oluşturarak çatlak oluşumuna ve yapısal istikrarsızlığa yol açmaktadır. Ayrıca, C-S-H ve C-A-S-H bağlayıcı fazları ciddi derecede susuzlaşarak çökmekte ve matrisin kohezyonunu zayıflatarak basınç dayanımının düşmesine neden olmaktadır.

Fiziksel ve kimyasal olarak bağlı suyun buharlaşması, GCS içindeki küçük karbonat fazlarının olası bozunmasıyla birleşerek gözeneklilik gelişimini hızlandırmakta ve dayanım kaybını artırmaktadır. Tüm bu olumsuz etkilere rağmen, UCS30 karışımına kıyasla daha düşük dayanım kaybı, GCS'nin daha ince partikül boyutu ve muhtemelen daha yüksek reaktivitesi sayesinde daha yoğun bir matris oluşturabileceğini ve termal bozunmayı kısmen azaltabileceğini göstermektedir. Ancak, yine de önemli ölçüde dayanım kaybı yaşanması, yüksek GCS içeriğinin termal stabiliteyi olumsuz etkilediğini ve AAC karışımlarında yangına dayanıklılığı artırmak için optimize edilmiş ikame seviyelerinin gerekli olduğunu ortaya koymaktadır.



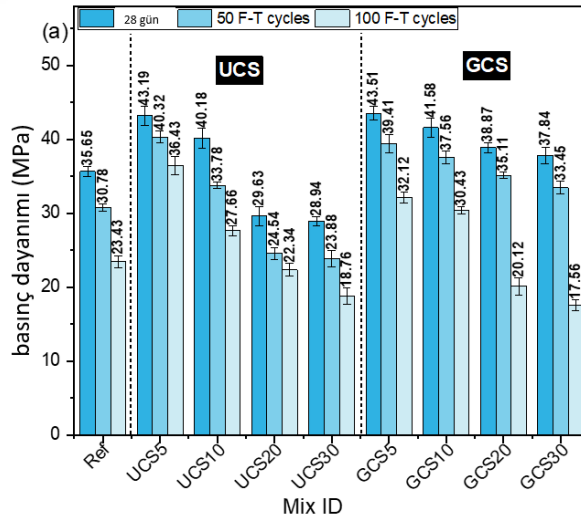
Şekil 4.21 Yüksek sıcaklığa (800°C) maruz kalan GCS30 numunelerinin mikro yapısı

4.6 Donma Çözünme

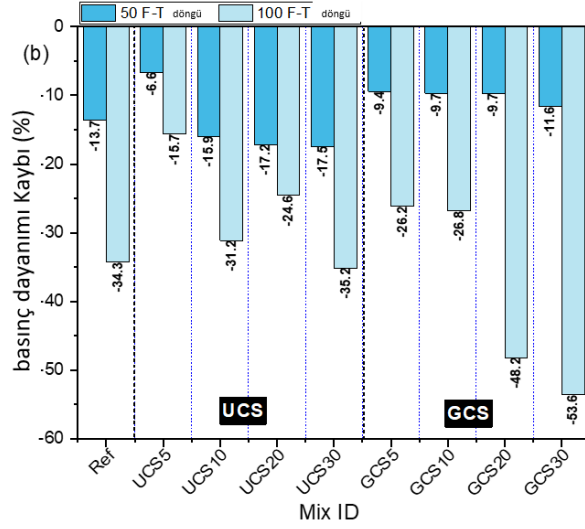
4.6.1 Basınç Dayanımı

Şekil 4.22; 28 gün kürlenme süresinin ardından 50 ve 100 donma-çözülme (D-Ç) döngüsüne maruz bırakılan AAC karışımlarının basınç dayanımının, %5; %10; %20 ve %30 seviyelerinde UCS veya GCS ile değiştirilmesinin etkisini göstermektedir. Sonuçlar, tüm karışımların D-Ç döngüleri nedeniyle basınç dayanımında bir azalma yaşadığını; 50 döngü sonrası dayanım kayıplarının %6,6 ile %17,5 arasında; 100 döngü sonrası ise %15,7 ile %53,6 arasında değiştiğini göstermektedir. Bu durum, donma ve çözülmenin AAC kompozitlerinin mikroyapısal bütünlüğü üzerindeki olumsuz etkisini vurgulamaktadır (Şekil 4.23). %5 UCS içeren karışım, hem 50 hem de 100 D-Ç döngüsünde en düşük dayanım kaybını sergilemiş olup, sınırlı UCS katkısının daha yoğun ve daha birleşik bir matris oluşturarak mikro çatlama ve nem sızmasına karşı direnci artırdığını göstermektedir (Sun, vd., 2022). Diğer yandan; %30 UCS içeren karışım, 50 döngü sonrası en yüksek dayanım kaybını göstererek, aşırı UCS değişiminin D-Ç direncini olumsuz yönde etkileyebileceğini, bunun büyük olasılıkla artan porozite ve zayıf arayüz bağlanması nedeniyle, buzla genişlemenin ve mikro çatlakların yayılmasını kolaylaştırdığına işaret etmektedir (Gencel, vd., 2021; Kaplan, vd., 2021). 100 D-Ç döngüsü sonrası, %30 GCS içeren karışım en büyük dayanım kaybını göstermiştir; bu, uzun süreli maruz kalma durumunda GCS'nin yüksek özgül yüzey alanı ve olası reaksiyona girmemiş fazlarının, nem emilimini hızlandırarak yapısal bozulmayı arttırabileceğini düşündürmektedir. Referans karışımı, sırasıyla 50 ve 100 D-Ç döngüsü sonrası %13,7 ve %34,3 dayanım kaybı göstermiştir, bu da ilerleyen mekanik bozulmayı göstermektedir. %10; %20 ve %30 UCS içeren AAC karışımları, 100 D-Ç döngüsü sonrası sırasıyla %31,2; %24,6 ve %35,2 dayanım kaybı göstermiştir, bu da yüksek UCS içeriğinin D-Ç duyarlılığını artırdığını düşündürmektedir. %30 UCS karışımı, daha yüksek porozite, zayıf matris birleşmesi ve artan mikro çatlaklar nedeniyle en şiddetli dayanım kaybını yaşamıştır. İlginç bir şekilde, %20 UCS içeren karışım, %10 UCS içeren karışımdan daha iyi performans göstermiştir, bu da matris yoğunlaşmasının iyileşmiş olabileceğini düşündürmektedir. Ancak, %30 UCS içeriğinde, aşırı porozite ve reaksiyona girmemiş fazlar, olası faydaları gölgeleyerek önemli bir bozulmaya yol açmıştır.

%5; %10; %20 ve %30 GCS içeren AAC karışımları, 100 D-Ç döngüsü sonrası sırasıyla %26,2; %26,8; %48,2 ve %53,6 dayanım kaybı göstermiştir; bu, GCS içeriği arttıkça D-Ç kaynaklı bozulmanın giderek daha büyük hale geldiğini göstermektedir. Referans karışımına (34,3%) kıyasla; %5 ve %10 GCS içeren karışımlar daha düşük dayanım kaybı göstermiştir, bu da düşük GCS katkısının matris yoğunlaşmasını artırarak D-Ç direncini iyileştirdiğini göstermektedir. Ancak, daha yüksek yerine koyma seviyelerinde (20% ve 30%), dayanım kaybı referans karışımını aşmış ve %30 GCS içeren karışım en büyük bozulmayı (53,6%) göstermiştir, hatta %30 UCS karışımını (35,2%) bile geçmiştir. Bu önemli bozulma, artan porozite, zayıf matris birleşmesi ve yüksek su emme kapasitesine bağlanabilir; bu da nem sızmasını ve buzla kaynaklanan mikro çatlamları kolaylaştırır. Yüksek yerine koyma seviyelerinde GCS içeren karışımlarda gözlemlenen dayanım kaybının, UCS içeren karışımlara göre daha belirgin olması, ince öğütülmüş GCS'nin reaktiviteyi artırsa da aşırı değiştirilmesinin yapısal bütünlüğü bozarak kötü D-Ç dayanıklılığına yol açtığını göstermektedir. Bu bulgular, GCS içeriğinin optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır, çünkü aşırı katkı, AAC kompozitlerinin donma-çözülme direncini ciddi şekilde zayıflatabilir.



Şekil 4.22 Basınç dayanımı



Şekil 4.23 15 ve 30 D-Ç döngüsüne maruz kalma sonrası dayanım azalması

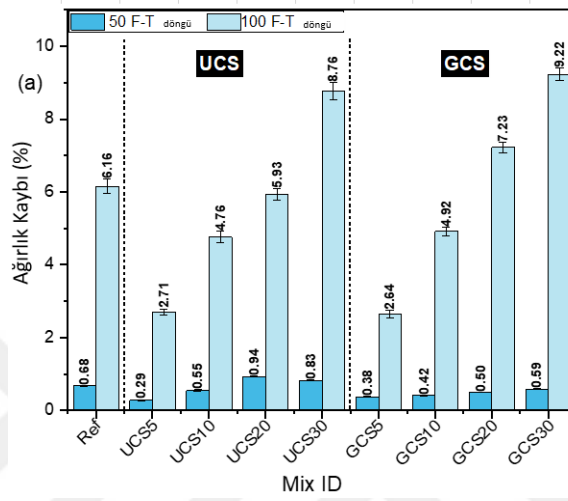
4.6.2 Donma-Çözülme Maruziyeti Sonrası Ağırlık Değişimi

Şekil 4.24; 28 gün kürlenme süresinin ardından 50 ve 100 D-Ç döngüsüne maruz bırakılan AAC karışımlarının ağırlık kaybı üzerindeki UCS veya GCS ile %5; %10; %20 ve %30 seviyelerinde yapılan değiştirmenin etkisini göstermektedir. Sonuçlar, tüm karışımların D-Ç döngüleri nedeniyle ağırlık kaybında bir artış gösterdiğini, 50 döngü sonrası %0,29 ile %0,94 arasında, 100 döngü sonrası ise %2,71 ile %9,22 arasında değişen değerlerle, tekrar eden donma ve çözülmenin neden olduğu ilerleyici bozulmayı vurguladığını göstermektedir. %5 UCS içeren karışım, hem 50 hem de 100 D-Ç döngüsünde en düşük ağırlık kaybını sergileyerek, düşük UCS içeriğinin daha yoğun, daha birleşik bir matris oluşturarak nem emilimini azaltmaya ve donma-çözülme maruziyeti sırasında kütle kaybını en aza indirmeye katkı sağladığını göstermektedir. Diğer taraftan; %20 UCS içeren karışım; 50 D-Ç döngüsünde en yüksek ağırlık kaybını sergilemiş olup, bunun artan porozite ve zayıf parçacık bağlanmasından kaynaklandığı, bunun da buzla genişlemeyi ve mikroyapısal bozulmayı kolaylaştırdığı düşünülmektedir. 100 D-Ç döngüsüne maruz bırakılan karışımlar arasında gözlemlenen en yüksek ağırlık kaybı, %30 GCS içeren karışımdır. Bu durum, GCS'nin daha yüksek oranda kullanılmasıyla artan porozite ve nemin içeriye sızmasına daha büyük bir duyarlılık oluşturduğunu ve bunun da zamanla daha büyük kütle kayıplarına yol açtığını göstermektedir. Bu bulgular, orta seviyelerde UCS ve GCS katkısının, matris yoğunlaşmasını artırarak D-Ç direncini iyileştirebileceğini, ancak daha yüksek yerine koyma oranlarının (\geq %20) genel dayanımı olumsuz

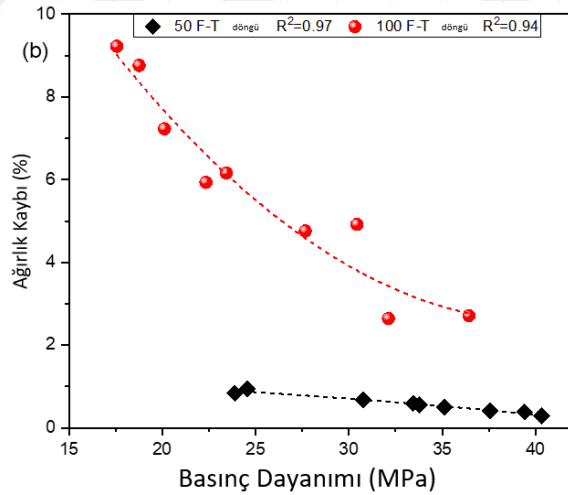
etkileyerek gözlemlenen daha büyük kütle kayıplarına yol açtığını önermektedir. Daha yüksek GCS yüzdesindeki ek kütle kaybı, muhtemelen daha düşük bağlayıcı faz içeriği, artan gözenek bağlantısı ve D-Ç hasarına karşı dirençteki azalma ile ilişkilidir, bu da AAC'nin dayanıklılığı ve mekanik performansı için UCS ve GCS yerine koyma seviyelerinin optimize edilmesi gerektiğini daha da vurgulamaktadır. Referans karışımı, sırasıyla 50 ve 100 D-Ç döngüsünden sonra %0,68 ve %6,16 ağırlık kaybı göstermiştir ve bu, nem emilimi, buz genişlemesi ve mikroyapısal bozulma yoluyla kümülatif kütle kaybını göstermektedir. %10; %20 ve %30 UCS içeren karışımlar, 100 D-Ç döngüsü sonrası sırasıyla %4,76; %5,93 ve %8,76 ağırlık kaybı göstermiştir, bu da UCS içeriği arttıkça ağırlık kaybının arttığını, bunun da artan porozite, zayıf parçacık sıkıştırması ve azalmış matris birleşme faktörlerinden kaynaklanabileceğini düşündürmektedir (Bayraktar, vd., 2023).

Benzer şekilde; %5; %10; %20 ve %30 GCS içeren karışımlar; 100 D-Ç döngüsü sonrası sırasıyla %2,64; %4,92; %7,23 ve %9,22 ağırlık kaybı göstermiştir. Düşük yerine koyma seviyelerinde, GCS içeren karışımlar UCS içeren karışımlara kıyasla daha düşük ağırlık kaybı göstermiştir, bu da GCS'nin matris yoğunlaşmasını daha etkili bir şekilde artırarak nemin içeriye sızmasını azalttığını ve D-Ç direncini iyileştirdiğini göstermektedir. Ancak, daha yüksek yerine koyma seviyelerinde, hem UCS hem de GCS içeren karışımlar önemli ölçüde daha büyük ağırlık kayıpları göstermiştir, %30 GCS içeren karışım (9,22%) %30 UCS içeren karışımdan (8,76%) biraz daha fazla kütle kaybı yaşamıştır, bu da aşırı GCS yerine koymanın daha yüksek poroziteye ve nem kaynaklı bozulmaya daha büyük bir duyarlılığa yol açtığını göstermektedir. GCS, düşük yerine koyma seviyelerinde parçacık sıkıştırmasını iyileştirirken, aşırı yerine koyma, reaktif bağlayıcı fazların fazla seyrelmesine neden olarak mikroyapısal zayıflıkları artırır ve D-Ç kaynaklı bozulmaya yol açar (Bayraktar, vd., 2023). Hem UCS hem de GCS yerine koymalarının yüksek seviyelerde D-Ç dayanıklılığını olumsuz etkilediği görülmektedir, ancak düşük GCS katkısı ($\leq\%10$); UCS'ye kıyasla kütle kaybını azaltmada daha etkili görünmektedir. Ancak, $\geq\%20$ yerine koyma seviyelerinde, her iki malzeme de ağırlık kaybında belirgin bir artış göstermekte, bu da AAC karışımlarında mekanik bütünlük ile donma-çözülme direncini dengelemek için yerine koyma seviyelerinin optimize edilmesi gerektiğini pekiştirmektedir. Şekil 4.25; 50 ve 100 D-Ç döngülerine maruz bırakılan AAC

karışımlarında basınç dayanımı ile ağırlık kaybı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Net bir ters korelasyon gözlemlenmektedir; 50 döngü için $R^2 = 0,97$ ve 100 döngü için $R^2 = 0,94$ ile güçlü bir belirleme katsayısı elde edilmiştir, bu da ağırlık kaybının D-Ç maruziyeti altında dayanım bozulmasının güvenilir bir öngörücüsü olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.24 Ağırlık kaybı

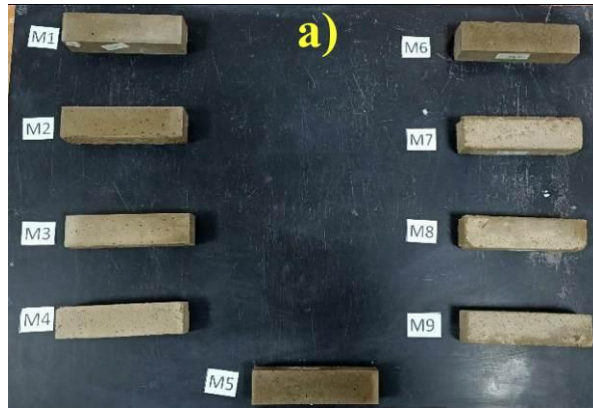


Şekil 4.25 Dayanım ve ağırlık kaybı arasındaki ilişki D-Ç döngülerinden sonra

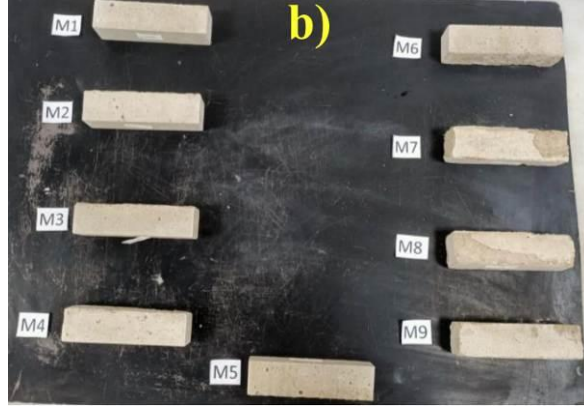
4.6.3 Görsel Görünüm

Şekil 4.26 ve Şekil 4.27; AAC numunelerinin 50 ve 100 donma-çözülme (D-Ç) döngüsüne maruz kaldıktan sonraki görsel bozulmasını göstermektedir ve döngüsel donma ve çözülmenin yüzey bütünlüğü ve yapısal stabilite üzerindeki ilerleyici etkisini ortaya koymaktadır. 50 döngü sonrası, yüzey pürüzlülüğü, küçük çatlaklar ve

ilk ölçeklenme gibi bozulmanın erken belirtileri görünür hale gelir, bu da mikroyapısal bozulmanın başlangıcını işaret eder. Bu değişiklikler, gözenek ağındaki hapsolmuş nemin tekrarlanan genişlemesi ve büzülmesinden kaynaklanır, bu da içsel çekme gerilmeleri oluşturur ve mikro çatlak oluşumunu başlatır. Döngü sayısı 100'e çıktıkça, hasarın şiddeti artar, daha belirgin yüzey ölçeklenmesi, derinleşmiş çatlak yayılması ve malzeme ayrılması gözlemlenir, bu da uzun süreli donma-çözülme maruziyetinin yapısal bozulmayı hızlandırdığını düşündürmektedir. Yüzey birleşmesinin kaybı ve gevşek parçacıkların varlığı, bağlayıcı fazın ilerleyici çözülmesini gösterir, özellikle daha yüksek UCS ve GCS içeriğine sahip karışımlarda, bunlar daha yüksek porozite ve zayıf arayüz bağlanması sergileyerek bu tür bozulmalara daha duyarlıdır. Görülen hasarın boyutu, GBFS'nin UCS veya GCS ile aşırı değiştirilmesinin donma-çözülme duyarlılığını artırdığını, çünkü daha yüksek porozitenin daha fazla nemin içeriye sızmasına olanak tanıyarak buzla genişleme ve çatlak yayılmasını artırdığına işaret etmektedir. Daha yüksek UCS veya GCS içeriği içeren numuneler, düşük matris birleşmesi ve daha düşük jeopolimerleşme verimliliği nedeniyle daha geniş yüzey aşınması ve ölçeklenme sergileyebilir, bu da uzun vadeli dayanıklılığı zayıflatır. Gözlemlenen bozulma desenleri, karışım bileşimini optimize etmenin, mekanik performans ile donma-çözülme direncini dengelemenin önemini vurgulamaktadır, çünkü aşırı alternatif malzeme içeriği, döngüsel donma ve çözülme koşullarında hızlı bozulmalara yol açabilir. Bu bulgular, donma-çözülme kaynaklı hasarı azaltmak ve alkali aktive kompozitlerin zorlu çevresel koşullarda hizmet ömrünü uzatmak için yüzey kaplama, fiber takviyesi veya ek çimento malzemelerinin entegrasyonu gibi ek dayanıklılık artırıcı stratejiler kullanma gerekliliğini vurgulamaktadır.



Şekil 4.26 50 donma-çözülme (D-Ç) döngüsünden sonra görsel görünüm

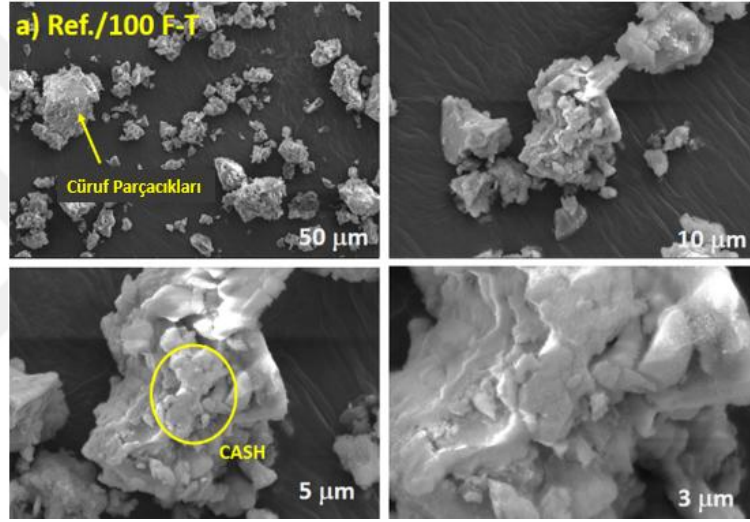


Şekil 4.27 100 donma-çözülme (D-Ç) döngüsünden sonra görsel görünüm

4.6.4 100 D-Ç Döngüsünden Sonra Mikroyapısal Değişiklikler

Şekil 4.28; 100 donma-çözülme (D-Ç) döngüsünden sonra referans karışımının (100% GBFS) SEM görüntüsünü sunmakta olup, ilerleyici mikroyapısal bozulma nedeniyle %34,3'lük bir dayanım kaybını vurgulamaktadır. Başlangıçta yoğun ve iyi sıkıştırılmış bir matrise sahip olmasına rağmen, referans karışımı D-Ç kaynaklı hasarın açık belirtilerini göstermektedir, bunlar arasında mikro çatlaklar, artan porozite ve bağlayıcı fazın kısmi çözülmesi yer almaktadır. Bu yapısal değişiklikler, gözenek yapısındaki hapsolmuş nemin döngüsel genişlemesi ve büzülmesinin bir sonucu olarak ortaya çıkmakta olup, içsel çekme gerilmeleri üretir, bu da çatlak oluşumu ve yayılmasına yol açar. Gözlemlenen mikro çatlaklar birbirine bağlı görünmekte olup, tekrar eden D-Ç döngülerinin, jeopolimer ağının bütünlüğünü kademeli olarak bozduğunu göstermektedir. Genişleyen çatlaklar ve arayüzel kusurların varlığı, donma-çözülme döngülerinin matris bütünlüğünü bozarak daha derin nemin içeriye sızmasına olanak tanıdığını ve bunun da çatlak büyümesini ve yapısal zayıflamayı artırdığını göstermektedir. Ayrıca, SEM analizi, alkali aktive malzemelerde mekanik dayanım için kritik olan C-S-H ve C-A-S-H fazlarının kısmi bozulma ve parçalanmaya uğradığını ortaya koymaktadır. Bu bozulma, bağlayıcı birleşmeyi zayıflatarak parçacıkların ayrılmasına ve mikro boşlukların oluşmasına yol açmakta, böylece mekanik performansı daha da düşürmektedir. Mikroyapıda gözlemlenen artan porozite, uzun süreli D-Ç maruziyetinin gözenek bağlantısını artırdığını, sonraki döngülerde nemin içeriye sızmasını kolaylaştırdığını ve içsel hasarı hızlandırdığını göstermektedir. Ayrıca, bağlayıcı ve agregat arasındaki arayüzel geçiş bölgeleri (ITZ'ler) daha poroz hale gelmekte ve zayıflamakta, bu da genel parçacık bağlarını

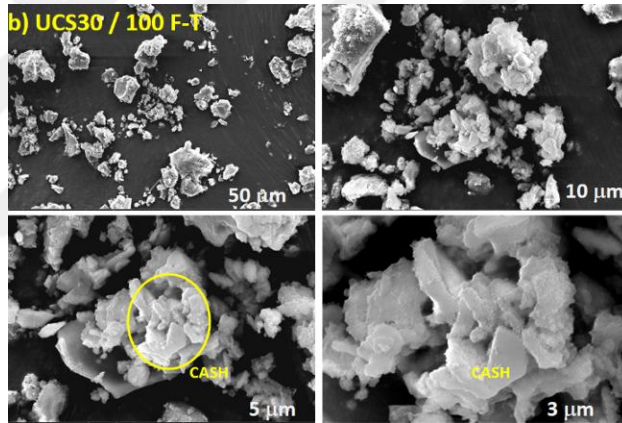
azaltmakta ve dayanım kaybına katkıda bulunmaktadır. Referans karışımı, UCS30 ve GCS30'a kıyasla daha kompakt bir yapıyı korusa da, belirgin dayanım azalması, GBFS bazlı alkali aktive kompozitlerin uzun süreli donma-çözülme maruziyetine karşı duyarlılığını vurgulamaktadır. Elde edilen bulgular, GBFS'nin yoğun mikroyapısı nedeniyle başlangıçta D-Ç hasarına karşı direnç sunduğunu, ancak bağlayıcı fazların ilerleyici bozulması ve çatlak yayılmasının artmasıyla nihayetinde dikkate değer mekanik bozulmalara yol açtığını ve donma-çözülme direncini artırmak için optimize edilmiş karışım tasarımı, fiber takviyesi veya yüzey işlemleri gibi ek dayanıklılık artırıcı stratejilere duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır.



Şekil 4.28 100 donma-çözülme (D-Ç) döngüsünden sonra referans karışımının (100% GBFS) SEM görüntüsü

Şekil 4.29; 100 donma-çözülme (D-Ç) döngüsünden sonra %30 UCS içeren AAC karışımının SEM görüntüsünü sunmaktadır. Bu karışım, önemli mikroyapısal bozulma nedeniyle %35,2'lik bir dayanım kaybı göstermektedir. Referans karışımıyla karşılaştırıldığında (%34,3 dayanım kaybı), bu bileşim daha geniş mikro çatlaklar, artan porozite ve zayıf matris birleşmesi sergileyerek, daha yüksek UCS katkısının donma-çözülme direncini azalttığını göstermektedir. UCS'nin daha iri ve daha az reaktif doğası, yüksek su emme kapasitesi ile birleşerek daha fazla nemin içeriye sızmasına ve buzla genişlemeye yol açar; bu da çatlak oluşumunu hızlandırır ve yapısal zayıflamayı tetikler. Döngüsel donma-çözülme süreci içsel gerilmeler oluşturarak, ilerleyici çatlak yayılmasına, bağlayıcı bütünlüğünün kaybına ve boşluk bağlantısının artmasına neden olur. UCS'nin GBFS'ye kıyasla daha düşük silika (SiO_2) ve alümina

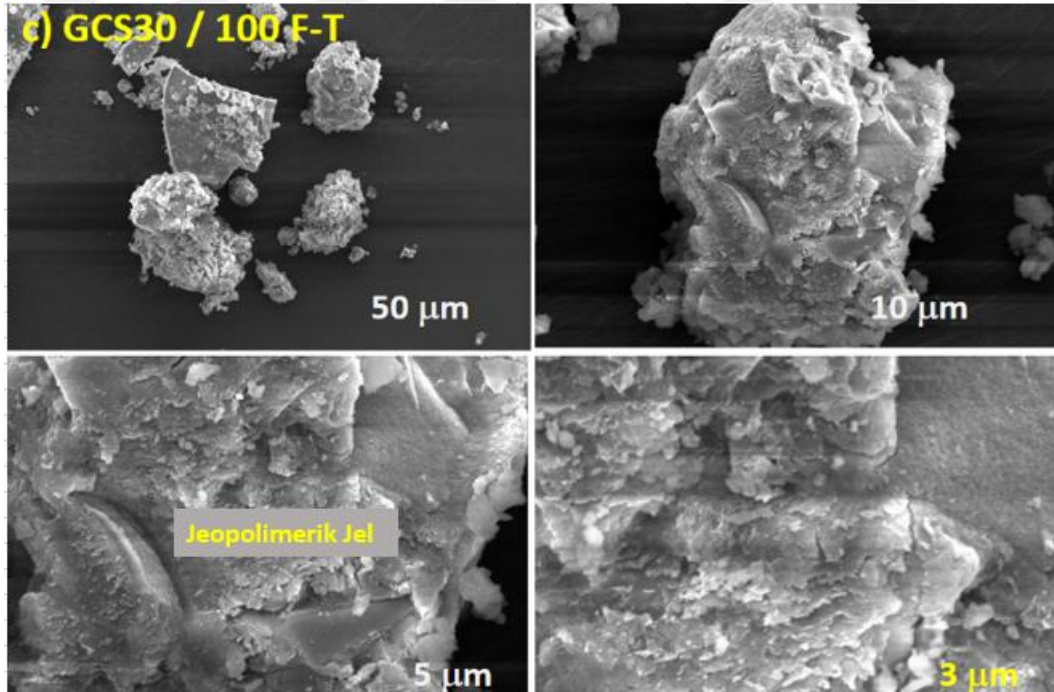
(Al₂O₃) içeriği, daha az jeopolimerik reaksiyon ürünü oluşumuna yol açar, bu da daha az kompakt ve daha zayıf bir matris oluşturur. Reaktif olmayan UCS parçacıkları ve gevşek bağlı fazların varlığı, yüksek UCS ikamesi seviyelerinde bağlayıcı fazın daha poroz hale geldiğini ve yapısal olarak daha dengesiz olduğunu gösterir; bu da malzemeyi donma-çözülme kaynaklı hasara karşı daha duyarlı hale getirir. Referans karışımına kıyasla daha büyük dayanım kaybı, aşırı UCS içeriğinin ($\geq\%30$) AAC kompozitlerinin donma-çözülme dayanıklılığını olumsuz yönde etkilediğini, çünkü porozitenin artması ve jeopolimerleşme verimliliğinin azalmasının, malzemenin döngüsel sıcaklık ve nem değişimlerine karşı direncini zayıflattığını göstermektedir. Donma-çözülme direncini artırmak için, UCS ikame seviyelerinin optimize edilmesi ve güç kaybını azaltmak ve uzun vadeli dayanıklılığı artırmak için iyileştirilmiş parçacık sıkıştırması veya stabilize edici katkı maddeleri gibi ek stratejiler gerekebilir.



Şekil 4.29 100 donma-çözülme (D-Ç) döngüsünden sonra %30 UCS içeren AAC karışımının SEM görüntüsü

Şekil 4.30; 100 donma-çözülme (D-Ç) döngüsünden sonra %30 GCS içeren AAC karışımının SEM görüntüsünü sunmaktadır ve test edilen örnekler arasında en şiddetli mikroyapısal bozulmayı göstermektedir; %53,6'lık bir dayanım kaybı ile. Bu önemli mekanik performans düşüşü, büyük ölçüde yaygın mikro çatlaklar, artan porozite ve bağlayıcı fazın belirgin şekilde çözülmesiyle ilişkilidir. Döngüsel donma ve çözülme süreci, gözenek yapısındaki nemin genişlemesi nedeniyle içsel çekme gerilmeleri oluşturur, bu da çatlakların ilerleyerek genişlemesine ve birleşmesine yol açar. Referans karışımı ve UCS30 karışımına kıyasla, GCS30 örneği daha parçalanmış ve poroz bir matris sergileyerek, yüksek GCS içeriğinin jeopolimer ağının yapısal bütünlüğünü bozduğunu ve malzemeyi D-Ç kaynaklı bozulmaya karşı daha duyarlı

hale getirdiğini göstermektedir. SEM analizi, GBFS'nin aşırı GCS ile değiştirilmesinin, gevşek bağlı reaksiyon ürünlerinin ve reaktif olmayan parçacıkların varlığını artırarak, C-S-H ve C-A-S-H fazları arasındaki bağlamayı zayıflattığını göstermektedir. Ayrıca, GCS'nin daha ince parçacık boyutu, başlangıçtaki matris yoğunlaşmasını faydalı hale getirmiş olsa da, yüksek ikame seviyelerinde arayüzsel kusurlar ve mikro boşlukların sayısını artırmış gibi görünmektedir; bu da daha derin nemin içeriye sızmasını kolaylaştırmakta ve hasar yayılmasını hızlandırmaktadır. GCS30 karışımındaki daha belirgin dayanım kaybı, UCS30'a kıyasla, GCS'nin daha ince parçacıkları ve artan reaktivitesi sayesinde erken aşama dayanım gelişimine katkıda bulunsa da, donma-çözülme koşullarında uzun vadeli dayanıklılığının, yüksek nem duyarlılığı ve azalmış matris stabilitesi nedeniyle bozulduğunu ima etmektedir. Bu, GCS ikame seviyelerinin optimize edilmesinin, mekanik performans ve donma-çözülme direncini dengelemenin gerekliliğini vurgulamaktadır, çünkü aşırı entegrasyon, poroziteyi artırarak, çatlak oluşumunu çoğaltarak ve malzemenin döngüsel termal dalgalanmalara karşı dayanıklılığını azaltarak dayanıklılığı önemli ölçüde bozar.



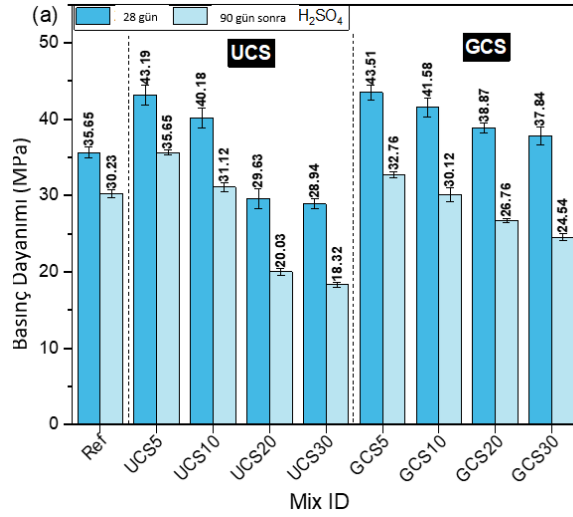
Şekil 4.30 100 donma-çözülme (D-Ç) döngüsünden sonra %30 GCS içeren AAC karışımının SEM görüntüsü

4.7 Asidik ve Magnezyum Sülfat (MgSO₄) Etkisi

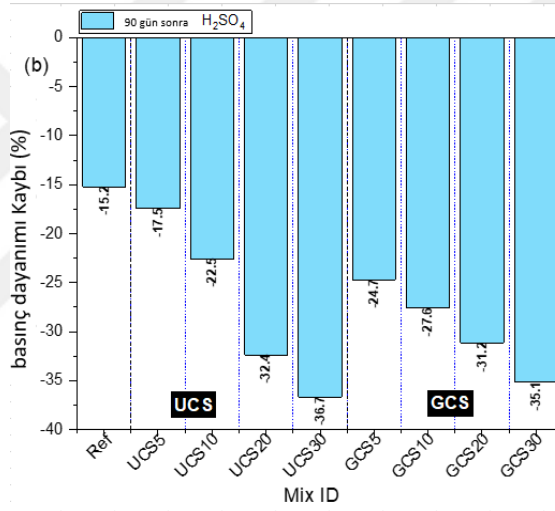
4.7.1 Kompresif Dayanım

Şekil 4.13a; 28 gün kürlenme sonrası %5; %10; %20 ve %30 UCS veya GCS ile GBFS ikamesinin, ardından %10 H₂SO₄ çözeltisine maruz bırakılan AAC karışımlarının kompresif dayanım üzerindeki etkisini göstermektedir. Sonuçlar, tüm karışımların asidik saldırı nedeniyle kompresif dayanımda azalma yaşadığını, dayanım kayıplarının %15,2 ile %36,7 arasında değiştiğini göstermektedir (Şekil 4.12b). Referans karışımı (%100 GBFS), en düşük dayanım kaybını göstererek sülfürik asit maruziyetine karşı üstün direnç sergilemiştir. Öte yandan; %30 UCS içeren karışım, en yüksek dayanım kaybını göstermiştir, bu da kimyasal stabilitesinde belirgin bir bozulma olduğunu göstermektedir. UCS içeren karışımların artan hassasiyetinin, daha yüksek kalsiyum oksit içeriği nedeniyle asit duyarlı hidrasyon ürünlerinin, örneğin portlandit ve C-S-H'nin, asidik ortamlarda çözünmeye duyarlı olmasından kaynaklandığı düşünülebilir. Sülfürik asidin kalsiyum zengin fazlarla reaksiyonu, jips ve ettringit gibi genişleyici ve zayıf bağlanmış ikincil ürünlerin çökmesine yol açar; bu, kısa vadede gözenek iyileşmesine neden olabilir, ancak nihayetinde içsel genişleme ve yapısal dengesizlik nedeniyle mikro çatlaklar ve dayanım kaybına yol açar (Izzat, vd., 2013). Ayrıca, UCS'nin karışıma dahil edilmesi, matrisin porozitesini artırarak, daha derin asit penetrasyonunu kolaylaştırır ve bağlayıcı fazın bozulmasını hızlandırır. Diğer taraftan, yalnızca GBFS içeren karışım, kimyasal stabiliteyi koruyarak asit kaynaklı yıkama ve çözünmeye karşı çok yüksek direnç gösterir, bunun başlıca nedeni, alüminosilikat tabanlı bağlayıcı fazı olan C-A-S-H'dir. GCS içeren karışımlar ise, aşırı GCS ikamesinin uzun vadeli kimyasal stabilitenin azalması nedeniyle asit direncinde bir düşüş göstererek, ara seviyelerde dayanım kayıpları yaşar. İnce parçacık dağılımlarının matris yoğunluğunu iyileştirdiği, ancak aşırı GCS'nin jeopolimerizasyon verimliliğini olumsuz etkileyerek asit direncini azalttığı düşünülebilir. Bu durum, bağlayıcı bileşiminin asit direncini belirlemedeki önemli rolünü vurgulamaktadır. Aynı zamanda UCS ve GCS ikame seviyelerinin optimize edilmesi, pozzolanik veya asit dirençli katkı maddelerinin dahil edilmesi ve geliştirilmiş karışım tasarım stratejilerinin kullanılması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

H₂SO₄'ye Maruz Kalan AAC Karışımlarındaki Kompresif Dayanım Kaybı, UCS ve GCS ikame seviyelerine bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. %5; %10; %20 ve %30 UCS içeren karışımlar sırasıyla %17,5; %22,5; %32,5 ve %36,5 dayanım kaybı gösterirken; %5; %10; %20 ve %30 GCS içeren karışımlar sırasıyla %24,7; %27,6; %31,2 ve %35,1 dayanım kaybı göstermektedir. Düşük ikame seviyelerinde ($\leq 10\%$) UCS içeren karışımlardaki daha düşük dayanım kaybı, UCS'nin bir dolgu maddesi olarak kısmi katkısının matris yoğunluğunu artırması ve başlangıçtaki mekanik özellikleri iyileştirmesi ile açıklanabilir. Ancak UCS içeriği arttıkça, UCS'nin yüksek CaO konsantrasyonu, portlandit ve C-S-H gibi kalsiyum zengin fazların çözünmesi nedeniyle asit kaynaklı bozulmayı hızlandırır ve jips ve ettringit gibi genişleyici ikincil ürünlerin oluşumuna yol açar; bu da içsel genişleme ve mikro çatlakların yayılmasına neden olarak matrisi zayıflatır (Gu, vd., 2019; Sun, vd., 2024). Buna karşın, GCS içeren karışımlar, düşük ikame seviyelerinde (5% ve 10%) UCS karışımlarına göre daha yüksek dayanım kaybı göstermektedir, muhtemelen GCS'nin daha ince parçacık boyutu ve artan yüzey alanı, daha yüksek su talebine, artan poroziteye ve azalmış asit direncine yol açmaktadır (Chen, vd., 2021; Sun, vd., 2024). Ayrıca, GCS, UCS'ye göre daha düşük kalsiyum içeriğine sahiptir, bu da asit duyarlı hidrasyon ürünlerinin daha az oluşmasına yol açarken, bağlayıcı fazın yoğunlaşmasını ve pozzolanik katkıyı sınırlamaktadır. Daha yüksek ikame seviyelerinde (20% ve 30%); UCS ve GCS içeren karışımlardaki dayanım kayıpları daha benzer hale gelmiştir, bu da kritik bir ikame eşiğinden sonra her iki malzemenin de asit maruziyeti altında matris stabilitesini azalttığını göstermektedir. Artan porozite, zayıf ara yüzey bağları ve her iki karışımdaki jeopolimerizasyon ürünlerinin azalmış oluşumu, asit penetrasyonunu hızlandırmakta, reaksiyon ürünlerinin yıkanmasını ve yapısal çerçevenin bozulmasını tetiklemektedir. Bu bulgular, kontrollü UCS ve GCS ikamesinin mekanik performans için faydalı olabileceğini, ancak aşırı ikamenin asit direncini olumsuz etkileyebileceğini ve karışım oranlarının optimize edilmesinin yanı sıra potansiyel olarak asit direncini artıracak katkı maddelerinin dahil edilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır.



Şekil 4.31 Basınç dayanımı

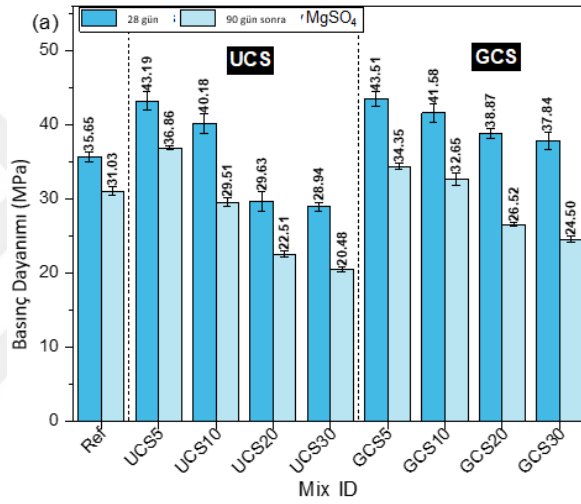


Şekil 4.32 H₂SO₄'ye maruz kalma sonucu dayanım kaybı

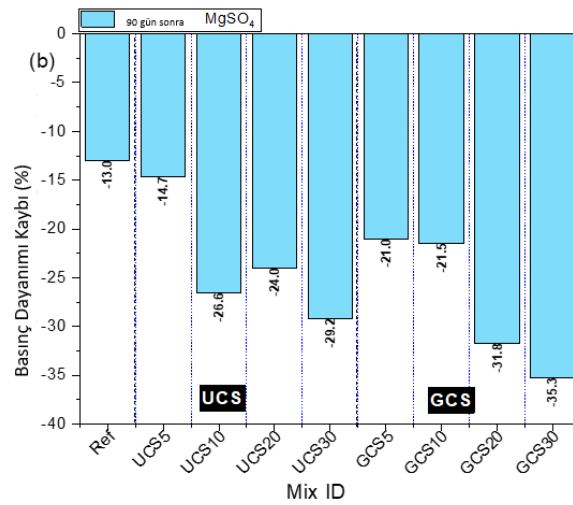
Şekil 4.33; 28 gün kürlenme sonrası, 10% MgSO₄ çözeltisine maruz bırakılan AAC karışımlarının GBFS yerine UCS veya GCS kullanmanın basınç dayanımı üzerindeki etkisini gösterir. Sonuçlar, tüm karışımların sülfat saldırısı nedeniyle basınç dayanımında azalma yaşadığını, dayanım kaybının %13,0 ile %35,3 arasında değiştiğini göstermektedir (Şekil 4.34). Referans karışımı en düşük dayanım kaybını gösterirken; %30 GCS içeren karışım en yüksek dayanım azalmasını sergilemiştir. Bu, yüksek porozite, düşük reaktif silika ve alüminyum oksit içeriği ve artan sülfat-reaktif fazların oluşumuna bağlanabilir. GCS'nin daha ince partikül boyutu, paketleme yoğunluğunu artırarak ve reaksiyon için yüzey alanını artırarak erken aşamada dayanım gelişimini artırırken; yüksek yerine koyma seviyelerinde, aşırı matris porozitesine yol açarak sülfatın daha derinlere nüfuz etmesini sağlar, bu da bozulmayı

hızlandırır ve ITZ'leri zayıflatır. Ayrıca, GCS'deki yüksek CaO içeriği, sülfat iyonlarıyla reaksiyona girerek jips ve ettringit gibi genişleyen fazların oluşumunu teşvik eder, bu da iç gerilimler, mikro çatlaklar ve yapısal zayıflamalara yol açar (Aliques-Granero, vd., 2019; Sun, vd., 2024). GBFS'ye kıyasla, daha çok sülfat saldırısına karşı dirençli olan, çoğunlukla alüminosilikat geopolymer fazları (C-A-S-H) oluşturan GCS'nin değiştirilmiş kimyasal bileşimi, daha az stabil bir bağlayıcı faza ve daha düşük kimyasal bozulma direncine neden olur. Ayrıca, GCS'nin GBFS'ye kıyasla daha düşük magnezyum oksit içeriği, sülfat tarafından tetiklenen genişlemeyi hafifletmeye yardımcı olan magnezyum silikat hidrat (M-S-H) oluşumunu azaltabilir, bu da bozulmayı daha da kötüleştirir. Artan porozite, daha zayıf geopolymerizasyon ve yüksek GCS yerine koyma seviyelerinde sülfat saldırısına karşı daha yüksek hassasiyetin birleşimi, aşırı dayanım kaybına yol açar, bu da GCS'nin ılımlı miktarlarda faydalı olabileceğini ancak aşırı yerine koyma ($\geq\%30$) durumunda sülfat-zengin ortamlarda uzun vadeli dayanıklılığı tehlikeye atacağını gösterir. Dayanım kaybı eğilimleri, AAC karışımlarının sülfat direncinin, kullanılan yerine koyma malzemesinin türü ve miktarı tarafından önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. UCS içeren karışımlar, çoğu yerine koyma seviyesinde GCS içeren karışımlara kıyasla daha düşük dayanım kayıpları gösterdi, bu da UCS'nin sülfat-zengin ortamlarda daha stabil bir mikro yapı sağladığını düşündürmektedir. Düşük yerine koyma seviyelerinde (%5 ve %10); UCS karışımları $MgSO_4$ saldırısına karşı daha iyi direnç gösterdi, dayanım kayıpları sırasıyla %14,7 ve %26,6 iken, GCS karışımlarında sırasıyla %21,0 ve %21,5 dayanım kaybı gözlemlenmiştir. Bu, UCS'nin GBFS'ye kıyasla daha düşük reaktivitesine rağmen, sınırlı yerine koyma seviyelerinde daha yoğun bir mikro yapı sağlayarak sülfat iyonlarına karşı geçirgenliği azaltarak matrisin dayanıklılığını artırdığını göstermektedir. Ancak; %20 ve %30 yerine koyma seviyelerinde, UCS karışımları hala daha düşük dayanım kayıpları (%24 ve %29,2) gösterdi, GCS karışımları ise sırasıyla %31,8 ve %35,3 dayanım kaybı yaşadı, bu da UCS'nin daha yüksek yerine koyma seviyelerinde bile sülfat kaynaklı bozulmalara karşı daha dirençli olduğunu vurgulamaktadır. GCS içeren karışımların, özellikle %20 ve %30 yerine koyma seviyelerinde artan hassasiyeti, daha ince partikül boyutu ve daha yüksek CaO içeriği nedeniyle sülfat-reaktif fazların oluşumunu teşvik ettiği için açıklanabilir (Schmidt, vd., 2009; Ye, vd., 2019). Bu genişleyen ürünler iç gerilimlere, mikro çatlaklara ve matrisin bozulmasına neden olarak daha belirgin bir dayanım

kaybına yol açar. Ayrıca, GCS'nin daha yüksek özel yüzey alanı, su talebini artırır ve potansiyel olarak tepki vermeyen fazlar oluşturabilir, bu da sülfat direncini daha da zayıflatabilir (Dener, vd., 2021). Buna karşın, daha kaba partikül boyutuna ve daha düşük reaktiviteye sahip UCS, daha az poroz yapılı bir yapı oluşturarak sülfatın nüfuzunu sınırlayarak bozulmanın boyutunu azaltır. Bu bulgular, hem UCS hem de GCS'nin GBFS yerine koyma olarak kullanılabileceğini ancak UCS'nin, özellikle ılımlı yerine koyma seviyelerinde, sülfat direncini artırmada daha etkili olduğunu, aşırı GCS yerine koymanın ($\geq 20\%$) ise AAC karışımlarının sülfat-zengin ortamlarda uzun vadeli dayanıklılığını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir (Zhang, vd., 2022).



Şekil 4.33 Basınç dayanımı



Şekil 4.34 MgSO₄'ye maruz kalma sonrası dayanım kaybı

4.7.2 Ağırlık Kaybı

Şekil 4.35 ve Şekil 4.36; 28 gün kürlenme sonrası H_2SO_4 ve $MgSO_4$ 'ye maruz kalan AAC karışımlarının, GBFS yerine UCS veya GCS ile %5; %10; %20 ve %30 seviyelerinde yapılan ikameye bağlı olarak ağırlık kaybını göstermektedir. Şekil 4.35'e göre, H_2SO_4 maruziyeti nedeniyle ağırlık kaybı %2,59 ile %15,41 arasında değişmiş olup, %5 UCS içeren karışım en düşük ağırlık kaybını göstermiştir. Diğer yandan, %30 UCS içeren karışım en yüksek bozulmayı yaşamıştır. %5 UCS karışımının asidik dirençteki üstünlüğü, parçacık sıkıştırma yoğunluğunu artırarak ve geçirgenliği azaltarak asidik penetrasyonu sınırlaması ve sonrasında bozulmayı engellemesi ile açıklanabilir. Buna karşılık, %30 UCS karışımında gözlemlenen yüksek ağırlık kaybı, artan porozite ve daha bozulmuş bir mikro yapıdan kaynaklanmaktadır, bu da asidin içeri sızmasını kolaylaştırmakta ve reaksiyon ürünlerinin çözünmesini hızlandırmaktadır. Ayrıca, UCS'nin GBFS'ye kıyasla daha yüksek CaO içeriği, asidik hassas fazların oluşumunu teşvik eder, örneğin kalsiyum hidroksit ve C-S-H gibi, bunlar sülfürik asit ile reaksiyona girerek genişleyen ve zayıf bağlı jips ve etringit gibi ürünler oluşturur (Ye, vd., 2019). Bu ikincil reaksiyon ürünleri, kısa vadede gözeneklerin iyileşmesine yol açabilir ancak nihayetinde mikro çatlamalara, yapısal çürümeye ve artan ağırlık kaybına neden olur (Binici, vd., 2012). Bu bulgular, GBFS'nin UCS ile kısmi ikamesinin düşük seviyelerde faydalı olabileceğini, ancak aşırı UCS ikamesinin (%30 ve üzeri) asit direncini, poroziteyi artırarak, geopolimera dönüşüm verimini azaltarak ve kalsiyum açısından zengin fazların sülfat zengini koşullar altında bozulmasına yol açarak bozulduğunu göstermektedir.

Ağırlık kaybı sonuçları, AAC karışımlarının H_2SO_4 'ye karşı direncinin, kullanılan GBFS yerine ikame edilen malzemenin türüne ve yüzdesine önemli ölçüde bağlı olduğunu göstermektedir. Referans karışımı (%100 GBFS); %6,98'lik bir ağırlık kaybı gösterirken, UCS ve GCS içeren karışımlar, ikame seviyelerine bağlı olarak farklı derecelerde bozulma göstermiştir. Düşük ikame seviyelerinde (%5 ve %10); UCS içeren karışımlar asidik direnç açısından üstün performans sergileyerek sırasıyla %2,59 ve %4,28 ağırlık kaybı göstermiştir, bu da referans karışımından daha düşüktür. Bu, küçük miktarlarda UCS'nin matrisin yoğunlaşmasına katkı sağlayarak

geçirgenliği azaltması ve asidin penetrasyonunu sınırlaması anlamına gelmektedir. Ancak, UCS içeriği %20 ve %30'a yükseldiğinde, ağırlık kaybı sırasıyla %14,37 ve %15,41'e kadar yükselmiştir, bu da aşırı UCS ikamesinin dayanıklılığı olumsuz etkilediğini göstermektedir. Bunun nedeni, daha yüksek porozite, zayıf geopolimera dönüşüm ve asit hassasiyeti olan kalsiyum bazlı fazların (kalsiyum hidroksit ve C-S-H gibi) artan oluşumu olup, bunlar sülfürik asit ile reaksiyona girerek genişleyen ve zayıf bağlı jips ve etringit gibi ürünler oluşturur, bu da bozulmayı hızlandırmaktadır.

Buna karşılık, GCS içeren karışımlar, tüm ikame seviyelerinde daha stabil ağırlık kaybı eğilimleri göstermiştir. %5 ve %10 GCS karışımları, UCS karşılıklarından biraz daha yüksek ağırlık kayıplarına (sırasıyla %3,38 ve %6,63) sahip olmasına rağmen, hala referans karışımına yakın kalmıştır, bu da orta düzeyde asit direncini göstermektedir. Özellikle, %20 ve %30 GCS karışımları sırasıyla %8,47 ve %9,79 ağırlık kaybı göstermiştir ki bu, daha düşük ikame seviyelerine kıyasla daha yüksek olsa da, yine de UCS karşılıklarından (sırasıyla %14,37 ve %15,41) önemli ölçüde daha düşüktür. Bu, GCS'nin daha ince parçacık boyutu ve daha yüksek yüzey alanı ile daha rafine ve homojen dağılmış bir mikro yapı oluşturduğunu, böylece asit geçirgenliğini azaltarak sülfat kaynaklı bozulmanın kapsamını azalttığını göstermektedir. Ancak, daha yüksek ikame seviyelerinde, aşırı GCS yine artan porozite ve daha düşük asit direnciyle sonuçlanmaktadır. Bu bulgular, UCS'nin düşük ikame seviyelerinde (%10'a kadar) daha iyi asit direnci sağladığını ancak yüksek içeriklerde (yüksek porozite ve asit hassas kalsiyum fazlarının artması nedeniyle) matrisi önemli ölçüde zayıflattığını, oysa GCS'nin tüm ikame seviyelerinde daha stabil bir performans gösterdiğini ve asidik ortamlarda daha dayanıklı bir matris sunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, her iki malzemenin de aşırı ikamesi (\geq %20) asit direncini zayıflatmakta, bu da sülfürik asite maruz kalan AAC karışımlarında dayanıklılık ve mekanik performans arasında bir denge sağlamak için optimize edilmiş ikame seviyelerine ihtiyaç duyulduğunu vurgulamaktadır.

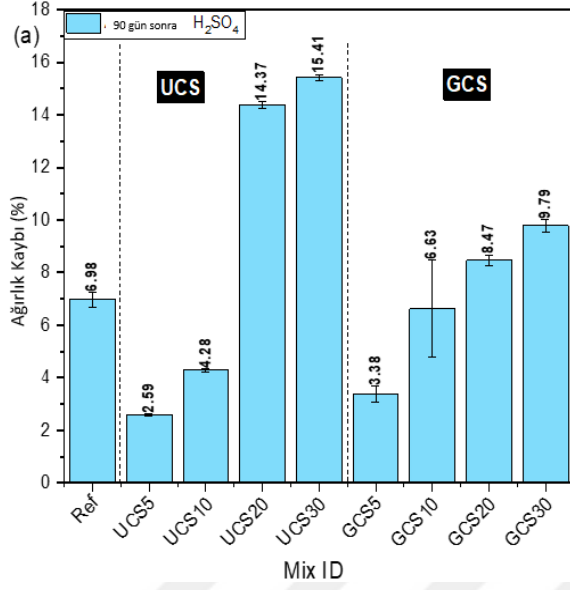
MgSO₄'ye maruz kalma etkileri, AAC karışımlarındaki ağırlık kaybını Şekil 4.36'da göstermektedir, bu değerler %1,40 ile %11,35 arasında değişmektedir. %5 UCS içeren karışım en düşük ağırlık kaybını gösterirken; %30 UCS içeren karışım en yüksek kaybı yaşamıştır. %5 UCS karışımının daha iyi sülfat direncinin nedeni, matris yoğunluğunu

artırarak, sülfat iyonlarının nüfuz etmesi için mevcut gözenek alanını azaltmış olmasıdır ve bu da sonraki kimyasal hasarı engellemektedir. Buna karşın, %30 UCS içeren karışımda gözlemlenen artan ağırlık kaybı, daha yüksek UCS ikamesinin geopolimera dönüşüm mekanizmasını engellediğini ve bu da görece gözenekli ve kimyasal olarak kararsız bir mikro yapıya yol açtığını göstermektedir. UCS'deki yüksek CaO içeriği nedeniyle, daha büyük bir kalsiyum bazlı reaksiyon ürünleri hacmi, örneğin kalsiyum hidroksit, üretilir ve bu daha sonra sülfat iyonları ile reaksiyona girerek jips ve etringit gibi genişleyici zayıf bağlı fazlar oluşturur. Bu ikincil sülfat ürünlerinin oluşumu, içsel gerilmelere yol açarak mikro çatlakların gelişmesine, geçirgenliğin artmasına ve malzemenin kademeli olarak bozulmasına neden olur. Ayrıca, UCS'nin GBFS'ye kıyasla daha düşük silika ve alümina içeriği, sülfat direncine sahip C-A-S-H fazlarının daha az gelişmesine yol açar, bu da çimento matrisinin uzun vadeli dayanıklılığını daha da kötüleştirir. Sınırlı UCS içeriği, mikro yapısal bütünlüğün artırılması nedeniyle sülfat direncini iyileştirebilir, ancak daha yüksek ikame seviyeleri (%30 ve üzeri) AAC matrisini şiddetle bozarak, sülfat kaynaklı genleşmeye ve bozulmaya daha duyarlı hale getirir.

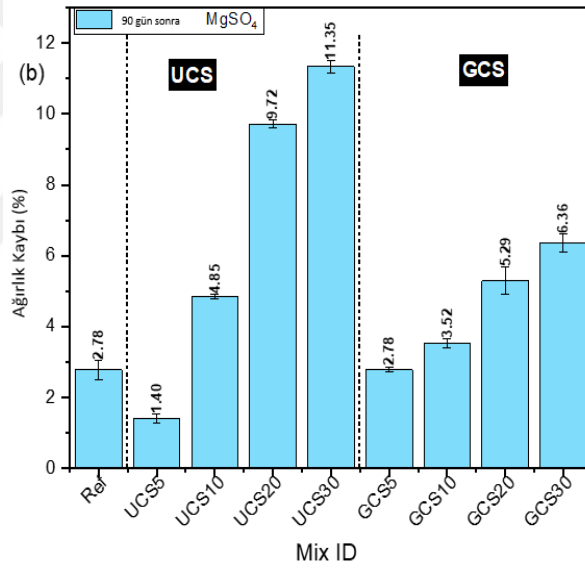
MgSO₄'ye maruz kalma sonrası ağırlık kaybı sonuçları, sülfat direncinin GBFS ikamesinin türüne ve seviyesine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Referans karışımı (%100 GBFS); %2,78'lik bir ağırlık kaybı gösterirken, UCS ve GCS içeren karışımlar, ikame seviyelerine bağlı olarak farklı bozulma eğilimleri göstermiştir. Düşük ikame seviyelerinde, UCS üstün sülfat direnci sergileyerek, %5 UCS karışımı en düşük ağırlık kaybını (%1,40) göstermiş ve referans karışımından önemli ölçüde daha düşük olmuştur. Bu, düşük miktarlarda UCS'nin mikro yapısal yoğunlaşmayı artırarak, geçirgenliği azaltması ve sülfat iyonlarının difüzyonunu sınırlaması anlamına gelir, böylece kimyasal bozulmayı engeller. Ancak, UCS ikamesi arttıkça, ağırlık kaybı artmış ve sırasıyla %10 UCS'de %4,85; %20 UCS'de %9,72 ve %30 UCS'de %11,35'e yükselmiştir. Yüksek UCS seviyelerinde gözlemlenen artan ağırlık kaybı, UCS'nin daha iri parçacık boyutu, daha yüksek porozite ve GBFS'ye kıyasla daha düşük geopolimera dönüşüm verimliliği ile ilişkilidir; bu da sülfatların nüfuz etmesini kolaylaştıran açık bir matris yapısına yol açar. Ayrıca, UCS, sülfat ile reaksiyona giren kalsiyum hidroksit gibi fazların oluşumunu teşvik eder, bu da MgSO₄ ile reaksiyona girerek jips ve brüsit (Mg(OH)₂) oluşturur ve bu da içsel genleşme,

mikro çatlama ve hızlandırılmış bozulmaya yol açar. Buna karşılık, GCS içeren karışımlar, ikame seviyeleri arttıkça daha kademeli bir ağırlık kaybı artışı göstermiştir. %5 GCS karışımı, referans karışımıyla aynı ağırlık kaybını (%2,78) göstermiştir, bu da düşük ikame seviyelerinde GCS'nin sülfat direncini önemli ölçüde değiştirmedini göstermektedir. İkame seviyesi %10; %20 ve %30'a çıktıkça, ağırlık kaybı sırasıyla %3,52; %5,29 ve %6,36'ya yükselmiştir. Bu eğilim, daha yüksek GCS içeriğinin hala artan bozulmaya yol açtığını gösterse de, GCS içeren karışımlarda ağırlık kaybı her ikame seviyesinde UCS içeren karışımlara kıyasla sürekli olarak daha düşük kalmıştır. Bu, GCS'nin daha ince parçacık boyutu ve daha iyi dağılımı nedeniyle, sülfat geçirgenliğini azaltarak UCS'ye kıyasla genel direnci iyileştirdiğini göstermektedir. Ancak, yüksek GCS içeriklerinde ($\geq\%20$), artan porozite ve geopolimera dönüşüm için aktif bileşenlerin azalması yine yapısal zayıflamaya yol açmaktadır, ancak UCS'ye kıyasla daha az oranda.

Genel olarak, bu sonuçlar, UCS'nin %5 ikame seviyesinde mükemmel sülfat direnci sunduğunu ancak daha yüksek seviyelerde artan porozite ve sülfat reaksiyona giren kalsiyum fazları nedeniyle yüksek bozulma eğilimine girdiğini göstermektedir. Diğer taraftan, GCS tüm ikame seviyelerinde daha stabil sülfat direnci sağlar ve UCS'ye kıyasla daha düşük bir bozulma oranına sahiptir. Ancak, UCS veya GCS'nin aşırı ikamesi ($\geq\%20$), sülfat dayanıklılığını zayıflatmakta olup, bu da sülfat açısından zengin ortamlarda mekanik performans ile uzun vadeli direncin dengelenmesi için optimize edilmiş ikame seviyelerinin önemini vurgulamaktadır.



Şekil 4.35 H₂SO₄ sonrası ağırlık kaybı

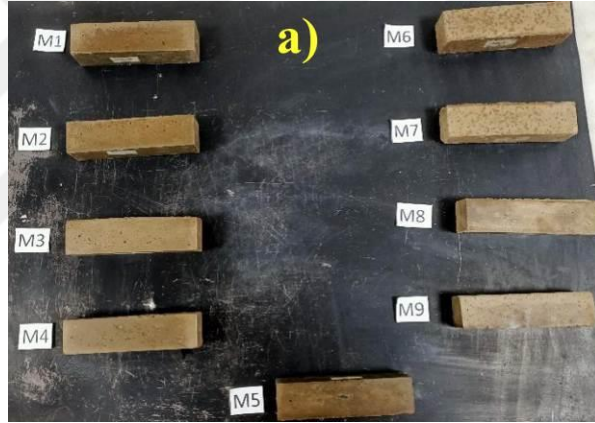


Şekil 4.36 MgSO₄ sonrası ağırlık kaybı

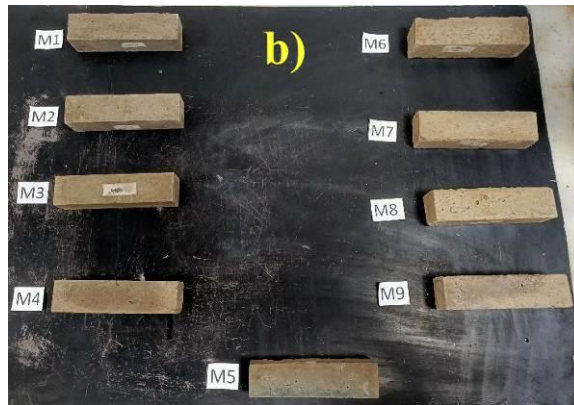
4.7.3 Görsel Durum

Şekil 4.37 ve Şekil 4.38; AAC karışımlarının H₂SO₄ (sülfürik asit) ve MgSO₄ (magnezyum sülfat) ile yapılan maruziyet sonrasında görsel durumunu göstermektedir ve kimyasal saldırıların AAC karışımlarındaki bozulma etkilerini vurgulamaktadır. H₂SO₄ maruziyetine uğrayan numunelerde, asit duyarlı fazlar olan Ca(OH)₂ ve C-S-H'nin sülfürik asit ile reaksiyona girerek jips ve ettringit oluşumuna yol açması nedeniyle, içsel genleşme ve yapısal zayıflama ile birlikte ciddi yüzey bozulması, renk değişimi, çatlama ve malzeme parçalanması gözlemlenebilir. Bozulmanın, UCS yerine

geçen malzeme oranı arttıkça ($\geq 20\%$) daha belirgin olması beklenmektedir, çünkü UCS daha yüksek kalsiyum oksit (CaO) içeriğine sahiptir ve bu da onu asit etkisiyle çözünme ve parçalanmaya karşı daha hassas hale getirir. $MgSO_4$ maruziyeti altında ise, sülfat saldırısı, jips ve brucit ($Mg(OH)_2$) gibi ürünlerin oluşması nedeniyle içsel genişleme, mikro çatlamlar ve artan poroziteye yol açarak, matrisin bağlılığını ve uzun vadeli dayanıklılığını zayıflatır. Sülfat saldırısının etkileri genellikle daha yavaş gerçekleşir, ancak yine de güç kaybı ve yapısal kararsızlık ile sonuçlanır. Düşük UCS ve GCS yerine geçen malzeme oranlarına sahip numuneler ($\leq 10\%$) daha iyi direnç gösterecek, çünkü bu oranlar matrisin yoğunluğunu artırarak poroziteyi azaltır. Ancak, daha yüksek yerine geçirme oranları ($\geq 20\%$) daha şiddetli hasara, artan ağırlık kaybına ve daha zayıf geopolymerleşme verimliliğine yol açarak, malzemenin agresif ortamlara karşı dayanıklılığını azaltacaktır.



Şekil 4.37 H_2SO_4 maruziyeti sonrası görsel durum

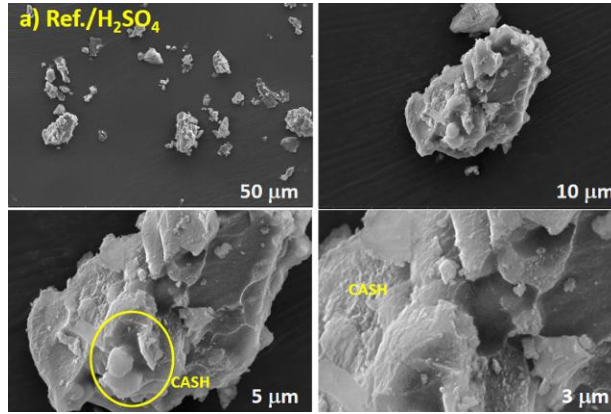


Şekil 4.38 $MgSO_4$ maruziyeti sonrası görsel durum

4.7.4 H₂SO₄ ve MgSO₄ Sonrası Mikro Yapısal Değişiklikler

4.7.4.1 H₂SO₄ sonrası mikro yapısal değişiklikler

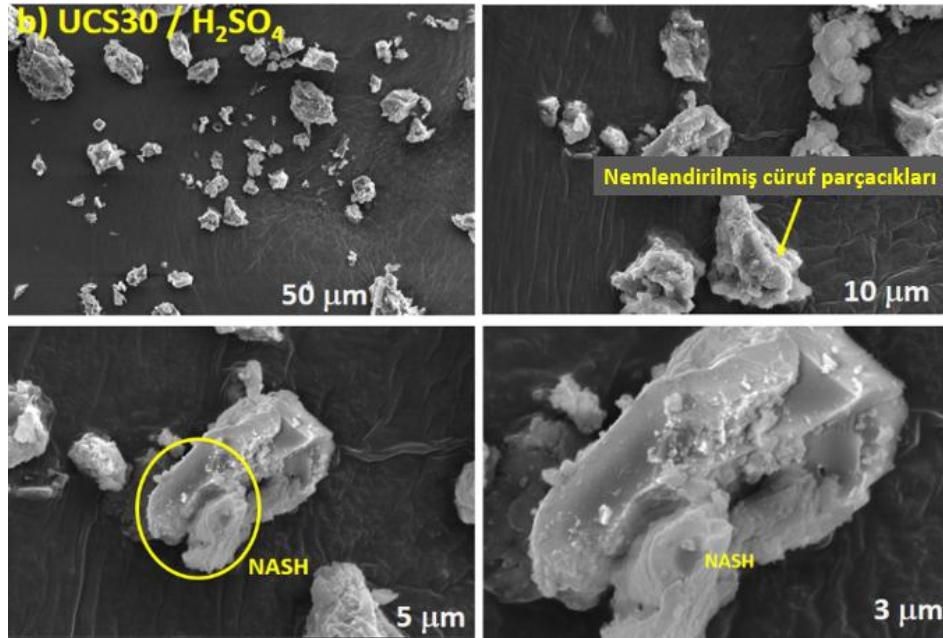
Şekil 4.39; H₂SO₄'ye maruz kalan referans karışımının SEM görüntülerini sunmaktadır. Görüntüler, test edilen örnekler arasında en düşük %15,2 güç kaybıyla nispeten sağlam ve yoğun bir mikro yapıyı göstermektedir. Kompaktlık ve minimal mikro çatlama, referans karışımının (yüzde 100 GBFS) UCS30 ve GCS30'a kıyasla asidik saldırılara karşı üstün bir direnç gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu, alüminosilikat bazlı C-A-S-H jel fazlarının baskın olmasına bağlanabilir, çünkü bu fazlar kalsiyum bazlı fazlardan daha kimyasal olarak kararlı olup asidik ortamlarda daha dayanıklıdır. GBFS, daha düşük kalsiyum oksit (CaO) içeriğine sahip olduğundan, alçı taş ve ettringit gibi asidik ortamlarda çözülmeye ve içsel genişlemeye, çatlamaya ve yapısal bozulmalara yol açabilen asidik duyarlı reaksiyon ürünlerinin oluşumunu minimize eder. Uzun süreli maruz kalma nedeniyle bazı lokalize yüzey erozyonu ve küçük çatlaklar olsa da, geniş çaplı porozite veya büyük ölçekli yapısal çöküşün olmaması, GBFS-dominant AAC karışımlarının asidik koşullar altında daha iyi dayanıklılık ve uzun vadeli performans gösterdiğini doğrulamaktadır.



Şekil 4.39 Referans Numunelerin H₂SO₄'ya maruz kaldıktan sonra mikro yapısı

Şekil 4.40; H₂SO₄'ya maruz kalan %30 UCS içeren karışımın SEM görüntülerini sunmaktadır. Bu görüntüler, geniş çapta mikro yapısal bozulma ve test edilen örnekler arasında en yüksek mukavemet kaybı olan %36,7'yi göstermektedir. Yüksek porozite, yaygın mikro çatlama ve parçalanmış bağlayıcı faz, UCS30 karışımının asit

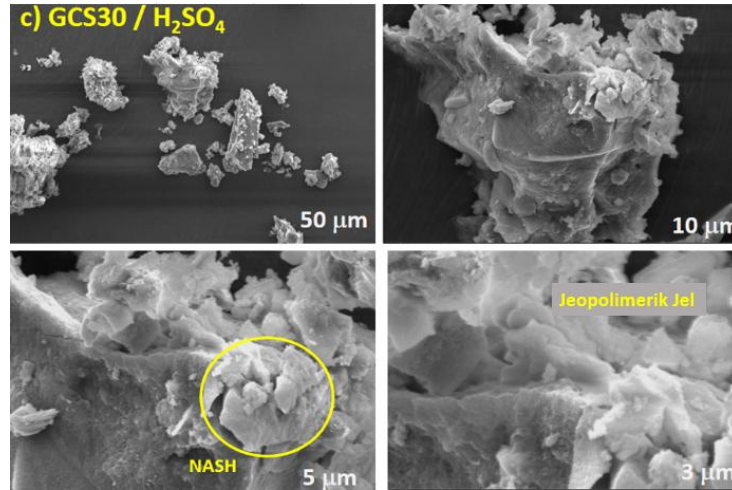
saldırısından önemli ölçüde zayıfladığını göstermektedir. Bu durum, esas olarak yüksek kalsiyum oksit (CaO) içeriği nedeniyle, asidik koşullarda yüksek reaktiviteye sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Sülfürik asidin, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve C-S-H gibi asit duyarlı fazlarla reaksiyona girmesi, jips ve ettringit gibi genişleyici ikincil ürünlerin oluşmasına yol açmış ve bu ürünler iç genişleme, mikro çatlakların artması ve yapısal dağılma ile sonuçlanmıştır. Bu ikincil genişleyici fazların varlığı, interfasiyal geçiş bölgelerini (ITZ) daha da zayıflatmış ve bağlayıcı ile agrega parçacıkları arasındaki kohezyon kaybını hızlandırarak, malzemenin hızlı bir şekilde bozulmasına neden olmuştur. Referans karışımının yoğun ve kompakt matrisiyle karşılaştırıldığında, UCS30 örneği daha fazla boşluk oluşumu, daha fazla bağlantılı çatlaklar ve daha zayıf bağlanma sergilemiş, bunların tümü mukavemet kaybına katkıda bulunmuştur. Bulgular, aşırı UCS ilavesinin asit direnci üzerindeki olumsuz etkisini vurgulamaktadır, çünkü yüksek CaO içeriği ve düşük pozzolanik reaktivitesi, agresif ortamlarda kötü dayanıklılığa yol açmaktadır. AAC karışımlarının asidik koşullarda kimyasal stabilitesini artırmak için UCS içeriğini sınırlamak ve alternatif pozzolanik malzemeler kullanmak gerekebilir, böylece sülfürik asit maruziyetinin olumsuz etkileri hafifletilebilir.



Şekil 4.40 UCS30 numunelerin H_2SO_4 'ya maruz kaldıktan sonra mikro yapısı

Şekil 4.41; H_2SO_4 'ya maruz kalan %30 GCS içeren karışımın SEM görüntülerini sunmaktadır. Bu görüntüler, önemli mikro yapısal bozulma ve %35,3 mukavemet

kaybını göstermektedir. Bu değer, UCS30'dan (%36,7) biraz daha düşük ancak yine de referans karışımdan (%15,2) belirgin şekilde daha yüksektir. Yüksek porozite, mikro çatlamlar ve zayıflamış matris kohezyonu, GCS30 örneğinin asit saldırısına oldukça duyarlı olduğunu göstermektedir. Ancak, daha ince partikül boyutu ve iyileştirilmiş sıkıştırma verimliliği, UCS30'a kıyasla biraz daha iyi bir direnç sağlamıştır. Sülfürik asidin, kalan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve C-S-H gibi kalsiyum zengini fazlarla reaksiyona girmesi, jips ve ettringit oluşumuna yol açarak iç genişleme, çatlak yayılması ve yapısal zayıflamayı artırmıştır. GCS partikülleri, UCS'ye kıyasla daha iyi bir matris yoğunlaşması sağlasa da, yüksek ikame oranı (%30) hala artmış porozite ve zayıf bağlama ile sonuçlanmış, bu da asidin daha derinlemesine nüfuz etmesine ve malzemenin bozulmasını hızlandırmasına olanak tanımıştır. Referans karışımına kıyasla daha yoğun ve kompakt bir mikro yapıyı koruyan GCS30 örneği, önemli boşluk oluşumu, parçalanmış bağlayıcı fazlar ve genel bir bütünlük kaybı göstermiştir. Bu bulgular, GCS'nin asidik ortamlarda UCS'ye göre biraz daha iyi performans gösterdiğini ancak aşırı ikame ($\geq\%30$) durumunda yine de büyük mukavemet kaybı ve yapısal istikrarsızlık meydana geldiğini, dolayısıyla AAC karışımlarında asit direncini artırmak için optimize edilmiş ikame seviyelerinin gerekli olduğunu vurgulamaktadır.

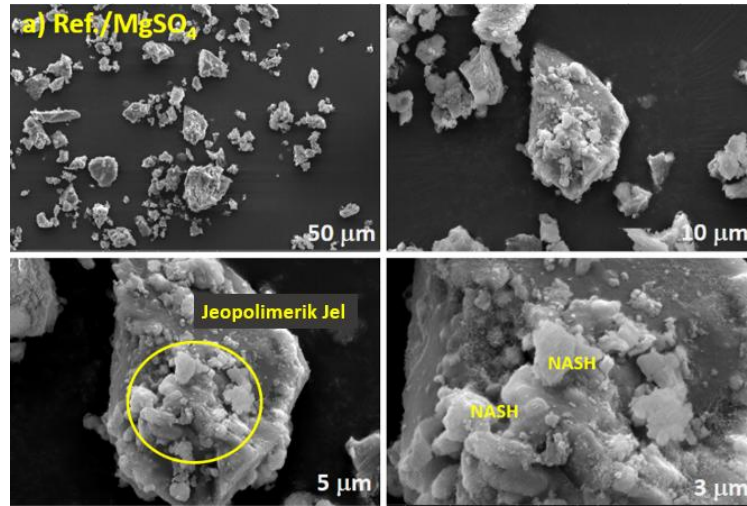


Şekil 4.41 GCS30 numunelerin H_2SO_4 'ya maruz kaldıktan sonra mikro yapısı

4.7.4.2 MgSO_4 sonrası mikro yapısal değişiklikler

Şekil 4.42; referans karışımının MgSO_4 'ya maruz kaldıktan sonra SEM görüntüsünü sunmaktadır. Görüntüler, referans karışımının %13'lük en düşük mukavemet kaybını gösterdiğini ve bu da onun sülfat saldırısına karşı en yüksek direncini sergilediğini

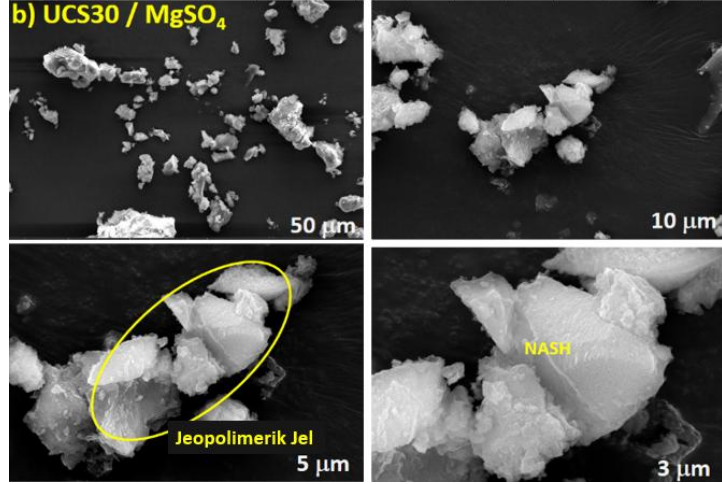
göstermektedir. Bu üstün direnç, referans karışımındaki yüksek alüminosilikat içeriği nedeniyle oluşan C-A-S-H jellerine bağlanabilir. Bu jeller, sülfat açısından zengin ortamlarda daha karardır ve genellikle kalsiyumlu fazların ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve C-S-H gibi) sülfatlar ile etkileşime girmesiyle meydana gelen zararlı reaksiyonları engeller. Diğer karışımlar, daha yüksek kalsiyum içeriği ile, bu tür reaksiyonlar sonucunda jips ve brüsit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) gibi genişleyici ve zarar verici ürünlerin oluşmasına neden olabilir, bu da çatlama ve yapısal bozulmaya yol açar. Ayrıca, referans karışımının yoğun ve kompakt yapı matrisi, sülfatların geçişini sınırlamada önemli bir rol oynamaktadır. Bu, mikro çatlaklar ve gözenekliliği azaltarak iç hasarı minimize eder, çünkü bunlar sülfatların geçişi için ana yollar olarak kabul edilir. SEM analizi, yüzeydeki küçük aşınmalar ve izole mikro çatlakların varlığını gösterse de, genel matris bütünlüğü büyük ölçüde korunmuştur. Bağlayıcı ve agrega arasındaki güçlü ara yüz bağları, sülfat kaynaklı hasarın engellenmesinde ek bir yardımcı faktördür. Sonuç olarak, GBFS-dominant AAC karışımları, UCS veya GCS içeren karışımlara göre MgSO_4 maruziyeti karşısında üstün direnç sergileyerek, bağlayıcı bileşimlerinin optimize edilmesinin, agresif çevrelerde sülfat direncini artırma açısından önemli olduğunu vurgulamaktadır.



Şekil 4.42 Referans numunelerin mikro yapısı MgSO_4

MgSO_4 'ya maruz kalan %30 UCS karışımının (UCS30) SEM görüntüsü (Şekil 4.43), yüksek gözeneklilik ve kırılğan bir mikro yapıyı ortaya koymakta olup, bu durum %13'lük kayba sahip referans karışımına kıyasla %29,2'lik önemli bir mukavemet kaybı ile ilişkilidir ve sülfat direncinin zayıf olduğunu vurgulamaktadır. Bu bozulma,

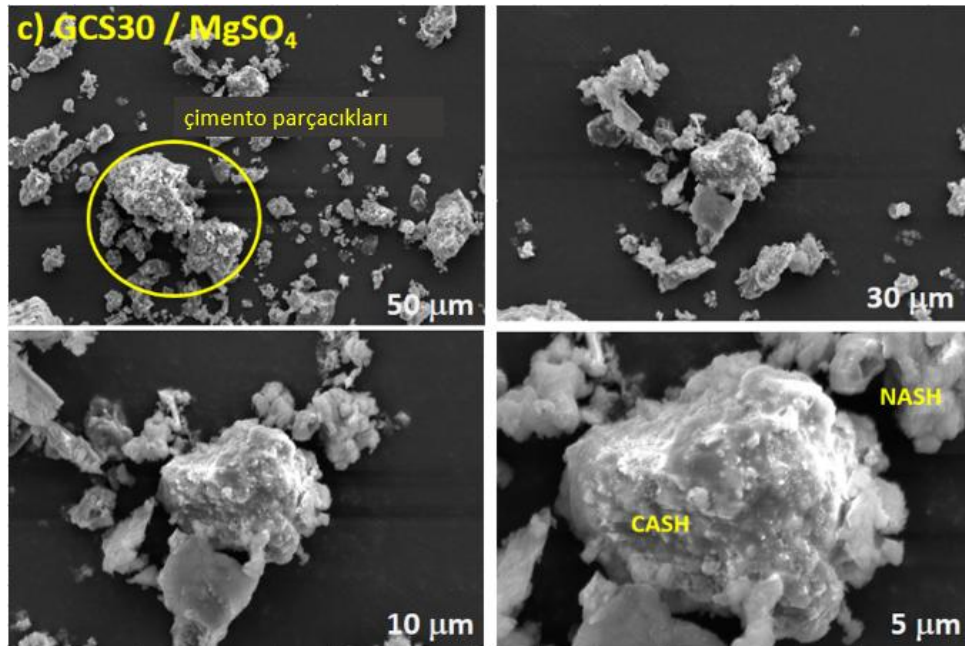
UCS'nin daha iri partikül boyutu, düşük reaktivitesi ve yüksek kalsiyum içeriği (CaO %48,6) nedeniyle, verimsiz partikül sıkıştırılması, artan kapiler gözeneklilik ve zayıf ITZ (İnterfasial Geçiş Bölgesi) oluşumundan kaynaklanmaktadır. Bu durum, sülfatın daha derinlere nüfuz etmesine ve hasarın hızlanmasına olanak tanımaktadır. Mg^{2+} iyonlarının C-S-H jel ile reaksiyonu, kalsiyumun ayrışmasına neden olmuş ve C-S-H'nin bağlayıcı özelliklere sahip olmayan magnezyum silikat hidrat (M-S-H) bileşiğine dönüşmesini sağlamıştır, bu da matrisin önemli ölçüde zayıflamasına yol açmıştır. Ayrıca, portlandit Mg^{2+} ile reaksiyona girerek brüsit ($Mg(OH)_2$) oluşturmuş ve SO_4^{2-} iyonları, jips (ve ettringit) oluşumuna katkıda bulunarak iç genişlemeye, mikro çatlama ve yapısal çerçevenin parçalanmasına yol açmıştır (Keppert, vd., 2021; Ye, vd., 2019). UCS30 mikro yapısında gözlemlenen daha yüksek gözeneklilik ve daha zayıf bağlayıcı fazlar, sülfat saldırısının matrisin derinlerine nüfuz ettiğini ve boşluklar oluşturduğunu, ayrıca geopolymer ağının genel bağlanmasını zayıflattığını göstermektedir. Referans karışımıyla karşılaştırıldığında, aluminosilikat açısından zengin bileşimi sayesinde daha yoğun ve daha stabil bir mikro yapıyı koruyan UCS30 karışımı, kapsamlı kimyasal bozulma yaşamakta ve fazla UCS içeriğinin yüksek reaktif kalsiyum fazları oluşturduğunu, bu durumun malzemeyi sülfat kaynaklı hasara karşı daha savunmasız hale getirdiğini ortaya koymaktadır. Brüsit ve jips gibi genişleyici reaksiyon ürünleri, yalnızca iç gerilmeleri artırmakla kalmamış, aynı zamanda çatlakların ilerlemesine de katkıda bulunarak mekanik mukavemetin daha da bozulmasına neden olmuştur. Ayrıca, iri UCS partikülleri, iyi sıkıştırılmış ve homojen bir matris oluşturmayı başaramamış ve bu da daha yüksek geçirgenlik ve daha kolay sülfat difüzyonuna yol açarak zamanla bozulmayı hızlandırmıştır. Bu mikro yapısal istikrarsızlık, yüksek UCS içeriğinin sülfat direncini önemli ölçüde zayıflattığını gösterir ve UCS ikamesinin fazla gözeneklilik ve yapısal zayıflamayı önlemek için dikkatlice optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Aksine, referans karışımının üstün performansı, agresif sülfat ortamlarında dayanıklılığın sağlanabilmesi için daha düşük kalsiyum içeriği ve gelişmiş matris yoğunluğu ile dengeli bir bağlayıcı kompozisyonunun önemini vurgulamaktadır.



Şekil 4.43 UCS30 numunelerin mikro yapısı $MgSO_4$

30% GCS karışımının (GCS30) $MgSO_4$ 'ye maruz kaldıktan sonraki SEM görüntüsü (Şekil 4.44), yüksek oranda bozulmuş ve gözenekli bir mikro yapıyı ortaya koymaktadır. Bu, 35,3% ile en yüksek güç kaybı ile ilişkilidir ve referans karışımındaki (%13) ve UCS30'daki (%29,2) kayıplardan önemli ölçüde daha fazladır. Bu şiddetli bozulma, öncelikle GCS'nin daha yüksek reaktivitesi, ince partikül boyutu ve değişen jeopolimerizasyon verimliliği ile ilişkilidir. GCS, ilk başta paketlemeyi artırırken, yüksek yerine koyma oranlarında aşırı bağlayıcı seyreltmesine ve daha zayıf yapısal stabiliteye yol açmaktadır. Mg^{2+} iyonları ile C-S-H jelinin reaksiyonu, C-S-H'nin bağlayıcı güçten yoksun olan ve bağlayıcı özellik göstermeyen bir faz olan magnezyum silikat hidratına (M-S-H) dönüşmesine yol açtı ve bu da matrisin bağlılık kaybına neden oldu. Ayrıca, GCS'nin yüksek kalsiyum oksit içeriği (%48,6); UCS'ye benzer şekilde, brucit ve alçı taşı oluşumunu teşvik ederek genişlemeye, iç gerilimlere ve şiddetli mikro çatlamlara yol açtı. Sülfat etkileşimleriyle kalsiyum açısından zengin fazlar nedeniyle oluşan ettringit, matrisin çözülmesine katkıda bulunarak boşluk oluşumuna ve yüksek oranda kırılmış bir mikro yapının oluşmasına neden oldu. UCS30'un aksine, daha iri ve daha zayıf bir matrisi olan GCS30'un ince partikülleri, başlangıçta matrisin yoğunlaşmasına katkı sağladı; ancak yüksek yerine koyma oranı (%30), reaktif bağlayıcı içeriğini (GBFS) aşırı seyreltmis ve bu da güç katkılaman C-S-H ve C-A-S-H fazlarının oluşumunu azaltarak malzemeyi sülfat kaynaklı bozulmalara karşı çok daha duyarlı hale getirdi. GCS'nin yüksek yüzey alanı, düşük yerine koyma oranlarında faydalı olsa da, su emilimini artırarak sülfatların daha derinlere nüfuz etmesini ve bozulma mekanizmalarını hızlandırmaktadır. GCS30'un

SEM analizi, daha geniş mikro çatlamlar, artan gözeneklilik ve bağlayıcı ile agregalar arasındaki zayıf ITZ'leri göstermekte olup, bu da iç hasarın UCS30'a kıyasla daha agresif bir şekilde ilerlediğini göstermektedir. Bu, GCS'nin başlangıçtaki partikül paketlemesini iyileştirse de, yüksek LOI (külleri kaybı) içeriği (%30,5); agresif sülfat ortamlarına maruz kaldığında uçucu bileşen salınımı ve artan gözeneklilikle sonuçlandığını göstermektedir. Referans karışımına kıyasla, aluminosilikat açısından zengin bileşimi nedeniyle daha yoğun ve daha stabil bir mikro yapıyı koruyan GCS30, en şiddetli kimyasal bozulmayı yaşadı ve yüksek GCS içeriğinin aşırı gözeneklilik yaratıp, istenmeyen sülfat reaksiyonlarını teşvik ettiğini, sülfat direncini önemli ölçüde zayıflattığını vurgulamaktadır. Genişleyici reaksiyon ürünlerinin (brucit, alçı taşı ve ettringit) oluşumu, yalnızca iç gerilimleri artırmakla kalmadı, aynı zamanda ilerleyen çatlakların yayılmasına neden olarak tüm test edilen karışımlar arasında en büyük güç kaybına yol açtı. GCS30'daki yüksek sülfat penetrasyonu, aşırı GCS yerine koymanın AAC'lerin uzun vadeli dayanıklılığını zayıflattığını ve reaktif bağlayıcının aşırı seyreltmesini ve aşırı mikro yapısal istikrarsızlığı önlemek için GCS içeriğinin sınırlandırılmasının önemini vurgulamaktadır. Bu bulgular, GCS'nin başlangıçtaki güç gelişimini iyileştirse de, aşırı kullanımının sülfat direncini önemli ölçüde azalttığını ve daha düşük yerine koyma oranlarının ($\leq\%10$) sülfat açısından zengin ortamlarda dayanıklılığın sağlanması için daha uygun olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.44 GCS30 Numunelerin mikro yapısı MgSO₄

5. SONUÇ

Bu çalışma, alkali-aktivasyonlu kompozitlerde (AAC) yerleşik granüle edilmiş yüksek fırın cürufu (GBFS) yerine, öğütülmüş beton çamuru (GCS) ve öğütülmemiş beton çamuru (UCS) kullanmanın etkilerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmiştir. Araştırma, bu malzemelerin işlenebilirlik, mekanik dayanım, donma-çözülme dayanıklılığı, asit ve sülfat direnci ve yüksek sıcaklık stabilitesi üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Elde edilen bulgular, GCS ve UCS'nin, AAC'lerde anahtar performans kriterlerini koruyarak veya geliştirerek ek malzeme olarak kullanılabilirliğine dair değerli bilgiler sunmaktadır.

(a) AAC karışımlarının akışkanlığı, UCS içeriği arttıkça azalmıştır ve 30% UCS ikame seviyesinde maksimum azalma %38,53 olarak gözlemlenmiştir. Buna karşılık, GCS işlenebilirlik üzerinde minimal bir etki göstermiş, 30% ikame seviyesinde sadece %4,59'luk bir azalma meydana gelmiştir.

(b) 90 gün sonunda, UCS ile yapılan %5 ve %10 ikameler sırasıyla %15,5 ve %9,0 oranında dayanım artışı sağlamıştır. Ancak, daha yüksek UCS içerikleri (%20 ve %30) sırasıyla %8,2 ve %13,7 oranlarında dayanım kayıplarına yol açmıştır. GCS karışımları genel olarak üstün performans sergileyerek, %5; %10; %20 ve %30 ikame seviyelerinde sırasıyla %26,2; %21,5; %5,6 ve %5,2 oranlarında basınç dayanım artışı göstermiştir.

(c) UCS ikamesi %5 ve %10 seviyelerinde, eğilme dayanımını sırasıyla %33,2 ve %24,2 oranında artırırken, %20 ve %30 UCS ikamesi sırasıyla %2,5 ve %6,9 oranlarında azalmaya yol açmıştır. GCS ile güçlendirilmiş karışımlar, sırasıyla %5; %10; %20 ve %30 ikame seviyelerinde sırasıyla %46,8; %32,3; %18,2 ve %6,5 oranlarında dayanım artışı sağlamıştır.

(d) En düşük porozite (4,23%) %5 GCS karışımında kaydedilmiş olup, bu, referans karışıma göre %35,8'lik bir azalma göstermektedir. En yüksek porozite (7,77%) %20 UCS karışımında gözlemlenmiş olup, bu da %17,9'luk bir artışı temsil etmektedir.

(e) En düşük emicilik ($1,81 \text{ kg/m}^2$) %5 UCS karışımında kaydedilmiş olup, bu, referans karışıma göre %47,8'lik bir azalma göstermektedir. Buna karşılık, en yüksek emicilik ($4,09 \text{ kg/m}^2$) %20 UCS karışımında gözlemlenmiş olup, bu %18,2'lik bir artışı temsil etmektedir. GCS karışımları daha kontrollü bir emicilik artışı göstermiş ve değerleri $2,03$ ile $2,94 \text{ kg/m}^2$ arasında değişmiştir, bu da UCS'ye kıyasla kapiler su emilimine karşı daha iyi direnç sağladığını göstermektedir.

(f) 800°C 'de, tüm AAC karışımları %69,1 ile %77,7 arasında basınç dayanım kayıpları göstermiştir. %20 GCS karışımı en düşük dayanım kaybını yaşarken, %30 UCS karışımı en yüksek bozulmayı yaşamıştır.

(g) 100 donma-çözülme döngüsünden sonra, dayanım kayıpları %15,7 ile %53,6 arasında değişmiştir. %5 UCS karışımı en iyi donma-çözülme direncini gösterirken; %30 GCS karışımı en yüksek bozulmayı göstermiştir.

(h) H_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerine 90 gün maruz kalma, tüm karışımlarda dayanım kaybını artırmıştır. En yüksek dayanım kaybı (35,3%); MgSO_4 maruziyeti sonrası %30 GCS karışımında gözlemlenmiş, UCS karışımları ise H_2SO_4 maruziyeti sonucunda daha fazla bozulma göstermiştir. UCS ve GCS'nin varlığı, AAC'lerin agresif kimyasal ortamlara karşı duyarlılığını artırmış ve daha yüksek ikame seviyeleri, daha büyük bozulmalara yol açmıştır.

GCS, UCS'ye kıyasla GBFS için daha etkili bir ikame malzeme olarak kanıtlanmış ve tüm test edilen seviyelerde üstün mekanik performans ve dayanıklılık sunmuştur. Ancak, aşırı UCS veya GCS ikamesi, dayanım ve dayanıklılığı olumsuz yönde etkilemiştir. Bu bulgular, geri dönüştürülmüş beton çamurunun sürdürülebilir AAC üretimindeki potansiyelini vurgularken, mekanik performans ve dayanıklılığı dengelemek için optimal ikame seviyelerinin önemini ortaya koymaktadır.

Orta düzeyde GCS ikamesi ($\leq\%10$), mekanik dayanım, mikro yapısal bütünlük ve kimyasal dayanıklılığı artırarak AAC üretimi için uygulanabilir bir malzeme haline getirir. Ancak, aşırı GCS ikamesi ($\geq\%20$), donma-çözülme direncini ve uzun vadeli dayanıklılığı olumsuz yönde etkiler, bu da dikkatli bir optimizasyon gerektirir. UCS AAC'lerde kullanılabilirse de, daha yüksek UCS içeriği, daha iri tane boyutu ve düşük

reaktivite nedeniyle işlenebilirliği, mekanik dayanımı ve dayanıklılığı olumsuz etkiler. Gelecekteki araştırmalar, UCS performansını iyileştirmek için daha ince öğütme veya yüzey modifikasyonu gibi ön işleme yöntemlerini incelemelidir. Bulgular ayrıca, GCS tabanlı AAC'lerin, geleneksel çimento esaslı malzemelere sürdürülebilir alternatifler olarak potansiyelini vurgulamaktadır, bu da inşaat sektöründe atık değerlemesi ve karbon ayak izinin azaltılmasına katkıda bulunur. GCS ve UCS'nin geopolimer bazlı kompozitlerde endüstriyel kabulünü kolaylaştırmak için uzun vadeli dayanıklılık, saha uygulamaları ve maliyet-fayda analizi üzerine daha fazla araştırma yapılması önerilmektedir.

Bu çalışma, GCS ve UCS'nin AAC'lere dahil edilmesinin, inşaat malzemelerinde sürdürülebilirliği artırma konusunda umut verici bir strateji sunduğunu göstermektedir. GCS, optimal ikame seviyelerinde mekanik özellikleri ve dayanıklılığı iyileştirirken, UCS'nin karşılaştırılabilir performans elde etmesi için daha fazla iyileştirmeye ihtiyaç duyduğu anlaşılmaktadır. Sonuçlar, alkali aktive malzemelerde (AAM'ler) sanayi yan ürünlerinin kullanımını optimize etmeye yönelik gelecekteki araştırmalar için bir temel sunmakta ve nihayetinde döngüsel ekonomi ve çevre dostu yapı çözümlerine katkı sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- Aliques-Granero, J., Tognonvi, M.T., & Tagnit-Hamou, A. (2019). Durability study of AAMs: Sulfate attack resistance, *Construction and Building Materials* 229, 117100.
- Amer, I., Kohail, M., El-Feky, M.S., Rashad, A., & Khalaf, M.A. (2021). Characterization of alkali-activated hybrid slag/cement concrete, *Ain Shams Eng J* 12(1), 135-144.
- Arslan, S., Öz, A., Benli, A., Bayrak, B., Kaplan, G., & Aydin, A.C. (2024). Sustainable use of silica fume and metakaolin in slag/fly ash-based self-compacting geopolymer composites: Fresh, physico-mechanical and durability properties, *Sustain Chem Pharm* 38.
- ASTM (2013). ASTM C642 - 13 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2013.
- ASTM (2015) ASTM C666/C666M-15, 2015 Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2015). ASTM C1437 - 15 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM (2018). ASTM C349 - 18 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2019). ASTM C348 - 19 Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Audo, M., Mahieux, P.Y., & Turcry, P. (2016). Utilization of sludge from ready-mixed concrete plants as a substitute for limestone fillers, *Construction and Building Materials* 112, 790-799.
- Bayrak, B., Benli, A., Alcan, H.G., Çelebi, O., Kaplan, G. & Aydin, A.C. (2023). Recycling of waste marble powder and waste colemanite in ternary-blended green geopolymer composites: Mechanical, durability and microstructural properties, *Journal of Building Engineering* 73.
- Bayraktar, O.Y., Benli, A., Bodur, B., Öz, A., & Kaplan, G. (2024). 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* 411.
- Bayraktar, O.Y., Bozkurt, T.H., Benli, A., Koksal, F., Tuerkoglu, M., & Kaplan, G. (2023). Slag/diatomite-based alkali-activated lightweight composites containing

waste andesite sand: mechanical, insulating, microstructural and durability properties, *Sustain Chem Pharm* 36.

Bayraktar, O.Y., Bozkurt, T.H., Benli, A., Koksall, F., Tuerkoglu, M., & Kaplan, G. (2023). Sustainable one-part alkali activated slag/fly ash Geo-SIFCOM containing recycled sands: Mechanical, flexural, durability and microstructural properties, *Sustain Chem Pharm* 36.

Bayraktar, O.Y., Kaplan, G., & Benli, A. (2022). The effect of recycled fine aggregates treated as washed, less washed and unwashed on the mechanical and durability characteristics of concrete under MgSO₄ and freeze-thaw cycles, *Journal of Building Engineering* 48, 103924.

Bayraktar, O.Y., Özel, H.B., Benli, A., Yilmazoglu, M.U., Türkel, I.H., Dal, B.B., Sevik, H., & Kaplan, G. (2024). Sustainable foam concrete development: Enhancing durability and performance through pine cone powder and fly ash incorporation in alkali-activated geopolymers, *Construction and Building Materials* 457.

Bayraktar, O.Y., Yakupoglu, U., & Benli, A. (2023). Slag/diatomite-based alkali-activated lightweight composites containing waste andesite sand: mechanical, insulating, microstructural and durability properties, *Arch Civ Mech Eng* 23(4).

Benli, A. (2024). 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* 438.

Benli, A., Bayraktar, O.Y., Karataş, M., Bodur, B., Yılmazoğlu, M.U., & Kaplan, G. (2025). Dunite powder as a green precursor in one-part alkali-activated composites: Effects on mechanical and durability properties, *Sustain Chem Pharm* 44, 101964.

Binici, H., Kapur, S., Arocena, J., & Kaplan, H. (2012). The sulphate resistance of cements containing red brick dust and ground basaltic pumice with sub-microscopic evidence of intra-pore gypsum and ettringite as strengtheners, *Cement Concrete Comp* 34(2), 279-287.

Bodur, B., Benli, A., Bayraktar, O.Y., Alcan, H.G., Kaplan, G., & Aydın, A.C. (2025). Impact of attapulgitite and basalt fiber additions on the performance of pumice-based foam concrete: mechanical, thermal, and durability properties, *Arch Civ Mech Eng* 25(2), 74.

Bogas, J., Carriço, A., & Pereira, M. (2019). Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars, *Journal of Cleaner Production* 218, 377-389.

Burciaga-Díaz, O., Escalante-García, J.I. (2017). Comparative performance of alkali activated slag/metakaolin cement pastes exposed to high temperatures, *Cement and Concrete Composites* 84, 157-166.

- Cai, R.J., & Ye, H.L. (2021). Clinkerless ultra-high strength concrete based on alkali-activated slag at high temperatures, *Cement and Concrete Research* 145.
- Canfield, G.M., Eichler, J., Griffith, K., & Hearn, J.D. (2014). The role of calcium in blended fly ash geopolymers, *Journal of materials science* 49, 5922-5933.
- Cantero, B., Bravo, M., de Brito, J., del Bosque, I.F.S., & Medina, C. (2020). Mechanical behaviour of structural concrete with ground recycled concrete cement and mixed recycled aggregate, *Journal of Cleaner Production* 275.
- Chatveera, B., Lertwattanaruk, P., & Makul, N. (2006). Effect of sludge water from ready-mixed concrete plant on properties and durability of concrete, *Cement Concrete Comp* 28(5), 441-450.
- Chen, X., Li, Y., Bai, H., & Ma, L. (2021). Utilization of recycled concrete powder in cement composite: Strength, microstructure and hydration characteristics, *J Renew Mater* 9(12), 2189-2208.
- Chen, X., Li, Y., Zhu, Z., & Ma, L. (2022). Evaluation of waste concrete recycled powder (WCRP) on the preparation of low-exothermic cement, *Journal of Building Engineering* 53, 104511.
- Chen, X.D., Wu, J., Ning, Y.J., & Zhang, W. (2022). Experimental study on the effect of wastewater and waste slurry of mixing plant on mechanical properties and microstructure of concrete, *Journal of Building Engineering* 52.
- Dener, M., Karatas, M., & Mohabbi, M. (2021). Sulfate resistance of alkali-activated slag/Portland cement mortar produced with lightweight pumice aggregate, *Construction and Building Materials* 304.
- Deng, X., Guo, H., Tan, H., He, X., Zheng, Z., Su, Y., & Yang, J. (2021). An accelerator prepared from waste concrete recycled powder and its effect on hydration of cement-based materials, *Construction and Building Materials* 296, 123767.
- Duan, W.W., Zhuge, Y., Chow, C.W.K., Keegan, A., Liu, Y., & Siddique, R. (2022). Mechanical performance and phase analysis of an eco-friendly alkali-activated binder made with sludge waste and blast-furnace slag, *Journal of Cleaner Production* 374.
- Gencil, O., Bayraktar, O.Y., Kaplan, G., Arslan, O., Nodehi, M., Benli, A., Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2022). Lightweight foam concrete containing expanded perlite and glass sand: Physico-mechanical, durability, and insulation properties, *Construction and Building Materials* 320.
- Gencil, O., Benli, A., Bayraktar, O.Y., Kaplan, G., Sutcu, M., & Elabade, W.A.T. (2021). Effect of waste marble powder and rice husk ash on the microstructural, physico-mechanical and transport properties of foam concretes exposed to high temperatures and freeze-thaw cycles, *Construction and Building Materials* 291.

- Gencil, O., Nodehi, M., Bayraktar, O.Y., Kaplan, G., Benli, A., Koksall, F., Bilir, T., Siddique, R., & Ozbakkaloglu, T. (2022). The use of waste marble for cleaner production of structural concrete: A comprehensive experimental study, *Construction and Building Materials* 361.
- Gu, L., Bennett, T., Visintin, P. (2019). Sulphuric acid exposure of conventional concrete and alkali-activated concrete: Assessment of test methodologies, *Construction and Building Materials* 197, 681-692.
- He, X.Y., Zheng, Z.Q., Ma, M.Y., Su, Y., Yang, J., Tan, H.B., Wang, Y.B., & Strnadell, B. (2020). New treatment technology: The use of wet-milling concrete slurry waste to substitute cement, *Journal of Cleaner Production* 242.
- He, Z.H., Han, X.D., Zhang, M.Y., Yuan, Q., Shi, J.Y., & Zhan, P.M. (2022). A novel development of green UHPC containing waste concrete powder derived from construction and demolition waste, *Powder Technology* 398.
- Huseien, G.F., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S.K., & Hussein, A.A. (2017). Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review, *Renew Sust Energ Rev* 80, 54-74.
- Huseien, G.F., Sam, A.R.M., Shah, K.W., Mirza, J., & Tahir, M.M. (2019). Evaluation of alkali-activated mortars containing high volume waste ceramic powder and fly ash replacing GBFS, *Construction and Building Materials* 210, 78-92.
- Hussin, M.W., Bhutta, M.A.R., Azreen, M., Ramadhansyah, P.J., & Mirza, J. (2015). Performance of blended ash geopolymer concrete at elevated temperatures, *Materials and Structures* 48(3), 709-720.
- Hwang, C.L., Chiang, C.H., Huynh, T.P., Vo, D.H., Jhang, B.J., & Ngo, S.H. (2017). Properties of alkali-activated controlled low-strength material produced with waste water treatment sludge, fly ash, and slag, *Construction and Building Materials* 135, 459-471.
- Iizuka, A., Sasaki, T., Honma, M., Yoshida, H., Hayakawa, Y., Yanagisawa, Y., & Yamasaki, A. (2017). Pilot-Scale Operation of a Concrete Sludge Recycling Plant and Simultaneous Production of Calcium Carbonate, *Chem Eng Commun* 204(1), 79-85.
- Ismail, I., Bernal, S.A., Provis, J.L., Nicolas, R.S., Hamdan, S., & van Deventer, J.S.J. (2014). Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash, *Cement Concrete Comp* 45, 125-135.
- Izzat, A.M., Al Bakri, A.M.M., Kamarudin, H., Sandu, A.V., Ruzaidi, G.C.M., Faheem, M.T.M., & Moga, L.M. (2013). Sulfuric Acid Attack on Ordinary Portland Cement and Geopolymer Material, *Rev Chim-Bucharest* 64(9), 1011-1014.
- Jin, K.R., Zhou, X.M., Wang, D.Z., Bi, W.L., Lu, Y., & Wang, J.H. (2024). Performance of cementitious materials prepared with magnesium slag and concrete slurry waste, *Journal of Building Engineering* 89.

- Junaid, M.T., Khennane, A., Kayali, O., Sadaoui, A., Picard, D., & Fafard, M. (2014). Aspects of the deformational behaviour of alkali activated fly ash concrete at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research* 60, 24-29.
- Kaplan, G., Coskan, U., Benli, A., Bayraktar, O.Y., Kucukbaltaci, A.B. (2021). The impact of natural and calcined zeolites on the mechanical and durability characteristics of glass fiber reinforced cement composites, *Construction and Building Materials* 311.
- Kazaz, A. & Ulubeyli, S. (2016). Current Methods for the Utilization of the Fresh Concrete Waste Returned to Batching Plants, *World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium 2016, Wmcaus 161* (2016) 42-46.
- Keppert, M., Davidová, V., Dousová, B., Scheinherrová, L., & Reiterman, P. (2021). Recycling of fresh concrete slurry waste as supplementary cementing material: Characterization, application and leaching of selected elements, *Construction and Building Materials* 300.
- Kong, D.L.Y., & Sanjayan, J.G. (2010). Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete, *Cement and Concrete Research* 40(2), 334-339.
- Li, B., Zhang, W.J., Fang, X.H., Kong, X.Q., Liu, F., & Li, G.J. (2024). Coupling effects of sewage sludge and recycled fine aggregate on the properties of geopolymer recycled mortars, *Case Studies in Construction Materials* 20.
- Li, Q., Zhou, X.J., & Sun, K.W. (2013). Analysis of the Rate Constant for Hydration Kinetics of the Cement and Ash Fly in the Solidified Residues System Based on the Measurement of Ca (OH) 2, *Applied Mechanics and materials* 380, 4395-4399.
- Li, S.J., Gao, J.M., Li, Q.Y., & Zhao, X.L. (2021). Investigation of using recycled powder from the preparation of recycled aggregate as a supplementary cementitious material, *Construction and Building Materials* 267.
- Li, Z., Bian, Y., Zhao, J., Wang, Y., & Yuan, Z. (2022). Recycled concrete fine powder (RFP) as cement partial replacement: Influences on the physical properties, hydration characteristics, and microstructure of blended cement, *Journal of Building Engineering* 62, 105326.
- Liu, J., Doh, J.H., Ong, D.E.L., Wang, S., Yang, Y., Dinh, H.L., & Zi, G. (2023). Correlation between dissolubilities of Si, Al, and Fe from aluminosilicate precursor and strength of fly ash-based geopolymer, *Construction and Building Materials* 393.
- Liu, J.R., Doh, J.H., Dinh, H.L., Ong, D.E.L., Zi, G., & You, I. (2022). Effect of Si/Al molar ratio on the strength behavior of geopolymer derived from various industrial waste: A current state of the art review, *Construction and Building Materials* 329.

- Liu, M., Hu, R.H., Zhang, Y.C., Wang, C.Q., & Ma, Z.M. (2023). Effect of ground concrete waste as green binder on the micro-macro properties of eco-friendly metakaolin-based geopolymer mortar, *Journal of Building Engineering* 68 (2023).
- Lu, B., Shi, C., Zhang, J., & Wang, J. (2018). Effects of carbonated hardened cement paste powder on hydration and microstructure of Portland cement, *Construction and Building Materials* 186, 699-708.
- Lu, C.F., Zhang, Z.H., Shi, C.J., Li, N., Jiao, D.W., & Yuan, Q. (2021). Rheology of alkali-activated materials: A review, *Cement Concrete Comp* 121.
- Ma, Z., Shen, J., Wu, H., & Zhang, P. (2022). Properties and activation modification of eco-friendly cementitious materials incorporating high-volume hydrated cement powder from construction waste, *Construction and Building Materials* 316, 125788.
- Marvila, M., de Matos, P., Rodriguez, E., Monteiro, S.N., & de Azevedo, A.R.G. (2022). Recycled Aggregate: A Viable Solution for Sustainable Concrete Production, *Materials* 15(15).
- Mendes, A., Sanjayan, J., & Collins, F. (2007). Phase transformations and mechanical strength of OPC/Slag pastes submitted to high temperatures, *Materials and Structures* 41(2), 345-350.
- Meng, T., Hong, Y., Ying, K., & Wang, Z. (2021). Comparison of technical properties of cement pastes with different activated recycled powder from construction and demolition waste, *Cement Concrete Comp* 120, 104065.
- Monzó, J., Payá, J., Borrachero, M., & Girbés, I. (2003). Reuse of sewage sludge ashes (SSA) in cement mixtures: the effect of SSA on the workability of cement mortars, *Waste Manage* 23(4), 373-381.
- Oh, D., Noguchi, T., Kitagaki, R., & Choi, H. (2021). Proposal of demolished concrete recycling system based on performance evaluation of inorganic building materials manufactured from waste concrete powder, *Renew Sust Energ Rev* 135, 110147.
- Oyebisi, S., Ede, A., Olutoge, F., & Omole, D. (2020). Geopolymer concrete incorporating agro-industrial wastes: Effects on mechanical properties, microstructural behaviour and mineralogical phases, *Construction and Building Materials* 256.
- Pan, Z., Tao, Z., Cao, Y.F., Wuhrer, R., & Murphy, T. (2018). Compressive strength and microstructure of alkali-activated fly ash/slag binders at high temperature, *Cement Concrete Comp* 86, 9-18.
- Park, S.M., Jang, J.G., Lee, N.K., & Lee, H.K. (2016). Physicochemical properties of binder gel in alkali-activated fly ash/slag exposed to high temperatures, *Cement and Concrete Research* 89, 72-79.

- Prosek, Z., Nezerka, V., Hluzek, R., Trejbal, J., Tesarek, P., & Karra'a, G. (2019). Role of lime, fly ash, and slag in cement pastes containing recycled concrete fines, *Construction and Building Materials* 201, 702-714.
- Ren, J., Xue, Y.Q., Zhang, J., Liu, B.R.X., Luo, S.Q., Xu, S.Y., Xing, F., & Liu, M. (2022). Pre-treatment of reclaimed concrete slurry waste for substituting cementitious materials: Effect of treatment approach and substitution content, *Journal of Cleaner Production* 380.
- Ren, P.F., Li, B., Yu, J.G., & Ling, T.C. (2020). Utilization of recycled concrete fines and powders to produce alkali-activated slag concrete blocks, *Journal of Cleaner Production* 267.
- Rovnaník, P., Bayer, P., & Rovnaníková, P. (2013). Characterization of alkali activated slag paste after exposure to high temperatures, *Construction and Building Materials* 47, 1479-1487.
- Schmidt, T., Lothenbach, B., Romer, M., Neuenschwander, J., & Scrivener, K.J.C. (2009). Physical and microstructural aspects of sulfate attack on ordinary and limestone blended Portland cements, *Cement and Concrete Research* 39(12), 1111-1121.
- Sealey, B., Phillips, P.S., & Hill, G.J.R. (2001). Conservation, Waste management issues for the UK ready-mixed concrete industry, *Resources, Conservation and Recycling* 32(3-4), 321-331.
- Sui, Y., Liu, S., Ou, C., Liu, Q., & Meng, G. (2021). Experimental investigation for the influence of graphene oxide on properties of the cement-waste concrete powder composite, *Construction and Building Materials* 276, 122229.
- Sun, C., Chen, L., Xiao, J., Zuo, J., & Wu, H. (2022). Effects of eco powders from solid waste on freeze-thaw resistance of mortar, *Construction and Building Materials* 333, 127405.
- Sun, K.K., Ali, H.A., Xuan, D.X., & Poon, C.S. (2024). Sulfuric acid resistance behaviour of alkali-activated slag and waste glass powder blended precursors, *Cement Concrete Comp* 145.
- Tam, V.W. (2008). Economic comparison of concrete recycling: A case study approach, *Resources, conservation and recycling*, 52(5), 821-828.
- Tang, Q., Ma, Z.M., Wu, H.X., & Wang, W. (2020). The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review, *Cement Concrete Comp* 114.
- Tian, Y., Xing, J., Zhao, Y., Sun, X., Wu, P., & Qiu, J. (2021). Influence of aluminum sulfate on strength of CaO-activated slag system, *Construction and Building Materials* 306, 124895.

- Turker, H.T., Balcikanli, M., Durmus, I.H., Ozbay, E., & Erdemir, M. (2016). Microstructural alteration of alkali activated slag mortars depend on exposed high temperature level, *Construction and Building Materials* 104, 169-180.
- Türker, H.T., Balcikanli, M., Durmus, I.H., Özbay, E., & Erdemir, M. (2016). Microstructural alteration of alkali activated slag mortars depend on exposed high temperature level, *Construction and Building Materials* 104, 169-180.
- Turkoglu, M., Bayraktar, O.Y., Benli, A., & Kaplan, G. (2023). 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* 68.
- Ulugöl, H., Kul, A., Yildirim, G., Sahmaran, M., Aldemir, A., Figueira, D., & Ashour, A. (2021). Mechanical and microstructural characterization of geopolymers from assorted construction and demolition waste-based masonry and glass, *Journal of Cleaner Production* 280.
- Vashistha, P., Oinam, Y., Kim, H.K., & Pyo, S. (2023). Effect of thermo-mechanical activation of waste concrete powder (WCP) on the characteristics of cement mixtures, *Construction and Building Materials* 362, 129713.
- Wang, H., Wang, L., Shen, W.F., Cao, K., Sun, L., Wang, P.J., & Cui, L.Y. (2022). Compressive Strength, Hydration and Pore Structure of Alkali-Activated Slag Mortars Integrating with Recycled Concrete Powder as Binders, *Ksce Journal of Civil Engineering* 26(2), 795-805.
- Wang, J.C., Liu, J.R., Ren, Z.Y., Sun, T.Y., & Doh, J.H. (2024). Mechanical and micro properties of concrete slurry waste geopolymer under various curing conditions, *Construction and Building Materials* 435.
- Wu, H., Liang, C., Wang, C., & Ma, Z. (2022). Properties of green mortar blended with waste concrete-brick powder at various components, replacement ratios and particle sizes, *Construction and Building Materials* 342, 128050.
- Wu, H., Liang, C., Xiao, J., & Ma, Z. (2021). Properties and CO₂-curing enhancement of cement-based materials containing various sources of waste hardened cement paste powder, *Journal of Building Engineering* 44, 102677.
- Wu, H., Liang, C., Xiao, J., Xu, J., & Ma, Z. (2022). Early-age behavior and mechanical properties of cement-based materials with various types and fineness of recycled powder, *Structural Concrete* 23(2), 1253-1272.
- Wu, H., Yang, D., & Ma, Z. (2021). Micro-structure, mechanical and transport properties of cementitious materials with high-volume waste concrete powder and thermal modification, *Construction and Building Materials* 313, 125477.
- Wu, H., Yang, D., Xu, J., Liang, C., & Ma, Z. (2021). Water transport and resistance improvement for the cementitious composites with eco-friendly powder from various concrete wastes, *Construction and Building Materials* 290, 123247.

- Wu, H.X., Wang, C.Q., & Ma, Z.M. (2022). Drying shrinkage, mechanical and transport properties of sustainable mortar with both recycled aggregate and powder from concrete waste, *Journal of Building Engineering* 49.
- Xiao, J.Z., Ma, Z.M., Sui, T.B., Akbarnezhad, A., & Duan, Z.H. (2018). Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste, *Journal of Cleaner Production* 188, 720-731.
- Xuan, D.X., Poon, C.S., & Zheng, W. (2018). Management and sustainable utilization of processing wastes from ready-mixed concrete plants in construction: A review, *Resour Conserv Recy* 136, 238-247.
- Xuan, D.X., Zhan, B.J., Poon, C.S., & Zheng, W. (2016). Carbon dioxide sequestration of concrete slurry waste and its valorisation in construction products, *Construction and Building Materials* 113, 664-672.
- Xuan, D.X., Zhan, B.J., Poon, C.S., & Zheng, W. (2016). Innovative reuse of concrete slurry waste from ready-mixed concrete plants in construction products, *J Hazard Mater* 312, 65-72.
- Yang, D.Y., Liu, M., Zhang, Z.B., Yao, P.P., & Ma, Z.M. (2022). Properties and modification of sustainable foam concrete including eco-friendly recycled powder from concrete waste, *Case Studies in Construction Materials* 16.
- Yang, T.E., Yang, S.T., Sun, Z.K., Wang, S., & Pang, R.Y. (2025). Deterioration mechanism of alkali-activated slag and fly ash blended recycled aggregate concrete under freeze-thaw cycles, *Journal of Building Engineering* 99.
- Yao, T., Wang, Y., Zhang, W., Li, M., Luo, S., & Qi, S. (2024). Influence of recycled waste concrete powders on the performances of sulphoaluminate cement, *Construction and Building Materials* 426, 136226.
- Ye, H.L., Chen, Z.J., & Huang, L. (2019). Mechanism of sulfate attack on alkali-activated slag: The role of activator composition, *Cement and Concrete Research* 125.
- Ye, T.H., Xiao, J.Z., Duan, Z.H., & Li, S.S. (2022). Geopolymers made of recycled brick and concrete powder - A critical review, *Construction and Building Materials* 330.
- Yön, M.S., & Karatas, M. (2024). Resistance to magnesium sulphate attack of binary and ternary cementless self-compacting alkali-activated mortar, *Journal of Building Engineering* 95.
- Yön, M.S., Yön, B., Karatas, M., & Benli, A. (2024). Sustainable use of boron waste and volcanic scoria in slag-based self-compacting alkali-activated mortars: Fresh, mechanical and durability properties, *Sustain Chem Pharm* 41.
- Zhang, D.S., Zhang, S.X., Huang, B.W., Yang, Q.N., & Li, J.B. (2022). Comparison of mechanical, chemical, and thermal activation methods on the utilisation of

- recycled concrete powder from construction and demolition waste, *Journal of Building Engineering* 61.
- Zhang, H.H., Xiao, J.Z., Tang, Y.X., Duan, Z.H. & Poon, C.S. (2022). Long-term shrinkage and mechanical properties of fully recycled aggregate concrete: Testing and modelling, *Cement Concrete Comp* 130.
- Zhang, J., Shi, C.J., Zhang, Z.H., & Hu, X. (2022). Reaction mechanism of sulfate attack on alkali-activated slag/fly ash cements, *Construction and Building Materials* 318.
- Zhang, P., Ding, J.Y., Dai, X.B., Zheng, Y.X., & Zheng, M.Y. (2025). Mechanical properties of geopolymer concrete solidified with waste materials, *Construction and Building Materials* 460.
- Zhang, R., He, H.Y., Song, Y.H., Zhi, X.D., & Fan, F. (2023). Influence of mix proportioning parameters and curing regimes on the properties of ultra-high strength alkali-activated concrete, *Construction and Building Materials* 393.
- Zhao, Y.S., Gao, J.M., Liu, C.B., Chen, X.M., & Xu, Z.H. (2020). The particle-size effect of waste clay brick powder on its pozzolanic activity and properties of blended cement, *Journal of Cleaner Production* 242.
- Zhu, S.C., Luo, L., Qin, Y.J., & Li, Y.S. (2025). Study on the effect of cellulose nanocrystals on the pore structure and drying shrinkage of alkali-activated recycled ultra-high performance concrete: A multifractal theory, *Construction and Building Materials* 463.
- Zhu, X., Jamal, A.S., Zhang, M., Liu, B., & Shi, J. (2025). Energy consumption, carbon emissions and cost analysis of accelerated curing: A case study of hybrid alkali-activated cement, *Renew Sust Energ Rev* 210, 115206.