T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİYEL BİR ATIĞIN BAĞLAYICILIK ÖZELLİĞİNİN ALTERNATİF YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI

Senem BİLİCİ

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Programı

Danışman

Prof. Dr. Nihat KABAY

Mart, 2023

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİYEL BİR ATIĞIN BAĞLAYICILIK ÖZELLİĞİNİN ALTERNATİF YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI

Senem BİLİCİ tarafından hazırlanan tez çalışması 30.03.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Nihat KABAY
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Nihat KABAY, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Didem OKTAY, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Zeynep BAŞARAN BUNDUR, Üye
Özyeğin Üniversitesi _____

Doç. Dr. Anıl NİŞ, Üye
İstanbul Gelişim Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Abdullah Huzeyfe AKÇA, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Nihat KABAY sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Endüstriyel Bir Atığın Bağlayıcılık Özelliğinin Alternatif Yöntemlerle Araştırılması başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Senem BİLİCİ

İmza

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü' nün FDK-2021-4322 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Canım babaanneme,

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmam süresince, deneysel çalışmalarda ve makale yazımlarında bilgi birikimini esirgemeden yanımda olan, yurtdışına gitmemi destekleyip deneyimlerini aktaran danışmanım Prof. Dr. Nihat KABAY'a çok teşekkür ederim. Akademik hayatım boyunca sizden öğrendiğim mesleki bilgi, akademik ahlak ve bakış açısı hep benimle olacak.

Tez izleme sunumlarında görüş ve önerilerini her zaman beni motive edici şekilde aktaran çok değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Didem OKTAY ve Doç. Dr. Zeynep BAŞARAN BUNDUR'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında yardımlarını esirgemeyen değerli ekip arkadaşlarım Nausad MIYAN ve Tarık ÖMÜR'e, akademik çalışmalarda kendimi yetersiz hissettiğim anlarda beni motive etmeyi kendine misyon edinen canım arkadaşım Öğr. Gör. Filiz TATLILIOĞLU'na çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarda hammadde desteği sağlayan OYAK Çimento Beton Kağıt Grubu'na ve kurumla aramızda köprü olan Betão Liz CEO Teknik Asistanı Dr. Hakan ÖZKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'ne FDK-2021-4322 numaralı projemizi maddi olarak destekledikleri için dolayı teşekkür ederim.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na 1059B142100361 başvuru numaralı 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı ile Portekiz'e gitmemi sağlayıp, Aveiro Üniversitesi'ndeki proje danışmanım Doç. Dr. Rui Miguel NOVAIS ile çalışmalarımı destekledikleri için dolayı teşekkür ederim.

Son olarak her zaman beni destekleyen merhum babaanneme, babama, anneme, ablam Özlem GEDİK'e, enerji kaynağım olan biricik yeğenim Koray GEDİK'e ve tüm eğitim hayatım boyunca azimli çalışmalarımdan dolayı kendime teşekkür ederim.

Senem BİLİCİ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ ix
KISALTMA LİSTESİ x
ŞEKİL LİSTESİ xii
TABLO LİSTESİ xiv
ÖZET xv
ABSTRACT xvii
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Taraması 1
1.2 Tezin Amacı 8
1.3 Hipotez 8
2 ATIK MALZEMELER 9
2.1 Atık Malzemelerin Çimento Esaslı Kompozitlerde Kullanımı 9
2.2 Atık Malzemelerin Alkali ile Aktifleştirilmiş Malzeme ve Geopolimer Üretiminde Kullanımı 12
3 MATERYAL VE METOT 18
3.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri 18
3.2 Deney Yöntemleri 20
4 PUZOLANİK AKTİVİTE DENEYLERİ VE SONUÇLARIN İRDELENMESİ 29
4.1 Malzeme Karakterizasyonu 29
4.2 Dayanım Aktivite İndeksi Değerlerinin Tayini 30
4.3 Kireç Harcı Basınç Dayanımı Değerlerinin Tayini 32
4.4 Frattini Deney Sonuçları 33
4.5 Priz Süresi Tayini 34
4.6 Yarı Adyabatik Kalorimetri Deney Sonucu 35
4.7 TG/DTA Analizi 36
4.8 SEM Analizi 38
4.9 XRD Analizi 39
5 ALKALİ-AKTİVE HAMUR SERİLERDE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÖN DENEYLER 41
5.1 Alkali-Aktive Hamur Tasarımı 41
5.2 Serilerin Basınç Dayanımı Sonuçları 44
6 DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ 51

6.1 Alkali-Aktive Hamur ve Harç Numunelerinin Hazırlanması 51
7 SONUÇ VE ÖNERİLER **71**
KAYNAKÇA **74**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **95**

SİMGE LİSTESİ

^{O}C	Derece (Santigrat)
N	Newton
MPa	Megapascal
µm	Mikrometre

KISALTMA LİSTESİ

AA	Alkali-Aktive Malzeme
AAP	Alkali-Aktive Hamur
AAM	Alkali-Aktive Harç
ASTM	American Society for Testing and Materials
AYÇ	Agrega Yıkama Çamuru
BC	Bakır Cürufu
ç/b	Çözelti/Bağlayıcı
DAİ	Dayanım Aktivite İndeksi
DC	Demir Cevheri
EDS	Enerji Dağılım Spektroskopisi
FT-IR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
GYFC	Granüle Yüksek Fırın Cürufu
I-K	Islanma-Kuruma
C-A-S-H	Kalsiyum-Aluminat-Silikat-Hidrat
$Ca(OH)_2$	Kalsiyum Hidroksit
KÇ	Kırmızı Çamur
MK	Metakaolin
NC	Nikel Cürufu
PK	Pirinç Kabuğu Külü
PÇ	Portland Çimentosu
KOH	Potasyum Hidroksit
SD	Silis Dumanı
N-A-S-H	Sodyum-Aluminat-Silikat-Hidrat
NaOH	Sodyum Hidroksit
Na_2CO_3	Sodyum Karbonat
N-M-A-S	Sodyum-Magnezyum-Aluminat-Silikat
Na_2SiO_3	Sodyum Silikat
Na_2SO_4	Sodyum Sülfat
SiO_2/Na_2O	Silikat Modülü
SK	Sönmüş Hava Kireci
s/b	Su/Bağlayıcı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu

TG/DTA	Termogravimetri/Diferansiyel Termal Analiz
UK	Uçucu Kül
XRF	X-Işını Floresans Spektrometresi
XRD	X-Işını Kırınım Yöntemi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Malzemelerin Al ve Ca miktarlarına göre sınıflandırılması 2
Şekil 1.2 AA bileşenleri 3
Şekil 1.3 Malzemenin donma-çözülme deneyi: a) birinci döngü, b) ikinci döngü 6
Şekil 2.1 Geopolimerizasyon mekanizması..... 14
Şekil 3.1 AYÇ'nin katı ve öğütülmüş halde görünümü 18
Şekil 3.2 1200 ^{o}C kapasiteli seramik fırını 21
Şekil 3.4 Küp numunelerde tek eksenli basınç deneyi 23
Şekil 3.5 Priz süresi tayini 24
Şekil 3.6 Yarı adyabatik kalorimetri a) deney düzeneği, b) şematik gösterimi..... 25
Şekil 3.7 Deney akış diyagramı 28
Şekil 4.1 AYÇ 20 ve AYÇ 700'ün dane boyutu dağılımı 29
Şekil 4.2 Farklı ısıl işleme maruz bırakılan AYÇ'lerin XRD desenleri 30
Şekil 4.3 a) AYÇ 20 ve b) AYÇ 700'ün SEM görüntüleri..... 30
Şekil 4.4 Farklı ısıl işleme maruz kalan AYÇ'lerin DAİ değerleri 31
Şekil 4.5 ASTM C618'e göre üretilen numuneler..... 32
Şekil 4.6 Numunelerin 7, 28 ve 90. günlerdeki DAİ değerleri..... 32
Şekil 4.7 TS25'e göre 7 günlük basınç dayanımı değerleri..... 33
Şekil 4.8 PÇ, AYÇ20 ve AYÇ700'ün Frattini deneyi sonuçları 34
Şekil 4.11 PÇ, AYÇ20 ve AYÇ700'ün a) 7, b) 28 ve c) 90 günlük TG ve DTG analizi 38
Şekil 4.12 PÇ, AYÇ20 ve AYÇ700'ün SEM görüntüleri 39
Şekil 5.1 GYFC ikamesi ve KOH çözeltisi ile üretilen serilerin 7. gün basınç dayanımları..... 44
Şekil 5.2 %50 GYFC ikamesi, NaOH ve Na_2SiO_3 çözeltileri ile üretilen serilerin 7 günlük basınç dayanımları 45
Şekil 5.4 % 50 AYÇ ile a) 6 M, b) 8 M ve c) 10 M NaOH üretilen seriler..... 47
Şekil 5.5 AYÇ'nin GYFC ile a) %40, b) %50 ve c) %60 ikamesi ve KOH çözeltisi ile üretilen serilerin dayanımları 48
Şekil 5.6 %50 GYFC ikamesi, sabit NaOH çözeltisi ile farklı Na_2SiO_3/NaOH oranları kullanılan serilerin dayanımları..... 49
Şekil 6.1 AAP numunelerinin basınç dayanımı gelişimi..... 53

Şekil 6.2 AAM numunelerinin basınç dayanımı gelişimi 53
Şekil 6.3 AAM numunelerinin su emme ve boşluk içeriği 55
Şekil 6.4 AAM numunelerinin a) birincil b) ikincil sorptivite değerleri 56
Şekil 6.5 AAM numunelerinin a) kuruma rötresi b) kütle kaybı değerleri 58
Şekil 6.6 AAM numunelerinin kuruma rötresi ve kütle kaybı arasındaki ilişkisi 58
Şekil 6.7 Numunelerin a) kılcal gözenek hacmi ve kuruma rötresi, b) jel gözenek hacmi ve kuruma rötresi, c) kılcal gözenek hacmi ve boşluk içeriği ve d) jel gözenek hacmi ve boşluk içeriği arasındaki ilişki 60
Şekil 6.8 I-K çevriminin a) basınç dayanımına b) kütle kaybına etkisi 62
Şekil 6.9 AAM numunelerinin I-K çevrimindeki artık basınç dayanımı değerleri 62
Şekil 6.10 AAM numunelerinin (a) I-K çevriminden önceki ve (b) 40.çevrimdeki görüntüleri 63
Şekil 6.11 a) Başlangıç ve bitiş priz süreleri ve b) başlangıç SiO_2/Al_2O_3 molar oranı ile AAP karışımlarının priz süreleri arasındaki ilişki 64
Şekil 6.12 SEM görüntüleri ve EDS sonuçları: a) P0, b) P25, c) P50, ve d) P75 68
Şekil 6.13 AAP numunelerinin üçlü faz diyagramı 69
Şekil 6.14 AAP numunelerinin XRD desenleri 70

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Bağlayıcı malzemelerin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri..... 19
Tablo 3.2 ASTM C311'e göre malzeme miktarları 21
Tablo 3.3 TS 25'e göre malzeme miktarları 22
Tablo 4.1. Hidratasyon süresi boyunca numunelerin CH miktarları (%) 38
Tablo 5.1 GYFC ikameli ve KOH çözeltisi ile üretilen serilerin malzeme miktarları .. 41
Tablo 5.2 GYFC ikameli, NaOH ve Na_2SiO_3 çözeltileri ile üretilen serilerin malzeme miktarları 42
Tablo 5.3 GYFC ikameli ve NaOH çözeltisi ile üretilen serilerin malzeme miktarları. 42
Tablo 5.4 GYFC ikameli ve KOH çözeltisi ile üretilen serilerin malzeme miktarları .. 43
Tablo 5.5 GYFC ikameli, NaOH ve farklı oranlarda Na_2SiO_3 çözeltileri ile üretilen serilerin malzeme miktarları..... 43
Tablo 5.6 GYFC ikameli, NaOH ve farklı Ms oranlarında Na_2SiO_3 çözeltileri ile üretilen serilerin malzeme miktarları 44
Tablo 6.1 AAP ve AAM numunelerinin karışım detayları 52
Tablo 6.2 GYFC esaslı AAM'lerin su emme ve boşluk içeriğinin karşılaştırılması..... 55

ÖZET

Endüstriyel Bir Atığın Bağlayıcılık Özelliğinin Alternatif Yöntemlerle Araştırılması

Senem BİLİCİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Nihat KABAY

Son yıllarda atık malzeme üretimindeki artış, sürdürülebilirliğin önündeki en büyük engellerden biri olarak görülmekte olup atık yönetimi kavramı inşaat sektöründe de ele alınmaya başlanmıştır. Sektördeki artan bağlayıcı malzeme talebi, araştırmacıları, Portland çimentosunun (PÇ) tamamen veya kısmen ikamesi için bu atık malzemeleri daha fazla kullanabilme yollarını araştırmaya itmiştir. PÇ'ye en yeni alternatifler, alkali-aktive malzemeler (AA) ve geopolimer bağlayıcılardır. Bu tür malzemeler, çimento esaslı bağlayıcılara alternatif olarak geliştirilip normal beton üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını azaltmakta ve çevreci bir çözüm olarak dikkat çekmektedir.

Bu tez çalışmasında daha önce bağlayıcı olarak kullanılmayan atık malzeme sınıfındaki agrega yıkama çamurunun (AYÇ) öncelikle puzolanik aktivitesi değerlendirilmiş, daha sonra alkali-aktive harç (AAH) numune üretiminde granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) ile ikameli olarak kullanılmıştır. Dayanım aktivite indeksi (DAİ) sonuçlarına göre ısıl işleme maruz bırakılmayan AYÇ içeren numunelerin DAİ sınır değerlerin üzerinde çıkmış, AYÇ ısıl işleme maruz bırakılınca DAİ de artmıştır. TS 25 standardına göre üretilen numunelerde de AYÇ ısıl işleme maruz bırakıldığında dayanım değerinde %50 artış görülmüştür. Ek olarak, Frattini deneyinde ısıl işleme maruz bırakılan/bırakılmayan numuneler tarafından portlanditin tüketildiği ve puzolanik özellik gösterdiği tespit edilip bu durum Termogravimetrik (TG/DTA) ve X-Işını Kırınım yöntemi (XRD) analizleri ile de desteklenmiştir. Yarı adyabatik kalorimetri deney sonucuna göre ise PÇ'ye %20 oranda ısıl işleme maruz kalan/kalmayan AYÇ ilavesinin priz süresi tayininde de belirlendiği üzere hidratasyon sürecinde benzer özellik gösterdiği görülmüştür. Puzolanik

aktivite için değerlendirilen numunelerin Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri yorumlandığında ısıl işleme maruz kalmayan AYÇ içeren serilerde etrenjit oluştuğu, bu sebeple mukavemet gelişiminin diğer numunelere göre daha yavaş olduğu belirlenmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise GYFC ağırlıkça %0, 25, 50 ve 75 oranında AYÇ ile ikame edilerek üretilen AA'ların fiziksel, mekanik ve dayanıklılık (kılcal su emme, ıslanma-kuruma çevrimi, rötre gibi) özellikleri araştırılmış, deney sonuçları detaylı içyapı incelemeleri ile desteklenmiştir. Deney sonuçlarından görülebileceği üzere GYFC'nin hızlı priz alma sürecinin, belirli bir oranda AYÇ ikamesi ile uzatılabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca AYÇ oranındaki artış ile harç numunelerin su emilimi, boşluk içeriği ve sorptivitesinde artış gözlenmiştir. Harç numunelerinin basınç dayanımı AYÇ oranındaki artışla azalış göstermesine rağmen %25 AYÇ içeren numunelerin makul bir dayanım değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Durabilite deneylerinden ıslanma-kuruma döngüsü sonuçlarına göre çevrimler tamamlandığında, tüm numunelerin yapısal bütünlüğünü koruduğu ve referans numunelerle karşılaştırıldığında AYÇ içeren numunelerin basınç dayanımlarının bir miktar arttığı belirlenmiş ve böylece daha çevreci olan bu malzemenin sıcak ve nemli iklimlerde kullanımının mümkün olabileceği öngörülmüştür. Arşimet deneyi sonuçlarına göre, AYÇ oranındaki artış ile kılcal gözenek hacmi artmış ve jel gözenek hacmi azalmış, bu durumun kuruma rötresi değerleri ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. XRD ve SEM analizi sonuçlarına göre AYÇ'nin kullanılmadığı referans seride ağırlıklı olarak C-A-S-H tipi jeller oluşurken, AYÇ ikamesi arttıkça N-A-S-H tipi jeller de oluşmaya başlamıştır.

Deney sonuçları değerlendirildiğinde, genel olarak inşaat malzemesi olarak GYFC bazlı AA üretmek için %25'e kadar AYÇ ikamesinin sürdürülebilirlik açısından uygun olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Agrega yıkama çamuru, alkali-aktive malzeme, puzolanik aktivite, dayanım, dayanıklılık

ABSTRACT

Investigation of the Binding Feature of an Industrial Waste by Using Alternative Methods

Senem BİLİCİ

Department of Civil Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Prof. Dr. Nihat KABAY

In recent years, the increase in waste material production has been one of the biggest obstacles to sustainability, and the waste management concept has been more significantly discussed in the construction sector. The increasing demand for binder materials in the industry has prompted researchers to explore ways to utilize these waste materials as a complete or partial replacement for Portland cement (PC). The recent alternatives for PC are alkali-activated materials (AA) and geopolymer binders. These materials are developed as an alternative to cement-based binders, reducing greenhouse gas emissions from PC production and attracting attention as an environmentally friendly solution.

In this thesis, initially, the pozzolanic activity of washing aggregate sludge (WAS) waste, which was not used as a binder before, was evaluated and then it has been used as a substitute for granulated blast furnace slag (GBFS) to produce alkali-activated mortar. According to the strength activity index (SAI) values of the samples incorporating untreated WAS, the SAI was found above the limit value, and this value increased after the heat treatment of WAS. Similarly, the test results in accordance with TS 25 showed that the strength of samples produced with heat treated WAS increased by 50%. In addition, the Frattini test results showed that portlandite was consumed by the specimens incorporating heat treated/untreated WAS and showed pozzolanic activity which was also supported by Thermogravimetric (TG/DTA) and X-Ray Diffraction (XRD) analyses. According to the semi-adiabatic calorimetry test results, it was observed that the replacement of PC with 20% heat-treated/untreated WAS showed similar characteristics

in terms of hydration kinetics and setting. The Scanning Electron Microscope (SEM) images of the samples showed the formation of ettringite in the samples containing untreated WAS, which reduced the strength development.

In the second stage of the study, the physical, mechanical, and durability (capillary water absorption, wet-dry cycle, shrinkage) properties of the AA samples produced by substituting WAS by 0, 25, 50 and 75% by weight of GBFS were investigated, and the test results were supported by detailed microstructural analyses. As can be seen in the test results, the rapid hardening of GYFC can be prevented by the incorporation of WAS. Furthermore, an increase in the water absorption, void content, and sorptivity of the mortar specimens was observed with the increase in the WAS content. Even though the compressive strength of the mortar decreases with the increase in the WAS, the samples containing 25% WAS possessed a reasonable strength. At the end of the wet-dry cycles, all specimens preserved their structural integrity and the compressive strength values of samples incorporating WAS increased compared to the reference, which might suggest that this eco-friendly material could be used in warm and humid climates. According to Archimedes' test results, with the increase in WAS content resulted in higher capillary pore volume and lower gel pore volume, which is compatible with drying shrinkage values. The XRD and SEM analyses showed that, while C-A-S-H type gels were formed predominantly in the reference sample, N-A-S-H type gels formed with the incorporation of WAS.

Considering the overall test results, in general, it was found that 25% WAS substitution is suitable in terms of sustainability to produce GBFS-based AA as a construction material.

Keywords: Washing aggregate sludge, alkali-activated material, pozzolanic activity, strength, durability

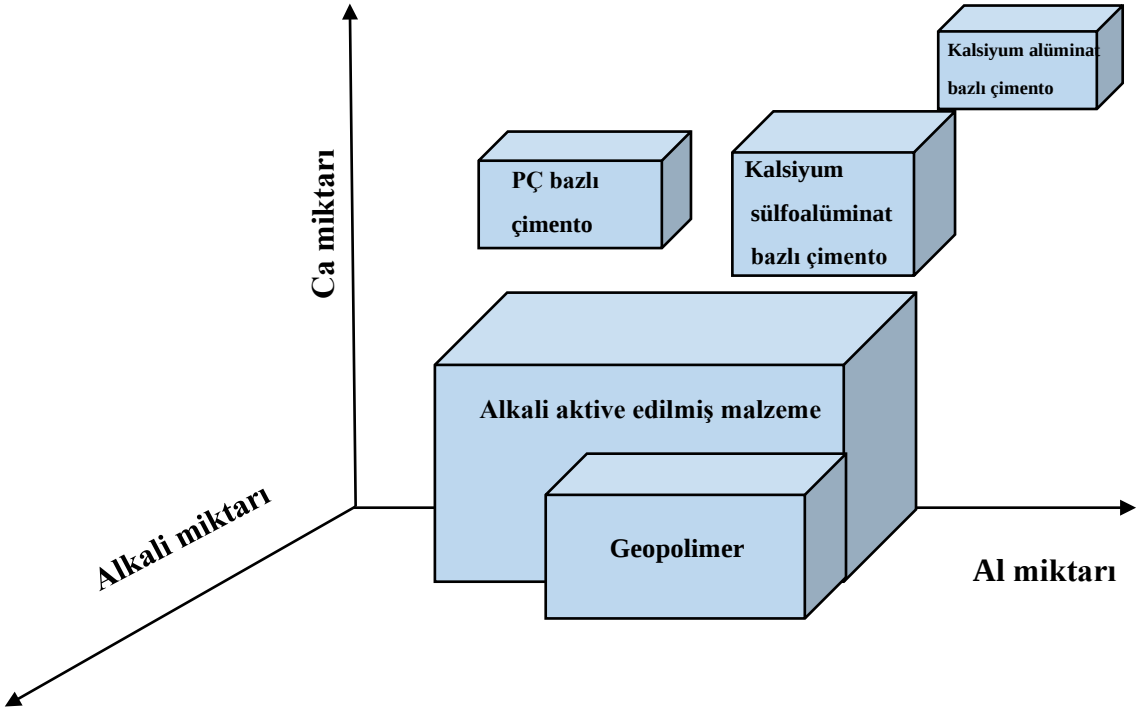
1
GİRİŞ

1.1 Literatür Taraması

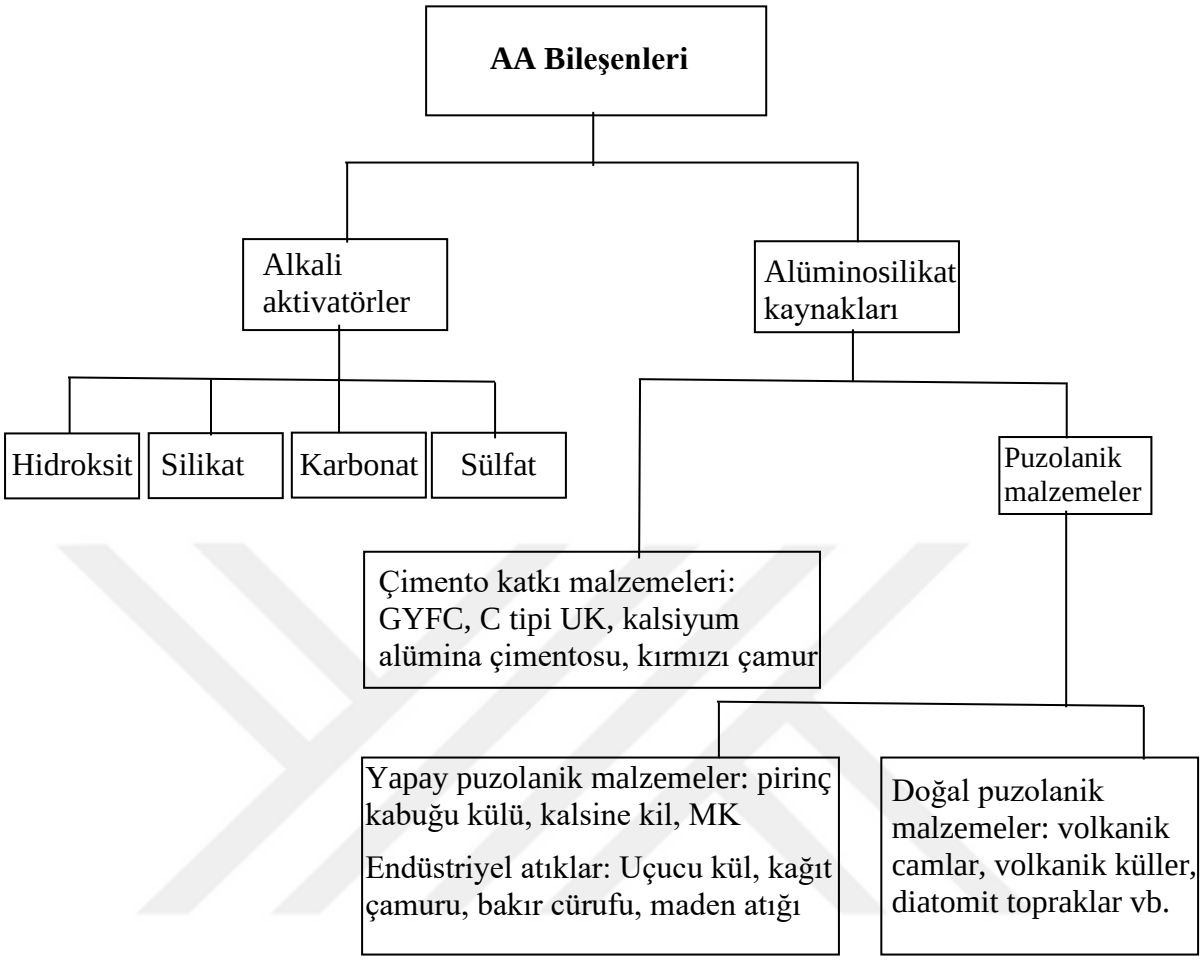
Türkiye'deki sera gazı emisyonlarının %7,2'sini çimento sektörü oluşturmakta ve özellikle klinker üretim aşamasında her 1 ton çimento üretimi için hammaddeden ve yakıttan kaynaklı yaklaşık 1 ton karbondioksit (CO_2) açığa çıkmaktadır [1]. Çimento üreticileri, alternatif yakıtlar kullanarak ve ikincil bağlayıcılar içeren kompozit çimento üretimine başlayarak bu değeri 600 kg'a kadar düşürmeyi başarmıştır [2]. Ancak, 2020 yılında dünya çapında Portland çimentosunu (PÇ) üretiminin yaklaşık 4,10 milyar ton olduğu açıklanmış, bu rakamın 2010 yılına göre %25 daha yüksek olduğu belirtilmiş ve 2030'da yaklaşık 4,83 milyar tona ulaşacağı tahmini yapılarak çevresel riskleri daha da arttıracağı öngörüsü paylaşılmıştır [3]. Ayrıca, son yıllarda sürekli artan CO_2 üretiminin yanı sıra atık malzeme üretimindeki artış sürdürülebilirliğin önündeki en büyük engellerden biri olarak görülüp her malzemenin yaşam döngüsünü ele alan yeni atık yönetimi kavramları, inşaat sektöründe de ele alınmaya başlamıştır. Sektördeki bağlayıcı malzemelere olan ihtiyaç, araştırmacıları PÇ'nin tamamen veya kısmen ikamesi için bu atık malzemeleri daha fazla sisteme dahil etmenin yollarını araştırmaya itmiştir [4]. Bu alandaki en yeni alternatifler, Alkali-aktive malzemeler (AA) ve geopolimerdir. Bu tür malzemeler, çimento esaslı bağlayıcılara alternatif olarak geliştirilmiş olup üretiminde hammadde olarak çeşitli atık malzemeler kullanıldığı için normal beton üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını azaltmakta ve çevreci bir çözüm olarak dikkat çekmektedir [5].

Endüstriyel atık malzemelerin PÇ ile ikamesi 1940'lara dayanmakta olup cüruf bazlı alüminosilikat malzemelerin kullanımı ile ilgili çalışmalar mevcuttur [6]. 1970'lerde ise Davidovits'in [7] geopolimer olarak adlandırıp hammadde olarak granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) ve metakaolinin (MK) kullanıldığı, ısıya dayanıklı malzeme üretimi hakkındaki çalışmalara başlanmıştır [8,9]. Şekil 1.1'den de görüleceği üzere literatürde bu yeni nesil malzemeler AA ve geopolimer olarak sınıflandırılmıştır. Her ikisi de

kimyasal yapı olarak benzerdir ancak hammadde olarak farklı alüminosilikat öncüleri kullanılır. Geopolimerlerde genellikle MK, kalsine kil veya F tipi uçucu kül (UK) gibi düşük Ca içerikli öncüler [10–13], aktivatör olarak sodyum veya potasyum hidroksit (NaOH veya KOH), sodyum karbonat (Na_2CO_3), sodyum silikat (Na_2SiO_3), sodyum sülfat (Na_2SO_4) veya bu alkalilerin kombinasyonları kullanılıp [14] yüksek sıcaklıkta kürleme önerilir. AA'lar ise Şekil 1.2'de verildiği gibi geopolimerden farklı olarak yüksek Ca içerikli öncülerin kullanıldığı ve ortam sıcaklığında kürlemenin mümkün olduğu sistemlerdir [15–18]. Geopolimer ve AA'larda öncülerin mineralojik yapısı ve aktivatör tipine bağlı olarak ortak ana hidratasyon ürünü kalsiyum-aluminat-silikat-hidrat (C-(A)-S-H) iken, geopolimerde ek olarak sodyum-aluminat-silikat-hidrat (N-A-S-H) da oluşur [14].



Şekil 1.1 Malzemelerin Al ve Ca miktarlarına göre sınıflandırılması [14]



Şekil 1.2 AA bileşenleri [19]

Çevre dostu AA üretiminde kullanılan hammadde ve aktivatörlere karar verme aşaması da önemli bir adımdır. AA üretimi için kullanılan öncü malzemelerin bir kısmı, PÇ ile ikame edilen karışımlarda da kullanıldığı için hammadde rekabeti de yaşanmaktadır [19]. Bu nedenle yerel olarak temin edilebilecek hammaddelerin araştırılması ve geliştirilmesi gerekmektedir. Son yıllarda atık minimizasyonu, madencilik, taş ocağı, sanayi ve inşaat faaliyetleri için amaç haline gelmiştir [20]. Agrega yıkama agregası çamuru (AYÇ), kum ve çakıl agregalarının sınıflandırılması sırasında oluşan katı atık malzemelerden biridir [21]. Kırma kumun imalatında, betonun işlenebilirlik, mukavemet ve dayanıklılık özelliklerini olumsuz yönde etkileyen önemli oranda ince malzeme ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, kırma kumun kalitesini iyileştirmek için bu çok ince malzemelerin

ayrıştırılmasında bir agrega yıkama sistemine gereksinim duyulmaktadır. Türkiye'de bulunan Cendere ocağı, 1 milyon tonun üzerinde kırma kumun yıkama sistemine girdiğini ve yılda yaklaşık 100.000 ton AYÇ üretilip bunun ya bertaraf edildiğini ya da düzenli depolama alanlarına taşındığını bildirmiştir [22]. Ek olarak, Kłosek-Wawrzyn ve Bugaj [23] çalışmalarında, Polonya'da bulunan bir agrega ocağında yılda yaklaşık 600.000 ton AYÇ üretildiğine dair bilgi vermiştir.

Literatürde, AYÇ'nin kullanımına ilişkin çalışmalar sınırlı olup yapay hafif agrega [20–22,24] üretiminde ve seramik ve tuğla üretiminde hammadde olarak [23,25,26] kullanıldığı gözlenmiştir. Gonzalez-Corrochano ve arkadaşları [21], AYÇ kullanarak dört farklı seride hafif agrega üretimi yapmışlardır: AYÇ'nin ilavesiz olması durumu (Gra.To.3), AYÇ'nin %25 ve %50 oranında uçucu kül (UK) ile ikame durumu (sırasıyla 3.F(3) ve 3.F(2)), AYÇ'nin %2,5 oranında kullanılmış motor yağı ile ikame durumu (3.Ac). Çalışma kapsamında agregaların dört farklı sıcaklıkta (1150 ^{o}C, 1175 ^{o}C, 1200 ^{o}C ve 1225 ^{o}C) kızdırma kaybı, gevşek yığın yoğunluğu, kuru agrega yoğunluğu, özgül dayanım (dayanım/kuru agrega yoğunluğu) ve boşluk oranı tayinleri yapılmıştır. Tüm seriler için gevşek yığın yoğunluk değeri 1,2 g/cm^{3}'ten, kuru agrega yoğunluk değeri ise 2 g/cm^{3}'ten küçük olup, bu değerler UNE-EN-13055-1 standardına göre hafif agrega tanımına uygundur. En yüksek özgül dayanım değerini veren 1150 ^{o}C'de 15 dakika ısıl işleme maruz kalan 3.F(3) ve 1200 ^{o}C'de 10 dakika ısıl işleme maruz kalan 3.F(2) seriler olup değerleri sırasıyla 5,64 ve 5,39'dur. Ayrıca en düşük gevşek yığın yoğunluğu ve kuru agrega yoğunluğuna sahip olan serilerle en yüksek özgül dayanım gösteren seriler arasında ilişki bulunmuştur.

Özkan ve Kabay çalışmalarında [22], sinterlenmiş agrega üretimi için yerel bir agrega ocağından AYÇ atığı temin edip, GYFC ile ikame ederek üretilen agregaların betonda kullanımını araştırmışlardır. Deney sonuçları, sinterlenmiş agreganın betona dahil edilmesi ile betonun yoğunluğunu azalttığını, su emmesi ve geçirgenliğini ise önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. Artan sinterlenmiş agrega oranı ile betonun basınç dayanımı ve elastisite modülü sırasıyla %16 ve %15'e kadar azalmıştır. Ancak optimum ikame oranı olarak adlandırdıkları %30 AYÇ kullanılarak üretilen sinterlenmiş agregaların beton üretiminde kullanılması ile 28 günlük basınç dayanımı 50 MPa'dan

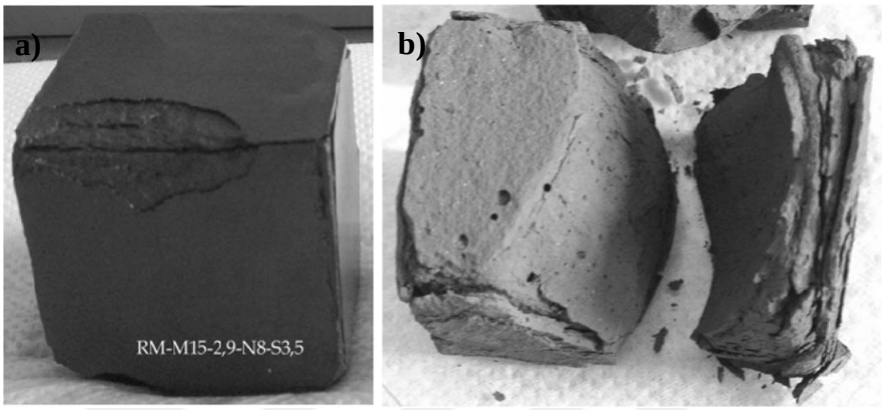
fazla elde edilip dayanıklılık özellikleri ise referans beton ile karşılaştırılabilir değerlerde bulunmuştur.

Literatüre bakıldığında AYÇ harici diğer maden atıklarının geopolimer ve AA'larda bağlayıcı malzeme olarak kullanıldığı görülmektedir. Xiaolong ve diğerlerinin [27] araştırma sonuçlarına göre bağlayıcı olarak sadece maden atığı kullanılması durumunda düşük basınç dayanımı ve dayanıklılık gözlenmiş, bu olumsuzlukları gidermek amacı ile maden atıkları mekanik aktivasyon ve kalsinasyon gibi ön işlemlere tabi tutularak reaktivitesi arttırılmış, ayrıca ilave mineral katkı malzemeleri kullanılarak dayanım ve dayanıklılık özellikleri iyileştirilmiştir. Araştırmalar sonucunda, geopolimerin mekanik ve dayanıklılık özelliklerine etki eden en önemli parametrelerden birinin Si/Al oranı olduğu ve maden atıklarının kalsiyum içeren malzemeler ile ikame edildiğinde reaksiyon ürünlerinde artış gözlendiğinden daha hızlı priz aldığı ve yüksek dayanım gösterdiği bulunmuştur [28].

Singh ve Singh [29] demir üretiminden elde edilen katı atıkların geopolimerizasyon tekniği ile bağlayıcı malzeme, harç, tuğla, kaldırım taşı ve beton olarak değerlendiren çalışmaları incelemişlerdir. Kırmızı çamur (KÇ) bazlı geopolimer bağlayıcının mekanik aktivasyon ile tane boyutunun küçültülüp yüzey alanını arttırılarak alüminosilikatların alkali ortamda daha iyi çözünmesinin sağlandığı bir çalışmada [30] 7 günlük basınç dayanım değeri 38 MPa bulunmuştur. Parke taşı üretiminde KÇ'nin ikame oranı etkisinin araştırıldığı bir çalışmada [31] ise %0-40 oranlarında KÇ'ye UK ikamesi yapılıp, alkali aktivatör olarak NaOH kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre priz süresi ve basınç dayanımında iyileşme sadece %5-20 KÇ içeren numunelerde gözlenmiştir. KÇ bazlı tuğlaların 7 günlük dayanımın 34 MPa olarak elde edildiği başka bir çalışmada [32], kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) ve Na_2CO_3 ilavesinin mekanik performansı iyileştirdiği görülmektedir.

Dimas ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada [33], KÇ atık malzemesi %85, MK ise %15 oranında kullanılmış, 8 M NaOH ile 3,5 M çözünür SiO_2 ile 60 ^oC'de 72 saatlik ısı küründe en iyi dayanım değeri 20,5 MPa, en düşük su emme değeri %1,28, su geçirimsizliği 0 cm^3/cm^2.gün ve en yüksek yoğunluk değeri ise 2,18 g/cm^3 olarak elde edilmiştir. Az çözünür bir malzeme olan KÇ'nin, alkali ortamda yüksek çözünürlüğe

sahip alüminosilikat bir malzeme olan MK ile ikame edilmesi, silikon ve alüminyum içeriğinin artmasına neden olarak, polikondenzasyon işlemini daha verimli ve üretilen malzemeleri daha dayanımlı hale getirmiştir ve bu durum XRD analizi ile de desteklenmektedir. Ancak, numunelerin donma-çözülme döngülerindeki direnci belirlenirken Şekil 1.3'te görüldüğü gibi ilk döngüde numune tek parça halinde iken ikinci döngüde direnç gösteremeyip parçalanmıştır. Numunelerin su geçirimsizliğinin aksine, donma-çözülme direncinin düşük olduğu belirtilmiştir.



Şekil 1.3 Malzemenin donma-çözülme deneyi: a) birinci döngü, b) ikinci döngü

Diğer bir çalışmada KÇ malzemesine cüruf katılarak reaktivitesinin iyileştiği, priz süresinin ve kuruma büzülmesinin ise azaldığı raporlanmıştır [34]. %50 ikameli cüruf kullanımında ise dayanım değeri 50 MPa değerine çıkmış, 60 ^{o}C'de 90 gün ısı kürü ile dayanım iyileştirmiştir [35]. İncelenen farklı bir çalışmada bakır madeni atığının yüksek SiO_2'ye sahip olduğu için geopolimerizasyon için uygun bir malzeme olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada aktivatör tipinin etkileri (NaOH, Na_2SiO_3, toz sodyum alüminat gibi), NaOH konsantrasyonu, silikat modülü (Si_2O/Na_2O) ve kür sıcaklığı (60, 75, 90, 120 ^{o}C) etkileri araştırılmıştır. Yüksek molariteye sahip NaOH (15M) için optimum kür sıcaklığı 90 ^{o}C, düşük molariteye sahip NaOH için ise optimum kür sıcaklığının 75 ^{o}C olduğu ifade edilmiştir. Silikat modülünün ise 1,00-1,26 arasında en yüksek dayanımları verdiği raporlanmıştır [36]. Nikel cürufunun araştırıldığı farklı bir çalışmada ise uçucu kül ile ikame edildiğinde N-(M)-A-S olarak adlandırılan sodyum magnezyum aluminasilika jeli oluştuğu belirlenmiştir. Deneylerde nikel cürufunun miktarı arttıkça

makro boşlukların azaldığı tespit edilmiş ve sebep olarak geopolimerde mikro agrega görevi gördüğü raporlanmıştır [37]. Nikel cürufunun konu edildiği diğer bir çalışmada ise geopolimerde %40 nikel cürufu ile %60 UK kullanılma durumunda %100 UK kullanımına göre daha iyi mekanik özellikler verdiği belirlenmiştir. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisine (FT-IR) göre nikel cürufu kullanılma durumunda camsı faz oluştuğundan mekanik özelliklerde iyileşme görülmüştür [38].

Capasso ve arkadaşları [39] maden atıklarının ve su rezervuarlarındaki tortuların geopolimer üretiminde hammadde olarak kullanımı üzerine yapılan çalışmaları derlemiştir. İncelenen çalışmaların birinde zemin atığı olarak kaolin çamuru seçilmiş ve farklı alkaliler ile farklı molariteler denenerek çalışmalar yapılmıştır. NaOH çözeltisine Na_2SiO_3 katılması durumunda daha yoğun geopolimerik matris elde edilmiş ve mekanik özellikler iyileşmiştir. Ayrıca geopolimerde SiO_2/Al_2O_3 oranı 3,5-4,0 arasında tutulduğunda 28 günlük basınç dayanımları 71-72 MPa değerlerine ulaşmıştır ve bu değer çözelti olarak sadece NaOH kullanım durumundaki dayanım değerinin dört katıdır.

Kürklü ve Görhan [40] çalışmalarında atık malzeme olan taşocağı tozunu geopolimer harç yapımında bağlayıcı olarak kullanımı amaçlanmıştır. Numunelerde farklı oranlarda taşocağı tozuna (%100, %67) minör katkı maddesi olarak uçucu kül seçilmiş ve numuneler farklı molarite değerinde NaOH çözeltisi (3M, 6M, 12M) ve kür sıcaklığı 80 ^oC olmak üzere farklı kür sürelerine (1 sa, 3 sa, 5 sa) tabi tutularak geopolimer üretimi sağlanmıştır. Numunelerin birim hacim ağırlığı, görünür yoğunluk, su emme, görünür porozite, kılcal su emme, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, çekme- yapışma ve reoloji deneyleri yapılmıştır. Fiziksel, mekanik ve reolojik özelliklere bakıldığında optimum ve çevreci karışım parametreleri 6M NaOH çözeltisi ile hazırlanan %67 oranda taşocağı tozu kullanılan numunelerin 3 saat kürlenmesi olarak belirlenmiştir. Ancak şantiye koşullarında 3 saat boyunca 80 °C'de kürleme işleminin zorluğuna değinip uygulanabilirliği açısından sonraki çalışmalar için numuneleri ısı kürüne maruz bırakmadan üretim yapmalarını önermişlerdir.

Yukarıda özetlenen çalışmalara göre AYÇ'nin AA sistemlerde öncü malzeme olarak kullanımı henüz araştırılmamış olup alümina ve silika açısından zengin olan bu atık malzemenin alternatif bir hammadde olarak kullanılması için araştırılması gereklidir.

1.2 Tezin Amacı

Çalışma kapsamında endüstriyel bir atık olan AYÇ'nin bağlayıcı malzeme olarak değerlendirilmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla çalışmanın birinci aşamasında AYÇ, reaktivitesinin arttırılması için farklı sıcaklıklarda ısıl işlemlere maruz bırakılacaktır. Bu işlemlerin ardından elde edilecek malzemenin puzolanik aktivite gelişimi çeşitli deneylerle araştırılacaktır.

Çalışmanın ikinci aşamasında AYÇ atığı farklı tip alkali çözeltilerle ve farklı oranlarda GYFC ile ikili kombine edilerek AA üretimi için bağlayıcı elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu malzeme ile öncelikle hamur fazında üretim yapılacak, daha sonra ince agrega ile birleştirilip harç numuneleri üretilecek ve harcın fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özellikleri araştırılacaktır.

1.3 Hipotez

AYÇ atığı kimyasal içeriği bakımından yoğun miktarda SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO içermektedir. Bu bileşenlerden SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 toplamı %70'in üzerinde olup bu nedenle puzolanik aktivite göstermesi mümkündür. Ayrıca bu malzemenin puzolanik aktivitesi bir takım ısıl işlemlerle de arttırılabilir. AYÇ atığı diğer endüstriyel atıklarla birlikte kullanılıp alkali aktivatörlerle birleştirildiğinde geopolimerizasyonda aktif rol oynayabilir ve bağlayıcı malzeme olarak AA'nın mekanik ve dayanıklılık özelliklerine katkıda bulunabilir. Ayrıca, bu çalışma ile endüstriyel bir atık olan AYÇ'nin hammadde olarak kullanılıp ürüne dönüştürülmesi, atık yönetimi ve sürdürülebilir malzeme kullanımı açısından önemli fayda sağlayacaktır.

2
ATIK MALZEMELER

Kentleşme ve sanayileşmenin artmasıyla birlikte betona olan talep gün geçtikçe artmaktadır. Bu nedenle, dünya çapında beton üretimi için büyük miktarlarda hammadde ve doğal kaynaklara ihtiyaç duyulmaktadır [41]. PÇ'nin üretimi, atmosfere büyük miktarlarda CO_2 gazı salınımı yapan, doğal kaynakları tüketen ve yoğun bir şekilde enerjinin harcandığı süreçtir. Bu nedenle, çimento tüketimini azaltıp karbon ayak izini sınırlamak çok önemlidir. 1 ton PÇ üretimi, yakıt ve diğer malzemeler dahil olmak üzere yaklaşık 2,8 ton hammadde gerektirir [42]. Diğer bir yandan, katı atık bertarafı da ciddi çevre sorunlarına sebep olmaktadır. Bu atıklar PÇ ile kısmen veya tamamen ikame edilerek depolama ve çevresel sorunların çözümü ve üretilecek yapı malzemelerinin maliyetinin düşürülmesi sağlanabilmektedir [41].

Son yıllarda, atık malzemeler kullanılarak hem PÇ'ye alternatif olacak hem de çevreyi koruyacak şekilde üretilen AA ve geopolimer hakkında da birçok çalışma yapılmaktadır [43]. Bu tür malzemelerin üretiminde genel olarak kullanılan ana hammaddeler kaolin killeri, MK, UK, GYFC, pirinç kabuğu külü (PK), vb.dir [44,45]. Ek olarak literatürde doğal mineraller, kil ve maden atıkları da AA ve geopolimer malzeme üretiminde kullanılmış olup bunların mineralojik bileşimlerinin malzemelerin özellikleri üzerindeki etkisi araştırma konusu olmuştur [46–49].

2.1 Atık Malzemelerin Çimento Esaslı Kompozitlerde Kullanımı

Son yıllarda katı atıkların bertaraf edilmesi, nüfus ve sanayileşme arttıkça ekolojik ve ekonomik sorun haline gelmektedir [50,51]. Açığa çıkan bu atıklar, depolama masraflarının yanı sıra, potansiyel olarak bir ekolojik tehlikeyi de ortaya çıkartmaktadır. Avrupa Birliği üye ülkelerce 2050 hedefleri kapsamında, çimento endüstrisinden kaynaklanan enerji ve karbon içeren süreçlerin azaltılmasına yönelik 5C yaklaşımı Avrupa Çimento Birliği (CEMBUREAU) tarafından açıklanmıştır [52]. Klinker, çimento, beton, inşaat ve karbonatlaşma 5C yaklaşımının kategorileri olarak tanımlanmış,

her biri için farklı öneriler sunulmuştur. Bunlardan çimento bölümü, klinker kullanımını azaltmak ve karbon nötr elektrik ve ulaşımı sağlamak için bazı stratejiler içermektedir. Çimentonun dolgu veya puzolan olarak alternatif tamamlayıcı çimento esaslı malzemeler ile ikame edilmesi, klinker kullanımını azaltmanın en etkili yollarından biridir. En çok kullanılan ikame malzemelerinden bazıları, demir üretim sürecinin bir yan ürünü olan GYFC ve kömürle çalışan elektrik santrallerinden üretilen UK'dir [53–56]. Kalsine killer, doğal puzolanlar ve silis dumanı (SD) gibi malzemeler de PÇ üretimi esnasında genellikle klinkerle karıştırılarak veya betonda PÇ'nin bir kısmı yerine ikame edilerek kullanılmaktadır. Puzolanlar, silisli malzemeler içerir ve kalsiyum hidroksit ile birleştirildiğinde, puzolanın kimyasal bileşenlerine bağlı olarak çimento ile benzer özellikler gösterebilir [41].

Literatüre bakıldığında atık cam tozlarının ilave bağlayıcı olarak kullanılma durumu için mukavemet ve dayanıklılık özelliklerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada doğal puzolan, UK ve SD ile karşılaştırılma yapılmıştır. PÇ ve kireç ile ikame edilen atık camın mukavemeti, klorür iyonu geçirimliliğine ve sülfat saldırısına karşı direnci diğer numunelere göre daha fazla bulunmuştur. Yedi yıl suya batırılmış atık cam içeren harçlarda ise herhangi bir bozulma belirtisi görülmemiş ve dayanımının arttığı gözlenmiştir [57].

PK kullanılan bir çalışmada [41] ise, 90 güne kadar olan basınç dayanımları referans betonlar ile karşılaştırıldığında daha yüksek dayanım elde edilmiştir. PK'nin numunelerde yer alan büyük gözeneklerin sayısını azalttığı ve çimento hamurunun içyapısını daha homojen ve yoğun hale getirdiği gözlenmiştir. PK ile üretilen betonun suya ve klorür iyonu geçirimliliğine karşı direnci de yüksek bulunmuştur.

Yang ve ark. [58] 900 °C ila 1000 °C arasında değişen sıcaklıklarda pişmiş tuğlalar hazırlamak için uçucu kül ilavesiyle düşük silis içerikli demir cevheri (DC) kullanımına ilişkin bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Fiziksel ve mekanik deney sonuçlarına göre, pişmiş tuğla yapımında kullanılan geleneksel kil ve şist yerine DC ile üretim yapılabileceği belirlenmiştir. Ancak karışıma eklenen uçucu kül miktarının artması ile tuğlalarda porozite artarken basınç dayanımı düştüğü için kontrollü ikame yapılması önerilmiştir. Weishi ve ark. [59], çalışmalarında ince taneli düşük silikon içerikli DC ve

belirli miktarda stearik asit emülsiyonu (su geçirimsizlik maddesi) ve trietanolamin (priz hızlandırıcı) kullanarak çevre dostu tuğla üretimini araştırmışlardır. Edindikleri sonuçlara göre üretim için optimum koşullar, priz hızlandırıcı ve su geçirimsizlik maddesinin ağırlıkça % 0,3 ve başlangıç kürleme sıcaklığının 60 °C olma durumudur. Bu şartlarda üretilen tuğlaların 28 günlük basınç dayanımı 31,8 MPa olup 15 donma-çözülme döngüsünden sonra dayanım değeri 30,6 MPa olarak bulunmuştur. Üretilen numunelerin fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin atıklardan üretilen tuğlalar için uyulması gereken Çin standardına (JC/T422-2007) uygun olduğu belirtilmiştir.

Katı atık malzemelerin harç veya betona eklenmesinin etkisi ise birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Godoy ve arkadaşları [60], 600 °C'de termal olarak aktifleştirilen su arıtma çamurunun puzolanik özellik gösterdiğini ve bu malzemenin %14 ve %35 çimento ikameli olarak kullanıldığı numunelerin basınç dayanımının sırasıyla 25 MPa ve 35 MPa bulunduğunu belirtmişlerdir. Ryu ve vd. [61], çimentonun geri dönüştürülmüş asetik asit ve modifiye edilmiş kireçtaşı çamuru ile ikamesini araştırmış, çimentonun %5 oranında kireçtaşı çamuru ile ikamesinin harç numunelerin 28 günlük basınç dayanımını arttırdığını belirlemişlerdir. Ayrıca, Halliday ve arkadaşları [62], harçta ikame malzemesi olarak puzolanik aktivite gösteren arıtma çamuru külünün basınç dayanımını azalttığını ifade etmelerine rağmen, başka bir çalışmada [63] %10'a kadar basınç dayanımını arttırdığı bulunmuştur.

Alüminosilikat bileşenleri içeren katı atık malzemelerin herhangi bir aktivasyon işlemi yapılmadan çimentoda ikame malzemesi olarak kullanılması, düşük reaktivite ve yüksek su emme nedeniyle numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Potansiyel bir çimento ikame malzemesinin reaktivitesini arttırmak için mekanik, kimyasal, termal ve mekanokimyasal olmak üzere çeşitli yöntemler bulunmaktadır [64,65]. Termal aktivasyon, alüminosilikat esaslı malzemenin puzolanik aktivitesini arttırmak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [66–70]. Uygun bir sıcaklıkta termal aktivasyon, kristal fazların amorf fazlara dönüşmesine neden olmakta ve böylece reaktiviteyi arttırmaktadır [65]. Yanguatin ve arkadaşları [70], ısıl işlemin atık killerin puzolanik aktivitesi üzerine etkisini araştırmışlardır. 650 °C'de termal olarak aktive edilen killerin puzolanik aktivite gösterdiğini ve 7 günlük kür süresinde yüksek basınç dayanımı verdiğini belirtmişlerdir. Termal aktivasyonda uygulanan sıcaklığın çok

yüksek olması malzemenin davranışını olumsuz etkileyebilmektedir. Örneğin, Tantawy ve arkadaşları [71] yaptıkları çalışmada, arıtma çamurunun 800 °C'den yüksek sıcaklıklardaki kalsinasyonunun amorf silikanın kristalleşmesini arttırdığını ve malzemenin puzolanik özelliğini olumsuz etkilediğini raporlamışlardır.

Du Toit ve ark. [72] çalışmalarında, çimentoyu %70 oranda kimyasal ve mekanik aktivasyona maruz kalan kömür bazlı UK ile ikame etmişlerdir. Deney sonuçlarına göre UK'ye uygulanan mekanik aktivasyon kadar Na_2SO_4 ilavesi ile gerçekleştirilen kimyasal aktivasyon da portlanditin tüketilme oranını arttırıp puzolanik aktivitesini olumlu etkilemiştir. Aktivasyon tekniklerinin kombinasyonu etrenjit oluşumunda artışa yol açmamıştır. İkameli olarak üretilen numunelerin XRD analizinde ise C-S-H tipi jeller tespit edilmiştir. PÇ'ye benzer özelliklere sahip kompozit çimento üretimi ile, CO_2 emisyonlarında %70 azalma sağlamanın mümkün olacağı belirtilmiştir.

2.2 Atık Malzemelerin Alkali ile Aktifleştirilmiş Malzeme ve Geopolimer Üretiminde Kullanımı

Son zamanlarda doğal kaynakların tükenmesi ve küresel ısınma sorunları inşaat sektöründe daha ekonomik ve sürdürülebilir yapı malzemeleri kullanma bilincini artırmıştır [73]. CO_2 emisyonunu azaltma arayışı ile ilk kez Davidovits'in [74] ortaya attığı geopolimer olarak adlandırılan çevre dostu bağlayıcılar, mühendislik uygulamalarında araştırmacılar tarafından ilgi görmeye başlamıştır [19,75–79]. Geopolimerler, zeolitler ile benzer bir polimerik Si-Al-Si zincirinden oluşur. Ancak farklı olarak oda veya düşük sıcaklıklarda kristal yerine amorf bir yapıya sahiptirler [80].

Geopolimerizasyon sürecindeki kimyasal reaksiyonlar genellikle aşağıdaki üç adımı içerir [81]:

- Hidroksit iyonlarının etkisiyle hammaddeden Si ve Al atomlarının çözünmesi,
- Öncü iyonların monomerlere dönüşmesi,
- Monomerlerin polimerleşmesi.

Davidovits'e [82,83] göre, geopolimerizasyon mekanizması 2.1, 2.2, 2.3 ve 2.4 denklemlerinde belirtildiği gibi, polimerik Si-O-Al bağları oluşturan alkali

polisilikatlarla, alümino-silikat oksitlerden oluşan geopolimerik öncü malzemelerin polikondenzasyon reaksiyonunu içerir.

$$(Si_2O_5, Al_2O_2)_n + 3nH_2O \rightarrow n(OH)_3 - Si - O - Al^- - (OH)_3 \quad (2.1)$$

$$n(OH)_3 - Si - O - Al^- - (OH)_3 \rightarrow (Na, K) - (-\underset{|}{\overset{|}{Si}} - O - \underset{|}{\overset{|}{Al^-}} - O -)_n + 3nH_2O$$

$$(Na, K)poly(sialate) \quad (2.2)$$

$$(Si_2O_5, Al_2O_2)_n + n2SiO_2 + 4nH_2O \rightarrow n(OH)_3 - Si - O - \underset{|}{Al^-} - O - Si - (OH)_3$$

$$(OH)_2$$

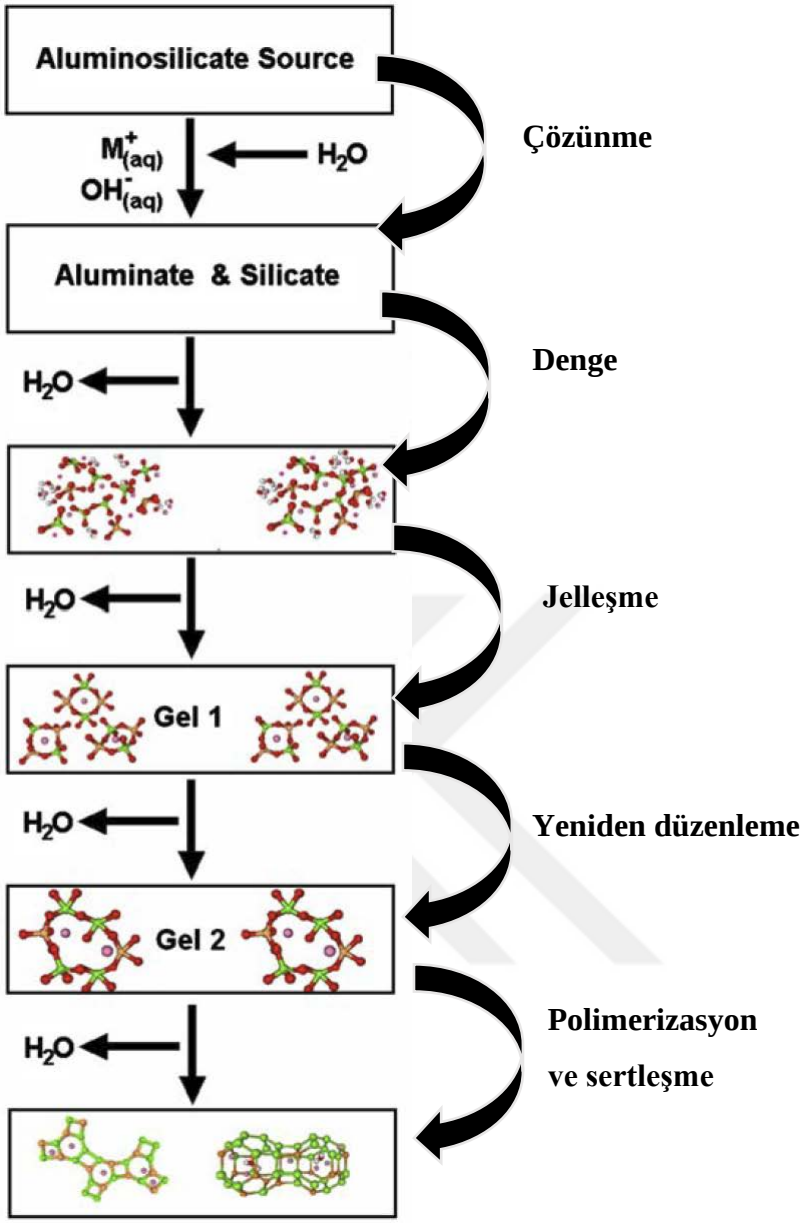
$$\big(Ortho(sialate - siloxo)\big) \quad (2.3)$$

$$n(OH)_3 - Si - O - Al^- - O - Si - (OH)_3 \rightarrow (Na, K) - (-Si - O - \underset{|}{Al^-} - O - \underset{|}{Si} -$$

$$O)_n + 4nH_2O \qquad\qquad |$$

$$(Na, K) - poly(sialate - siloxo) \quad (2.4)$$

Şekil 2.1'de geopolimerizasyon için basitleştirilmiş bir reaksiyon mekanizması verilmiştir. Alüminosilikat malzemenin puzolanik aktivitesini arttırmak için öğütme ve ısıl işlemlere şekilde yer verilmemiştir. Bu süreçler sıralı verilmesine rağmen geopolimerizasyondaki adımların eş zamanlı gerçekleştiği önceki çalışmalarda belirlenmiştir [84]. Amorf alüminosilikatların su ile çözünmesi ile aşırı doymuş bir alüminosilikat çözeltisi oluşur. Monomerik formdaki alüminat ve silikatların çözelti içinde serbest kalması geopolimerizasyon sırasındaki önemli bir adımdır ve daha sonra aşırı doymuş çözeltide yoğunlaşma yoluyla büyük ağlar oluşarak jel formu oluşur. Bu olay sonucu önceki adımda tüketilen suyun bir kısmı serbest bırakılır. Jel oluşma süresi hammaddeye, çözeltiye ve sentez koşullarına göre değişmektedir [85]. Jelleşmeden sonra, mekanizma yeniden düzenlenmeye devam edip geopolimerdeki üç boyutlu alüminosilikat ağları oluşur. Ayrıca yeniden düzenleme süreçleri, birçok fiziksel özelliğin belirlenmesinde etkin rol oynayan malzemenin içyapısını ve gözenek dağılımını da belirler [86].



Şekil 2.1 Geopolimerizasyon mekanizması [84]

PÇ ile karşılaştırıldığında geopolimer malzemeler, yüksek erken mukavemet, donma-çözülme döngülerine ve yüksek sıcaklığa karşı yüksek dayanıklılık gibi bazı özellikleri açısından avantajlı durumdadır [87–91]. Bu malzemeler, alüminosilikat minerallerin ve/veya endüstriyel atıkların alkali aktivasyonu ile üretilir. Hammadde olarak UK [92], MK [93], GYFC [94,95], SD [96], cam tozu [93], KÇ [97] ve kağıt çamuru [98] gibi

malzemeler hammaddelere örnek olarak verilebilir. Aktivatör olarak alkali bileşikler kullanıldığında, öncü malzemeler ile PÇ'nin hidratasyon ürünüyle (C–S–H jeli) aynı veya benzer kimyasal bileşimi oluşturması amaçlanmaktadır [99]. En yaygın kullanılan alkali aktivatörler, NaOH, KOH ve Na_2SiO_3 ve potasyum silikatın kombinasyonlarıdır. Birçok çalışmaya göre alkali aktivatör olarak yalnızca alkali hidroksitlerin kullanımına kıyasla sodyum veya potasyum silikat gibi çözünür silikat içerdiğinde reaksiyonların daha yüksek oranda gerçekleştiği belirlenmiştir [100].

Yüksek silika ve alümina içeriği nedeniyle geopolimer beton için öncü malzeme olarak kullanılan KÇ, yılda 117 milyon tondan fazla üretilen alümina üretiminin bir yan ürünüdür ve yüksek alkali içermesinden dolayı bertaraf edilmesi gerekmektedir [101]. Sadece KÇ kullanarak üç boyutlu bir Si-O-Al bağı oluşturmak zor olduğundan kullanımı halinde düşük basınç dayanımı ve eğilme mukavemet elde edilmektedir [102,103]. Bu nedenle, geopolimerizasyon derecesini artırmak için genellikle GYFC eklenir [104] ve matris sisteminde silikon, alüminyum ve kalsiyumun çökelmesi önlenir [105]. Reaksiyon sırasında düşük bağ enerjisi sebebiyle Ca-O bağı önce kırılır ve Ca^{2+} serbest bırakıldığında $[SiO_4]^{4-}$ ve $[AlO_4]^{5-}$ ile (C-A-S-H) jel yapısı oluşur [101,106]. Ancak GYFC içeriğinin artması yüksek Ca^{2+} içeriğinden dolayı suda çözünebilen portlandit ($Ca(OH)_2$) üretimine yol açacağından geopolimerin alkaliliğini de azaltma riski olduğu da söylenmektedir [107].

MK, belirli koşullar altında kalsine edilmiş bir tür rafine kaolin kilidir. MK bazlı geopolimer beton, PÇ ile üretilen betona kıyasla yüksek mukavemete ve dayanıklılığa sahiptir [108]. MK'nin kimyasal bileşenleri, geopolimer betonun mekanik özelliklerini, kullanılacak olan alkali solüsyonun konsantrasyonunu ve kürleme koşulunun sıcaklığını da doğrudan etkilemektedir [109]. Na_2SiO_3 ve NaOH çözeltilerinin ikili kombinasyonunun, MK'yi daha fazla aktive edebildiği de önceki çalışmalarda mevcuttur [110].

UK, termik santrallerden elde edilen bir yan üründür ve iki sınıfa ayrılır: C sınıfı UK (yüksek kalsiyum oranına sahip) kalsiyum alümina silikat cam, serbest kireç, kalsiyum sülfat gibi bileşenler içerirken, F sınıfı UK (düşük kalsiyum oranına sahip) büyük oranda silika içerikli silikat cam, manyetit, kuvars ve mullit kristal fazlarını içerir [111]. Meesala

vd. [111] çalışmalarında F sınıfı UK kullanılarak yapılan geopolimer betonun yüksek mukavemetin yanı sıra yüksek dayanıklılığa da sahip olduğundan bahsetmiştir. Sofi vd. [112], oda koşullarında 47,0 MPa ila 56,5 MPa basınç dayanımına sahip UK bazlı geopolimer beton elde ederken, Görhan ve Kürklü [113] ise çalışmalarında C tipi UK bazlı 75 MPa basınç dayanımına sahip geopolimer beton üretmişlerdir.

Paul'un yaptığı bir çalışmada ise [114] GYFC ilavesi ile, UK içeren geopolimer betonun ısı kürü olmadan ortam koşullarında dayanım kazanması sağlanmıştır. Ancak karışımda GYFC'nin artışı ile küresel olmayan partiküller de arttığından işlenebilirlik azalmaktadır. BC ilavesi süperakışkanlaştırıcı gereksinimini ortadan kaldırılmış ve karışımın işlenebilirliğini arttırmıştır. Ayrıca, GYFC ilave edilen numunelerde geopolimerizasyon reaksiyonundaki çözünen silikatlarda artış sağlandığından, daha fazla hidratasyon ürünü ortaya çıkmış ve dayanım artışı diğer numunelere göre daha fazla elde edilmiştir.

UK ve PK kullanılarak yüksek mukavemetli geopolimer harç üretilen bir çalışmada [115], PK'nin yanma sıcaklığı, inceliği ve UK'ye ikame oranı incelenip PK/UK kütle oranları 0/100, 20/80, 40/60 ve 60/40 olan geopolimer harçların yoğunluk ve dayanım testleri yapılmıştır. Aktivatör olarak, NaOH ve Na_2SiO_3 kullanılıp ısı kürüne maruz bırakılmışlardır. PK'nin optimum yanma sıcaklığı ön deneylerle 690 ^oC olarak belirlenmiş, çalışmaların sonucuna göre en yüksek mukavemetli geopolimer harçlar, Na_2SiO_3/ NaOH oranı 3,0 ve 48 saat 60 ^oC'de ısı kürü kullanılarak elde edilmiştir.

Farklı oranlarda alüminyum ve demir cürufları ile yapılan geopolimer hamur ve beton numunelerin basınç dayanımı ve işlenebilirliğinin incelendiği bir çalışmada [116] numunelerin SiO_2/Al_2O_3 oranları sırasıyla 4,7, 3,0, 2,1 ve 1,6 ve NaOH konsantrasyonları ise 8, 12 ve 16 M'dir. SiO_2/Al_2O_3 oranı 2,1 ve 4,7 olan numunelerin basınç dayanımları birbirine yakın çıkmasına rağmen bu oran 3,0 olduğunda en yüksek değer elde edilmiştir. 16 M NaOH konsantrasyonuna sahip olan numunelerin 28 günlük basınç dayanımları diğer konsantrasyon değerlerine göre daha yüksek çıkmıştır. Deney sonuçlarına göre cüruf bazlı geopolimerlerin oda sıcaklığında uygun bir şekilde sentezlenebileceği çıkarımı yapılmıştır.

Endüstriyel bir katı atık olan yüksek magnezyumlu nikel cürufu (NC), Yang ve arkadaşları [117] tarafından geopolimerizasyon tekniği ile uçucu kül bazlı geopolimer

üretiminde kullanılmıştır. Geopolimerizasyon sonucu oluşan ana ürün, sodyum magnezyum alüminat silikat (N–M–A–S) jelidir. NC ikamesi, uçucu kül bazlı geopolimer için silikat kaynağıdır ve NC ikamesi arttıkça Si/Al oranı da artmaktadır. Ayrıca NC eklendiğinde toplam gözenek hacmi de azaldığından, mikro agrega olarak çalıştığı söylenebilir. Yüksek basınç dayanımı ve düşük kuruma rötresi silika modülünün 1,2–2,0 aralığında, NC'nin ise %20 ikame oranında kullanılma durumunda elde edilmiştir.

Ouffa vd.'nin yaptıkları bir çalışmada [118], geopolimer hamur dolgusu üretmek için Al/Si bakımından zengin maden atıklarında meydana gelebilecek geopolimerizasyon süreçleri araştırılmıştır. Çalışma sonucuna göre maden atıklarındaki minerallerin alkali çözünme derecesinin kristalizasyon koşulları ve kimyasal bileşime bağlı olduğu belirtilmiş, geopolimer hamur dolguların uzun vadede düşük alkalinitede ([NaOH] <1 mol / L) yüksek basınç dayanımlarına ulaştığı tespit edilmiştir. Ayrıca, erken yaş basınç dayanımı hedefi için ise UK ve GYFC gibi mineral katkı maddeleri kullanılarak maden atıklarının zenginleştirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

AA ve geopolimer malzeme üretiminde kullanılacak olan bağlayıcıların kabul edilebilir ve endüstriyel ölçekli uygulamalarda benimsenmesi için, malzemelerin sürdürülebilir özelliklere sahip olması gerekir. Örneğin, Yang ve diğerleri [119] çalışmalarında AA ve PÇ'li köpük betonu karşılaştırıldığında, AA üretiminde bağlayıcı ve alkali aktivatör kaynaklı %85-93 oranında daha düşük CO_2 emisyonu elde edilirken aynı zamanda daha düşük maliyete sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca AA'ların aşırı sıcaklıklarda daha kararlı olduğu ve deniz suyu gibi agresif ortamlarda kullanılabilecek potansiyel malzeme olduğu söylenmiştir. Ek olarak, bazı AA'ların ortam koşullarında kürlenebilme özelliği de prekast gibi uygulamalar için kullanım kolaylığı sağlayabilir.

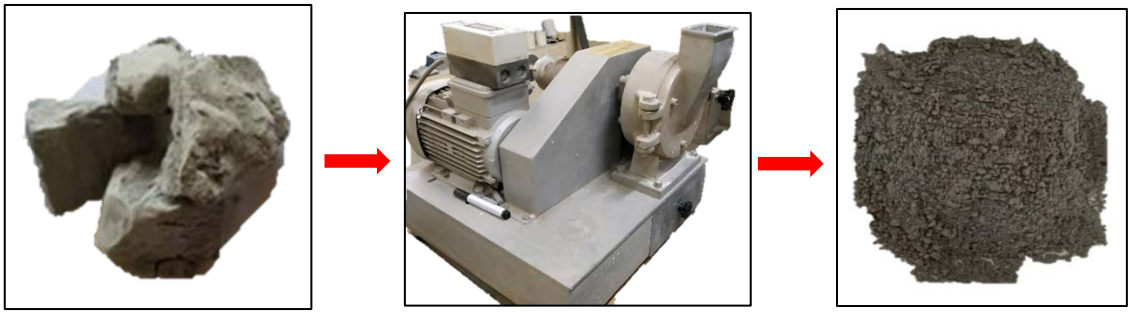
3
MATERYAL VE METOT

3.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

3.1.1 Bağlayıcılar

Çalışmada iki ayrı puzolanik aktivite deneyi için harç üretiminde bağlayıcı malzeme olarak AYÇ, CEM I 42,5 R tipi PÇ, GYFC, UK, MK ve yoğunluğu 2,2 g/cm^3 olan CL80-S sınıfına sahip hava kireci kullanılmıştır. Hamur fazda geopolimer üretimi için ise bağlayıcı malzeme olarak AYÇ ve GYFC kullanılmıştır. Bağlayıcı malzemelerin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

AYÇ, beton üretimi için kırma kum üreten OYAK Çimento, Beton ve Kağıt Şirketi'nin İstanbul, Cendere'de bulunan kumtaşı agrega ocağından çamur halinde elde edilmiştir. Kırma kum üretiminde, işlenebilirlik, mukavemet ve dayanıklılık gibi beton özelliklerini bozabilecek, dane boyutu 63 µm'den küçük olan çok ince malzemelerin uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu nedenle, bir agrega yıkama sistemine ihtiyaç vardır. Özkan ve Kabay'ın çalışmalarında [120] belirttikleri verilere göre Cendere ocağının üç yıllık üretim verileri, yaklaşık 1 milyon ton kırma kumun yıkama sistemine iletildiğini ve bunun sonucunda yaklaşık 100.000 ton AYÇ üretildiğini göstermektedir. Çalışmada kullanılan AYÇ, ilk olarak etüvde 100 ^{o}C'de 24 saat süresince kurutulmuş, daha sonra laboratuvar tipi bir öğütücü kullanılarak Şekil 3.1'deki gibi toz haline getirilmiştir.



Şekil 3.1 AYÇ'nin katı ve öğütülmüş halde görünümü

Tablo 3.1 Bağlayıcı malzemelerin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri

Bileşen (%)	AYÇ	PÇ	GYFC	MK
SiO_2	54,78	19,89	40,60	56,10
Al_2O_3	14,97	4,74	12,60	40,23
Fe_2O_3	8,02	3,98	1,20	0,85
CaO	5,95	62,22	35,10	0,19
MgO	3,49	1,23	5,80	0,16
SO_3	0,35	3,74	0,10	-
K_2O	1,78	0,26	0,70	0,51
Na_2O	2,48	0,83	0,80	0,24
CI	0,01	0,03	-	-
Kızdırma kaybı	6,54	2,12	-	1,10
Yoğunluk, g/cm^3	2,85	3,10	2,91	2,52

3.1.2 Agrega

Harç numune üretiminde ince agrega olarak en büyük tane çapı 2 mm olan, silis esaslı standart CEN kumu kullanılmıştır.

3.1.3 Alkali Aktivatörler

Geopolimer hamur üretiminde alkali aktivatör olarak molekül kütlesi 40,0 g/mol olan sodyum hidroksit (NaOH), 56,1 g/mol olan potasyum hidroksit (KOH) ve cam suyu olarak da bilinen sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Na_2SiO_3 çözeltisinde %8,4 oranda Na_2O, %27,8 oranda SiO_2 ve %63,8 oranda H_2O bulunmaktadır.

3.2 Deney Yöntemleri

3.2.1 Puzolanik Aktivite Deneyleri

3.2.1.1 Dayanım Aktivite İndeksinin Belirlenmesi

Dayanım Aktivite İndeksi (DAİ), ASTM C311 standardına uygun olarak referans ve katkılı çimento içeren harç numunelerde yapılan basınç deneyi ile belirlenmiştir [121]. Bu amaçla, Tablo 3.2'de verilen malzeme miktarları kullanılarak referans harç üretimi yapılmıştır. Termal aktivasyonun AYÇ'nin puzolanik aktivitesine etkisini belirlemek amacı ile toz hale getirilen AYÇ 2,5 ^{o}C/dk sıcaklık artış hızı ile 700 ^{o}C'ye kadar ısıtılıp (Şekil 3.2), bu sıcaklıkta 2 saat bekletilip hızlıca soğutulmuş AYÇ (AYÇ700), ayrıca herhangi bir ısıl işleme maruz bırakılmayan AYÇ (AYÇ20) hazırlanmıştır. DAİ değerlerinin karşılaştırılması amacı ile GYFC ve MK kullanılan harç seriler de üretilmiştir. Bu malzemeler başlangıç çimento ağırlığının %20'si oranında ikame edilerek bağlayıcı malzeme hazırlanmış, sabit su/bağlayıcı (s/b) oranını sağlayacak miktarda su ve hesaplanan miktarda kum ilave edilerek hazırlanan tüm numuneler 50 mm^3'lük küp kalıplara yerleştirilmiştir. 24 saat sonra kalıptan çıkartılan numuneler ilgili deney gününe kadar 23±2 ^{o}C'lik sıcaklıktaki kirece doygun suda bekletilmiştir. Basınç deneyi ASTM C109 [122]'a uygun olarak 7, 28 ve 90. günlerde üç adet numunede yapılmıştır. Çalışmada kullanılan her bir bağlayıcı malzemenin ilgili deney günündeki DAİ değeri ASTM C311 standardında verilen (3.1) denklemi ile hesaplanmıştır.

$$DA\dot{I}_{7,28,90\%} = \frac{A}{B}x100 \tag{3.1}$$

Denkleme göre;

A: Üç test numunesi için ortalama basınç dayanımı değerini (MPa)

B: Üç referans numunesi için ortalama basınç dayanımı değerini (MPa) ifade etmektedir.

ASTM C618 standardına göre test edilen malzemenin DAİ değeri deneyi yapılan ilgili günlerde %75 ve üzerinde ise malzeme puzolan olarak kabul edilmektedir [123]. Deney sonuçları değerlendirilerek bağlayıcı olarak kullanılan malzemelerin puzolanik aktivite gösterip göstermediği belirlenmiş, sonuçlar karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

Tablo 3.2 ASTM C311'e göre malzeme miktarları

Numune Adı	S/B	Çimento (g)	AYÇ(g)	MK (g)	GYFC(g)	Su (g)	Standart Kum(g)
Ref		500	-	-	-		
AYÇ20		400	100	-	-		
AYÇ700	0,484	400	100	-	-	242	1375
GYFC		400	-	-	100		
MK		400	-	100	-		



Şekil 3.2 1200 ^{o}C kapasiteli seramik fırını

3.2.1.2 Kireç Harcı Basınç Dayanımı Deneyi

TS 25 standardına göre sönmüş hava kireci (SK) ile AYÇ20 ve AYÇ700 içeren harçlar üretilerek deneysel işlemler yapılmıştır [124]. Tablo 3.3'te verilen malzeme miktarları kullanılarak üretilen harç numuneler 40x40x160 mm^3'lük prizmatik kalıplara yerleştirilip, üzerini kapatacak şekilde cam plaka yerleştirilerek 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir. Daha sonra, numuneler kalıptan çıkartılmadan 55±2 ^{o}C'lik etüvde 6 gün daha bekletilmiştir. Yedinci günün sonunda etüvden çıkarılan numunelerin basınç dayanımları belirlenerek TS 25 standardına göre 4,0 MPa ve üzerinde ise malzeme puzolan olarak kabul edilmiştir [124].

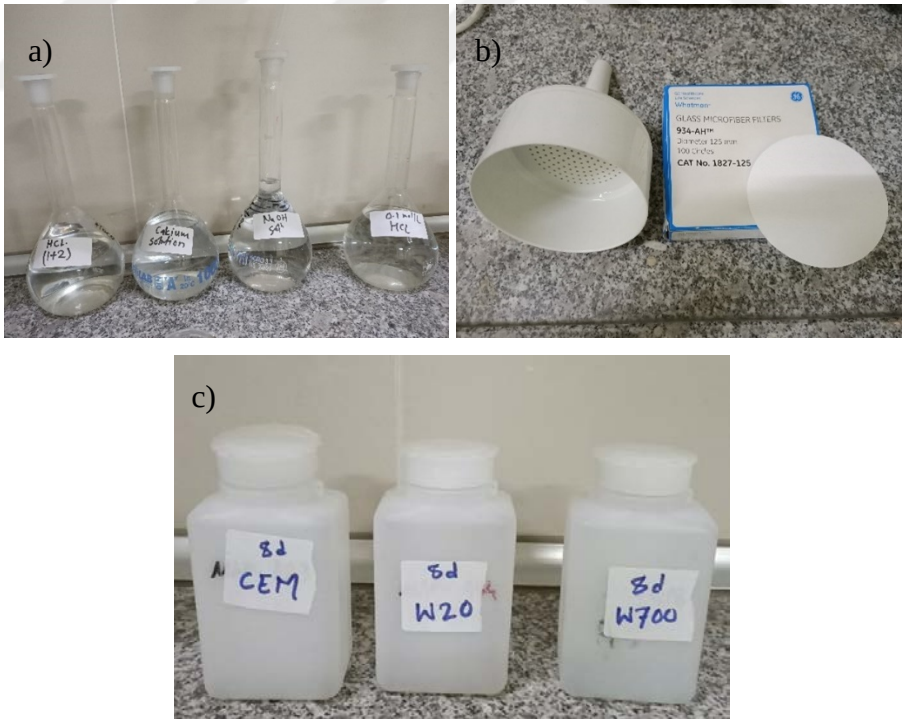
Tablo 3.3 TS 25'e göre malzeme miktarları

Malzeme	Miktar (g)
SK	150
AYÇ	300x($\gamma_{AYÇ}$ / γ_{SK})
Standart Kum	1350
Su	0,5x (150+AYÇ)

$\gamma_{AYÇ}$: AYÇ'nin yoğunluğu ; γ_{SK}: Sönmüş kirecin yoğunluğu

3.2.1.3 Frattini Deneyi

Klasik kimyasal titrasyona dayalı doğrudan bir yöntem olan Frattini deneyi BS EN 196-5 standardına [125] göre yapılmıştır. Deney için hazırlanan malzemeler Şekil 3.3'te verilmiştir. Çözeltilerdeki PÇ:AYÇ oranı 4:1 olup kullanılan bağlayıcı malzemelerin tane boyutu 125 μm'den küçüktür. Deneyde standart koşullarda muhafaza edilen çözeltilerin sekizinci günde hidroksil ($[OH]^-$) ve kalsiyum oksit ([CaO]) cinsinden derişimleri belirlenerek kontrol grafiğinde işaretlenip, bu nokta kalsiyumun doygunluk eğrisinin altında ise numunenin puzolanik aktivite gösterdiği kabul edilmiştir.



Şekil 3.3 Frattini deneyi için hazırlanan a) kimyasal çözeltiler, b) filtreler ve c) numuneler

3.2.2 Basınç Deneyi

AYÇ'nin çimento ile ikamesinin ve geopolimerde kullanım durumunun harç basınç dayanımına etkisini belirlemek amacı ile basınç deneyi (Şekil 3.4) 50 mm^3 boyutlu harç numunelerde belirlenen günlerde ASTM C109 standardına [122] göre yapılmış ve yükleme hızı 4 mm/dk seçilmiştir. Her bir seri için 3 numune kullanılmıştır. Basınç dayanımı (3.2) denklemine göre hesaplanmıştır.

$$f_m = \frac{P}{A} \tag{3.2}$$

Formüle göre;

f_m: Basınç dayanımını (MPa)

P: Kırılma yükünü (N)

A: Yükün uygulandığı yüzey alanını (mm^2) ifade eder.



Şekil 3.4 Küp numunelerde tek eksenli basınç deneyi

3.2.3 Priz Süresi Tayini Deneyi

AYÇ'nin çimento ile ikamesinin ve AA'da kullanım durumunun priz süresine etkisini belirlemek amacı ile priz süresi tayini ASTM C191'e göre yapılmıştır [126]. Priz başlangıç süresi aşağıdaki denklem (3.3) ile hesaplanmıştır.

$$\left(\frac{(H-E)}{(C-D)} \times (C-25)\right) + E \tag{3.3}$$

Denklemde;

E: Vicat iğnesinin 25 mm’den büyük son okuma yaptığı sürenin dakika cinsinden ifadesi,

H: Vicat iğnesinin 25 mm’den küçük ilk okuma yaptığı sürenin dakika cinsinden ifadesi,

C: E süresinde Vicat iğnesinin mm cinsinden batma miktarı,

D: H süresinde Vicat iğnesinin mm cinsinden batma miktarıdır.

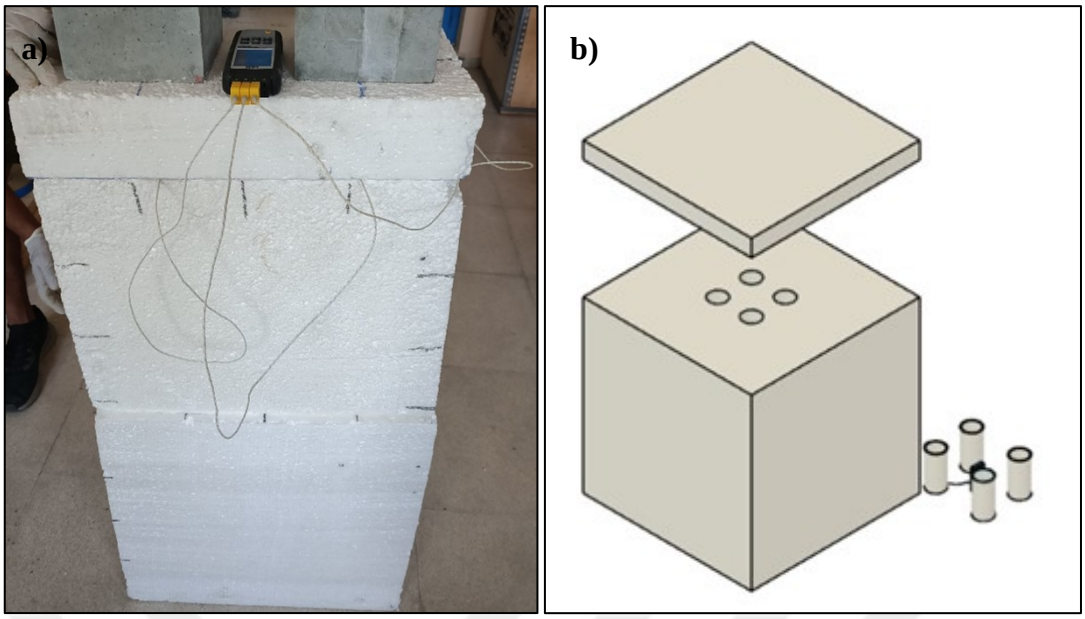
Priz bitiş süresi ise bağlayıcı ile suyun ilk karıştırılma süresi ile Vicat iğnesinin batmayıp sabit kaldığı süre arasında geçen zamandır. Priz süresi tayini deney düzeneği Şekil 3.5’te görülmektedir.



Şekil 3.5 Priz süresi tayini

3.2.4 Yarı Adyabatik Kalorimetri

Numunelerin hidratasyon özelliklerini karşılaştırmak ve sıcaklık gelişimlerini belirlemek için yarı adyabatik kalorimetri deneyleri yapılmıştır. Test düzeneğinin yarı adyabatik olarak kabul edilme sebebi iyi bir yalıtım sağlanmış olsa dahi ısı kaybı olduğu içindir. Şekil 3.6’da görüldüğü gibi 0,5°C hassasiyetle 22±2°C'ye ayarlanmış bir iklim odasında numuneler yalıtkan kaba yerleştirildikten sonra sıcaklık gelişimi T Tipi termokupl kullanılarak zamanın bir fonksiyonu olarak 24 saat boyunca ölçülmüştür.



Şekil 3.6 Yarı adyabatik kalorimetri a) deney düzeneği, b) şematik gösterimi

3.2.5 Su Emme Deneyi

Alkali ile aktivite edilmiş harç (AAH) numunelerin su emme ve boşluk içeriği, ASTM C642'ye göre 28. günde gerçekleştirilen deney ile hesaplanmıştır [127]. AAH numuneleri, bağlayıcı yapının aşırı kurumasını en aza indirmek için 110±°C yerine 60 °C'de sabit ağırlık elde edilene kadar kurutulup [128] desikatörde 25 °C'de soğumaya bırakılıp ağırlıkları (W_a) kaydedilmiştir. Daha sonra numuneler 22±2 °C sıcaklıkta 48 saat suya batırılıp doymuş yüzey kuru (DYK) ağırlıkları (W_b) tartılmıştır. Daha sonra numuneler yaklaşık 5 saat suda kaynatılarak en az 14 saat laboratuvar sıcaklığında suyun içerisinde soğumaya bırakılıp ağırlıkları (W_c) tartılmıştır. En son olarak suya batırılmış numunelerin görünen ağırlıkları (W_d) ölçülmüştür. Numunelerin su emme ve boşluk içeriği Denklem (3.4) ve (3.5) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Su emme (\%)} = \left(\frac{W_b - W_a}{W_a}\right) \times 100 \tag{3.4}$$

$$\text{Boşluk hacmi (\%)} = \left(\frac{W_c - W_a}{W_c - W_d}\right) \times 100 \tag{3.5}$$

3.2.6 Sorptivite

AAH numunelerinin sorptivitesi, ASTM C1585 standardına göre belirlenmiştir [129]. 28 günlük kürlemeden sonra, test numuneleri suya doygun hale gelene kadar suda bekletilmiştir. Sudan çıkartılıp 50±2 °C sabit sıcaklıkta ve % 80±3 bağıl nemde iklimlendirme kabinine yerleştirilip 3 gün bekletilmiştir. Daha sonra numuneler hava geçirmez kaplarda 23±2 °C'de 15 gün tutulup sorptivite deneyi için numunelerin taban hariç tüm yüzeyleri alüminyum bant ile kapatılmıştır. Daha sonra, numuneler tabandan 1 ila 3 mm arasında bir su seviyesine sahip olan kaba yerleştirilmiştir. Harç numunelerin birincil ve ikincil sorptivite katsayısını hesaplamak için numunelerin kütlesi 8. güne kadar standartta belirtilen aralıklarla kaydedilmiştir.

3.2.7 Kuruma Rötresi

Kuruma rötresi ve kütle kaybı değerleri, ASTM C596 standardına göre 25,4x25,4x285 mm^3 boyutlarında prizma numuneler kullanılarak belirlenmiştir [130]. AAH numuneleri, üretildikten 24 saat sonra kalıptan çıkarılıp ilk uzunluk okuması yapılmıştır. İlk uzunluk ölçümünün ardından numuneler, 22 ± 2 °C sıcaklığında ve %55 ± 2 bağıl nemde kalacak şekilde bir kabine yerleştirilmiştir. Sonraki ölçümler 1, 3 ve 7. günlerde ve haftalık olarak 150. güne kadar yapılmıştır. Her bir karışım için iki farklı numune üzerinde kuruma rötresi ve kütle kaybı ölçümleri alınıp bunların ortalama değerleri kaydedilmiştir.

3.2.8 Kılcal ve Jel Boşluklarının Tayini

Arşimet deneyi, Zhang vd. tarafından önerilen yönteme göre harç numunelerin kılcal ve jel boşluk hacimlerini hesaplamak için kullanılmıştır [131]. Deneyler, her karışım için 6 numune kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nihai rötre ölçümünden sonra numuneler, yaklaşık 10 mm^3 kübik parçalar halinde kesilip, hidratasyon reaksiyonlarını sonlandırmak için asetona daldırılmıştır. Numunelerin DYK ağırlığını belirlemek için yaklaşık 24 saat suda bekletilip, 48 saat boyunca da 40 °C etüvde kurutulmuştur. Numunelerin DYK ağırlıkları ile etüv kurusu ağırlıkları arasındaki fark kılcal boşluk hacmi olarak adlandırılmıştır. Daha sonra numuneler, fiziksel suyun da buharlaşması için 24 saat 105 °C etüvde bekletilmiştir. Jel ve ara katmandaki suyun toplamı, 40 °C ile 105 °C arasında belirlenen kütle kaybı kullanılarak hesaplanmıştır.

3.2.9 Islanma-Kuruma Çevrimi

AAH numunelerinin ıslanma-kuruma (I-K) etkisi altındaki davranışı, Djobo vd.'nin çalışmalarında önerdikleri prosedür izlenerek [132] numunelerin basınç dayanımı ve kütle değişiminin belirlenmesi ile ve görsel gözlemlere dayalı olarak değerlendirilmiştir. 28 günlük kürlemeden sonra, 50 mm^3 boyutundaki AAH numuneleri, 60 °C etüvde 24 saat kurutularak I-K çevrimi başlatılmıştır. AAH numunelerinin basınç dayanımını ve kütle değişimini belirlemek için toplam 40 I-K çevrimi gerçekleştirilmiştir. Her çevrim sırasında numuneler 24 saat 22±2 °C sıcaklıkta suda bekletilip, ardından 24 saat 60°C'de etüvde kurutulmuştur. Artık basınç dayanımı ve kütle değişimleri, Denklem (3.6) ve (3.7) kullanılarak her 10 döngünün sonunda hesaplanmıştır.

$$\text{Artık basınç dayanımı } (\%) = \left(\frac{fc_x}{fc_i}\right) \times 100 \tag{3.6}$$

$$\text{Kütle değişimi } (\%) = \left(\frac{M_x - M_i}{M_i}\right) \times 100 \tag{3.7}$$

Denklemlerdeki f_{cx} ve M_x, x. I-K çevriminde harç numunelerin sırasıyla basınç dayanımı ve kütle değerlerini temsil etmektedir. Benzer şekilde, f_{ci} ve M_i, I-K çevrimi başlamadan önceki harç numunelerin başlangıç basınç dayanımı ve kütle değerini ifade etmektedir.

3.2.10 İçyapı İncelemeleri

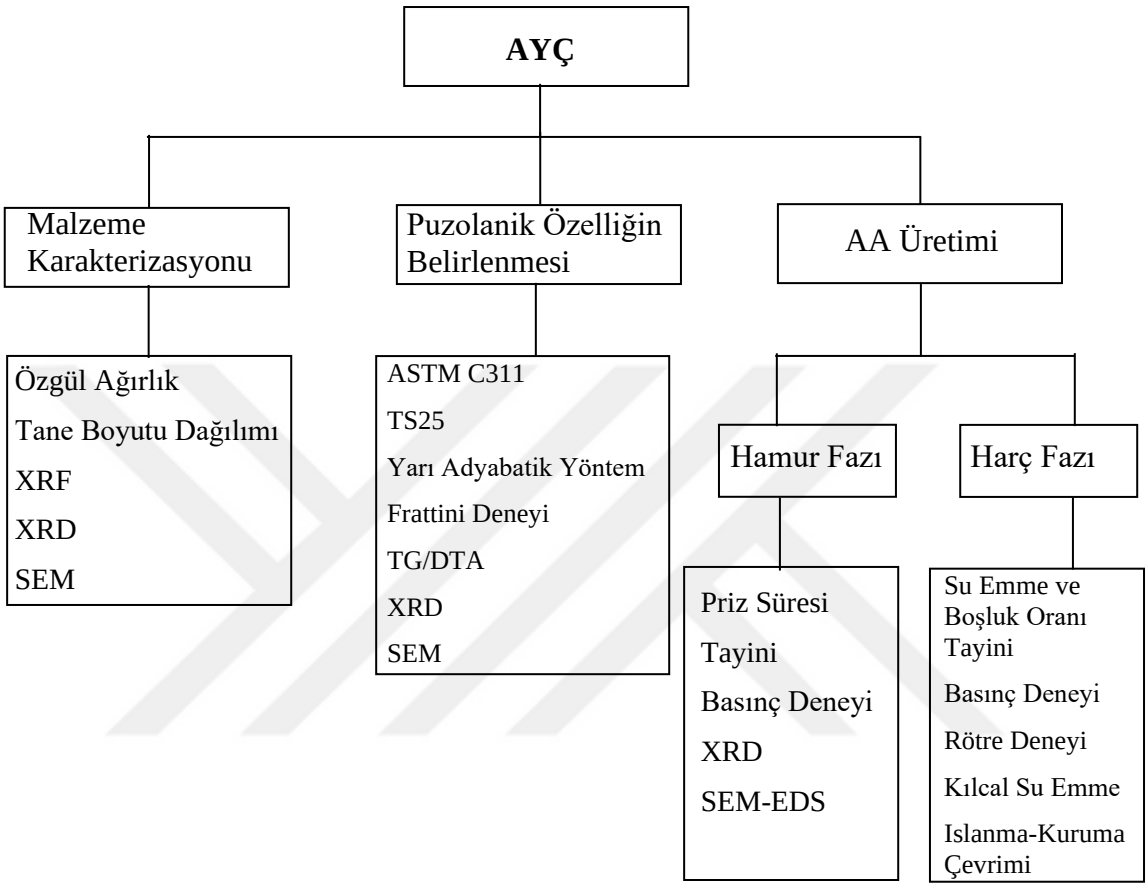
Numunelerin sıcaklığa bağlı olarak ağırlık kaybı ve ısı akışını belirlemek için Termogravimetri/Diferansiyel Termal Analiz (TG/DTA) yöntemi kullanılmıştır. Test numuneleri, inert bir nitrojen ortamında 1000 ^oC'ye kadar 10 ^oC/dk sabit bir hızda ısıtılmıştır. Sıcaklık aralıklarının sınırlarını belirlemek için her numunenin birinci türev eğrisi (DTG) elde edilmiştir. Analizi gerçekleştirmek için YTU Merkez Laboratuvarda bulunan Seiko Exstar TG/DTA 6300 cihazı kullanılmıştır.

XRD, kristalli ve ince taneli malzemeleri analiz etmek için kullanılan analitik bir yöntemdir. Numunelerde kristal faz oluşumu, 45 kV- 40 mA'da çalışan Cu tüp radyasyonu ile PANalytical X'Pert PRO kırınım ölçer kullanılarak belirlenmiş, XRD kırınım desenleri, 0,017^o dalga boyunda ve 5-90^o (2Θ) tarama aralığında tayin edilmiştir.

Numunelerin yüzey morfolojilerini incelemek için SEM, elementel kompozisyonunu belirlemek için ise Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) analizi yapılmıştır. Numuneler,

işlem öncesi altınla kaplanmış, analizler YTU Merkez Laboratuvarda bulunan Zeiss EVO® LS 10 SEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Deneylerin genel akış şeması Şekil 3.7'de verilmiş olup çalışmalar bu sıralama ile gerçekleşmiştir.

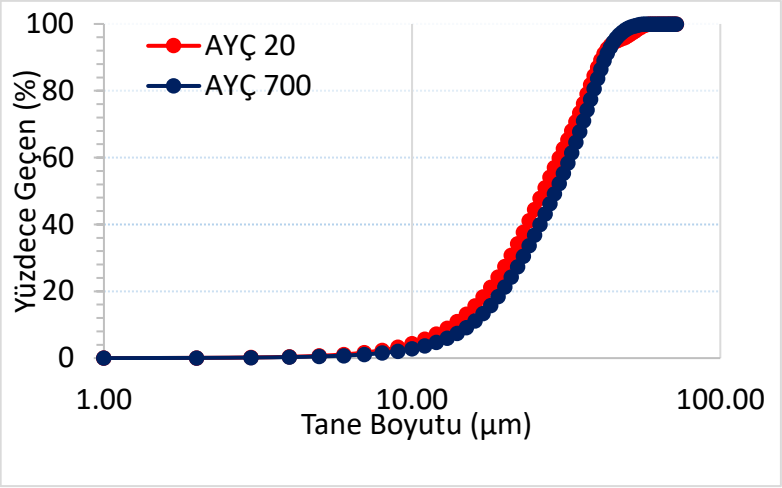


Şekil 3.7 Deney akış diyagramı

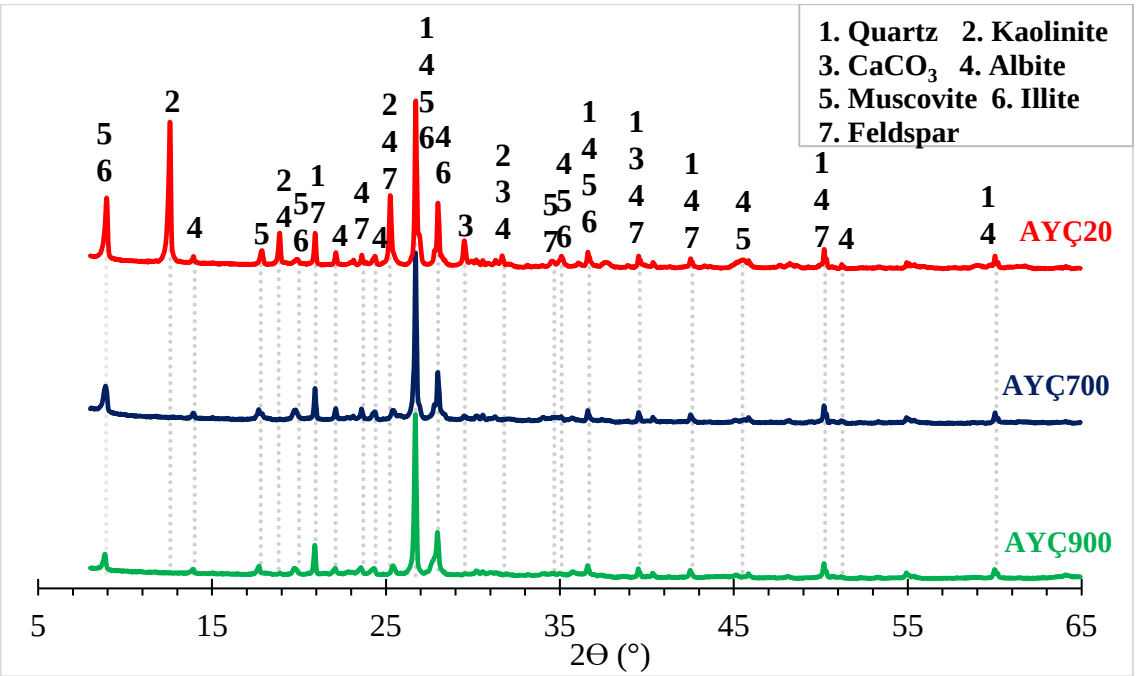
4
PUZOLANİK AKTİVİTE DENEYLERİ VE SONUÇLARIN İRDELENMESİ

4.1 Malzeme Karakterizasyonu

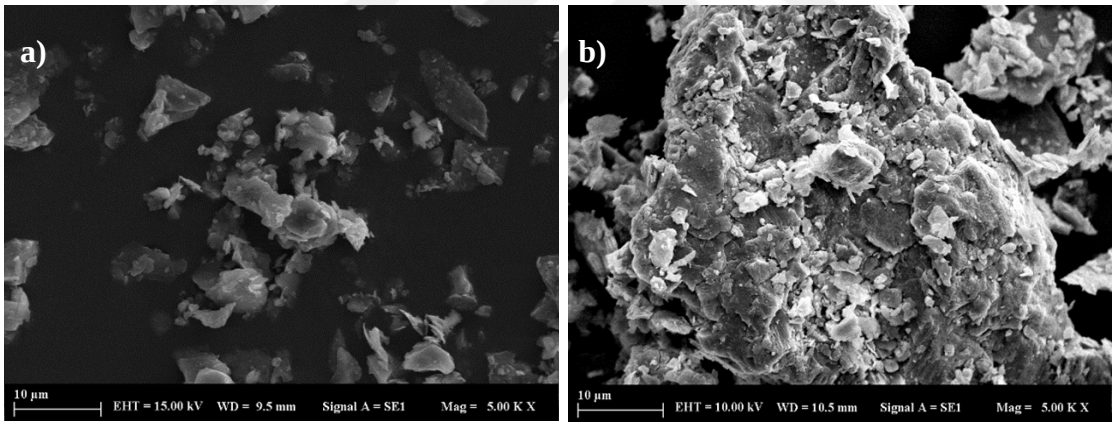
Isıl işleme maruz kalan/kalmayan AYÇ'lerin dane boyutu dağılımı lazer difraktometre analizi sonucuna göre karşılaştırmalı olarak Şekil 4.1'de verilmiştir. AYÇ20 tanelerinin %50'si 10,7 µm'dan, %90'ı ise 70,3 µm'dan küçük olmasına rağmen, AYÇ700'ün %50'si 14,9 µm'dan, %90'ı ise 80,4 µm'dan küçük olarak belirlenmiş, ısıl işlemin dane boyutunu az da olsa bir miktar arttırdığı tespit edilmiştir. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan AYÇ'nin XRD analizi sonuçları ise Şekil 4.2'de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, AYÇ20'nin ana kristal fazları kuvars (SiO_2, #PDF 01-086-1629), klorit ($(Mg,Al)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$, #PDF 00-052-1044), kalsit ($CaCO_3$, #PDF 01-085-1108), muskovit ($KAl_2(AlSi_3O_{10}(FOH)_2$, #PDF 00-007-0042) ve illit ($(KH_3O)Al_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$, #PDF 00-026-0911) olarak tespit edilmiştir. AYÇ 700 ^oC ve 900 ^oC'de kalsine edildiğinde klorit ve kalsit ile ilgili pikler ortadan kalkarken, kristal yapıyı gösteren piklerin azalması amorf yapıya doğru eğilimin arttığını göstermektedir [70]. Ayrıca muskovit, illit ve kaolinit içeren pikler kalsinasyon sonucu $2\theta^o$=9 ve 25,2'de azalmıştır. Şekil 4.3'te verilen SEM analizinde ise ısıl işlem görmüş/görmemiş AYÇ'lerin düzensiz bir şekle sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.1 AYÇ 20 ve AYÇ 700'ün dane boyutu dağılımı



Şekil 4.2 Farklı ısıl işleme maruz bırakılan AYÇ'lerin XRD desenleri

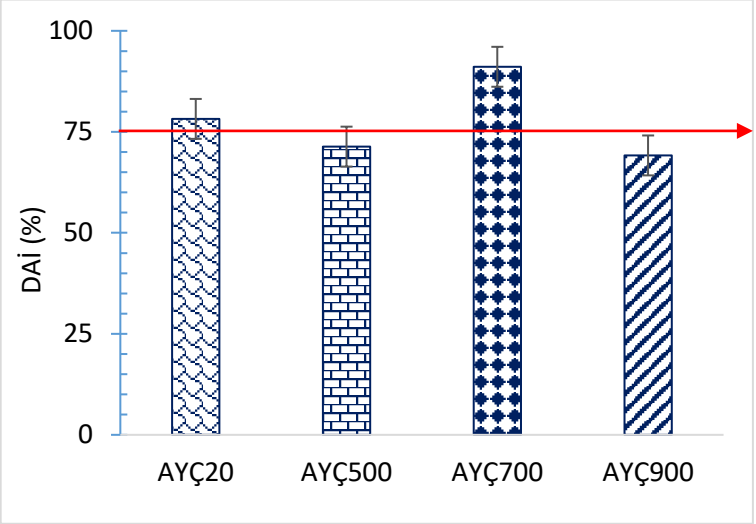


Şekil 4.3 a) AYÇ 20 ve b) AYÇ 700'ün SEM görüntüleri

4.2 Dayanım Aktivite İndeksi Değerlerinin Tayini

AYÇ'nin farklı ısıl işlemlere maruz bırakılarak (AYÇ20, AYÇ700 ve AYÇ900) elde edilen malzemeler ile üretilen numunelerin Dayanım Aktivite İndeksleri (DAİ) ilk aşamada 7. günde belirlenmiştir. Bu ön deney sonucu belirlenen ve Şekil 4.4'te gösterilen DAİ değerleri göz önüne alındığında en iyi sonucu AYÇ'nin 700 ^{o}C'de ısıl işleme maruz

kalması ile elde edildiğinden sonraki deneylerde AYÇ700'ün kullanılmasına karar verilmiştir.

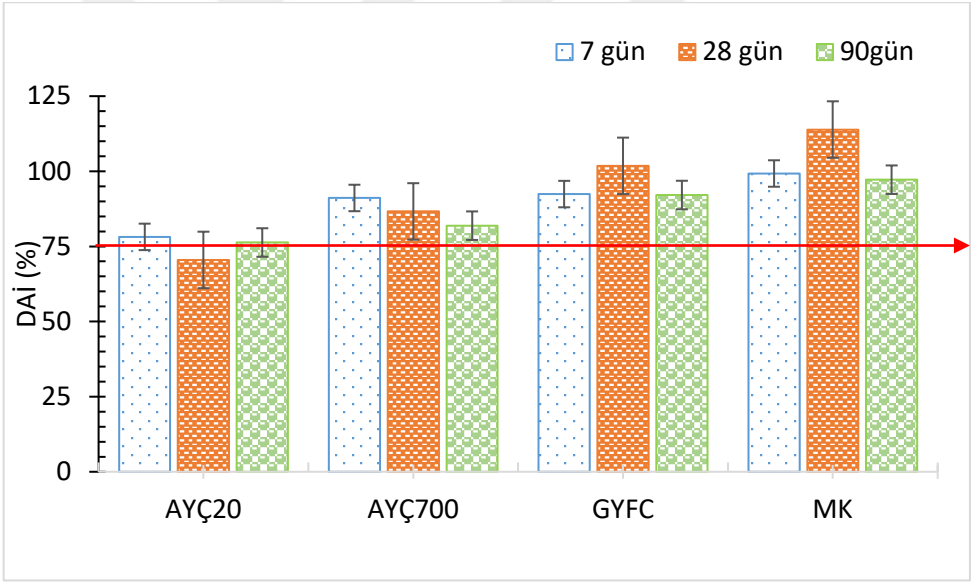


Şekil 4.4 Farklı ısıl işleme maruz kalan AYÇ'lerin DAİ değerleri

Ön deneylerden elde edilen sonuçlar ışığında üretilen numunelerin (Şekil 4.5) 7, 28 ve 90. gün DAİ değerleri Şekil 4.6'da verilmiştir. DAİ değerlerinden ısıl işleme maruz kalmayan AYÇ'nin (AYÇ20) 7 ve 90. gün değerleri %75'ten büyük çıkmış, 28. günde ise bu koşulu sağlamamıştır. 700 ^{o}C'ye kadar ısıtılan AYÇ (AYÇ700) kullanılarak üretilen numunelerin ise tüm deney günlerinde DAİ değeri sınır değerin üstündedir. Deney sonucuna göre atık malzeme sınıfında olan AYÇ'nin, sıcaklık etkisi ile puzolanik aktivitesinin arttığı belirlenmiştir. Şekil 4.6'da ayrıca GYFC ve MK ile üretilen numunelerin deney sonuçları karşılaştırma amaçlı gösterilmiş olup, AYÇ700'ün performansının GYFC'ye yakın ancak MK'den düşük olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.5 ASTM C618'e göre üretilen numuneler

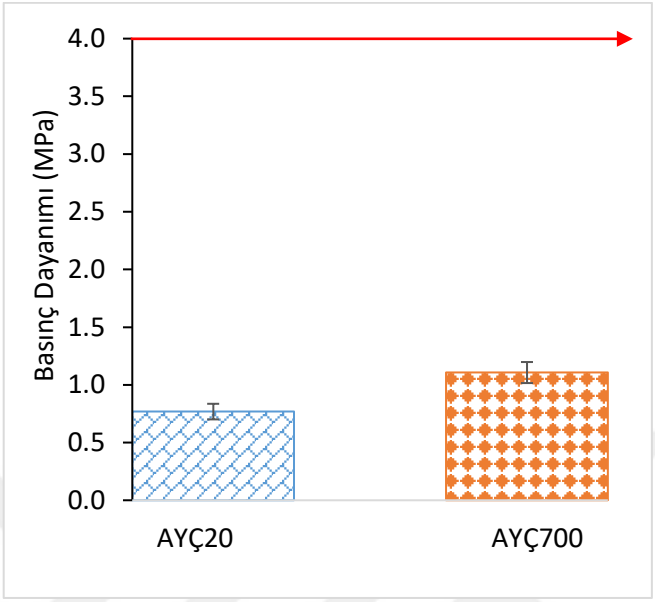


Şekil 4.6 Numunelerin 7, 28 ve 90. günlerdeki DAİ değerleri

4.3 Kireç Harcı Basınç Dayanımı Değerlerinin Tayini

TS 25'e göre üretilen kireç harçlarının basınç deneyi TS EN 196-1'e göre yapılmış, sonuçlar Şekil 4.7'de verilmiştir. Deney sonuçları değerlendirildiğinde sönmüş hava kireci ile belirli oranda ikame edilen AYÇ20 ve AYÇ700 numunelerinin bu standart

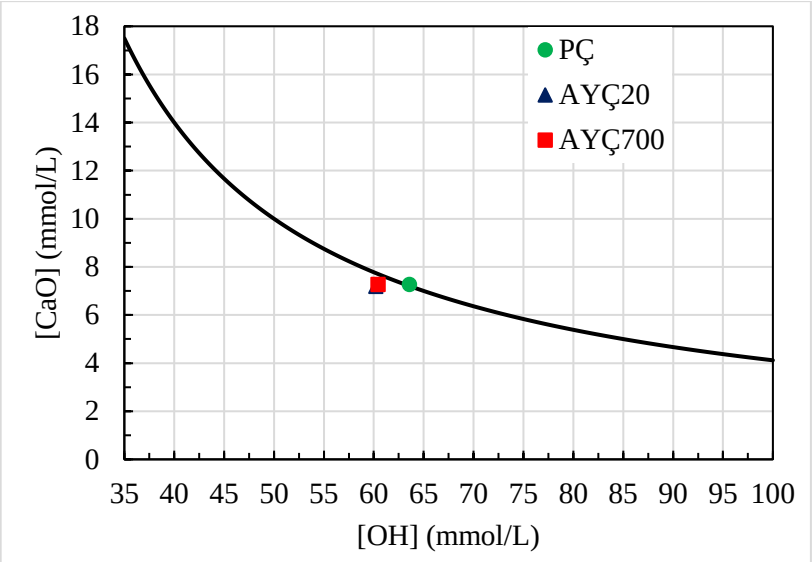
kapsamında önerilen basınç dayanımı sınır değeri olan 4,0 MPa'a ulaşamadığı görülmüş, bununla birlikte AYÇ700'ün puzolanik aktivitesinin ısıl işlemle birlikte AYÇ20'ye kıyasla yaklaşık %50 arttığı görülmüştür.



Şekil 4.7 TS25'e göre 7 günlük basınç dayanımı değerleri

4.4 Frattini Deney Sonuçları

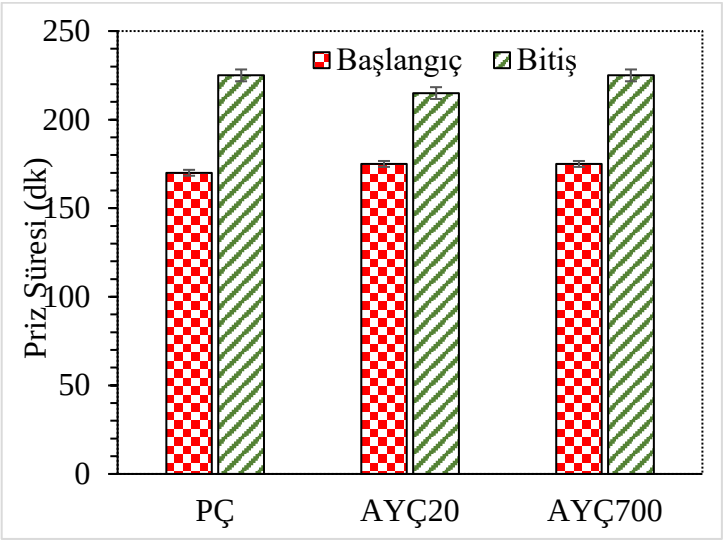
AYÇ karışımlarının puzolanik özelliğini değerlendirmek için Frattini testi yapılmıştır. PÇ'nin %20'si AYÇ20 ve AYÇ700 ile ikame edilerek hazırlanan örneklerin 8 günlük deney sonuçları incelendiğinde (Şekil 4.8), her iki karışımın [CaO] konsantrasyonunun eğrinin altında kaldığı gözlenmiş, bu durum kalsiyum hidroksitin AYÇ tarafından tüketilip puzolanik özellik gösterdiğini doğrulamıştır [133]. EN 196-5 standardındaki teorik [CaO] ile AYÇ20 ve AYÇ700'ün [CaO] içeriği karşılaştırıldığında, sırasıyla %6,6 ve %5,7 azalış görülmektedir. Grafikteki PÇ karışımının eğri üzerinde olması ise deneysel doğruluğu göstermektedir.



Şekil 4.8 PÇ, AYÇ20 ve AYÇ700'ün Frattini deneyi sonuçları

4.5 Priz Süresi Tayini

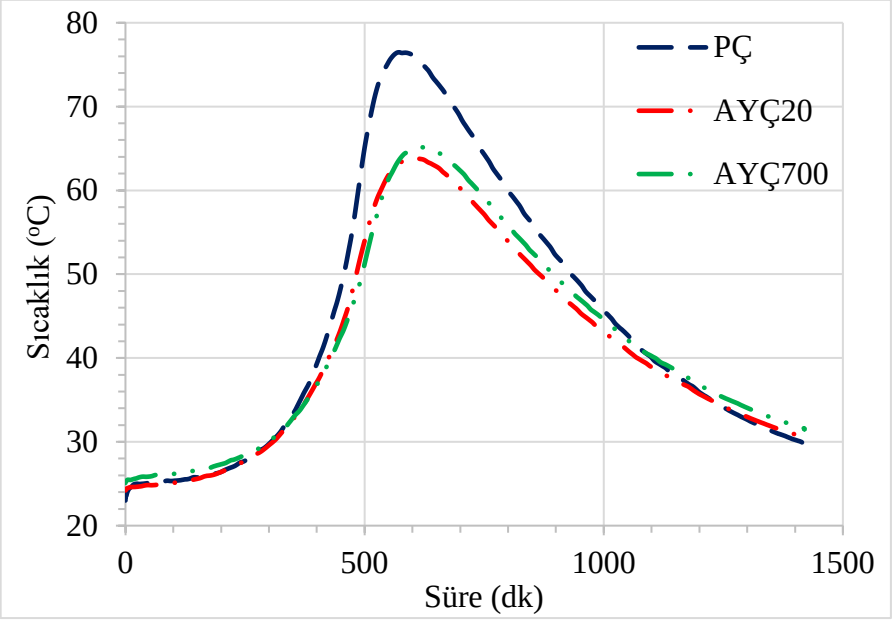
Şekil 4.9'da verilen grafiğe göre PÇ, PÇ ile %20 ikameli AYÇ20 ve AYÇ700 numunelerinin priz başlangıç süreleri 170 ila 175 dakika, bitiş süreleri ise 215 ila 225 dakika arasında değişmektedir. Deneydeki standart sapmalar da göz önüne alındığında AYÇ20 veya AYÇ700 ilavesinin çimento hamurunun priz süresini önemli ölçüde etkilemediği söylenebilir.



Şekil 4.9 PÇ, AYÇ20 ve AYÇ700'ün priz süreleri

4.6 Yarı Adyabatik Kalorimetri Deney Sonucu

Yarı adyabatik kalorimetri analizinde, PÇ'nin %20'si oranında ısıl işleme maruz kalmış/kalmamış AYÇ ilavesi ile hazırlanan hamur numunelerin hidratasyon kinetiğine etkisini ve sıcaklık gelişimini belirlemek amacı ile ilk 24 saat sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Şekil 4.10, ekzotermik reaksiyonlar nedeniyle iç sıcaklıktaki artışı ve ardından çevreye verilen ısı dolayısıyla yaklaşık 750. dakikada meydana gelen kademeli sıcaklık düşüşünü net bir şekilde göstermektedir. Tüm eğrilerin, partiküllerin çözünmesine ve hidratasyon reaksiyon ürünlerinin çökelmesine karşılık gelen yalnızca tek bir karakteristik tepe noktasına sahip olduğu gözlenmiştir [134,135]. AYÇ ilavesi, grafiğin maksimum sıcaklığa ulaşma süresini kayda değer bir şekilde etkilememiş, tüm karışımlarda bağlayıcı ile su ilavesinden yaklaşık 600 dakika sonra pik sıcaklık gözlenmiştir. Bu sonuç, başlangıç ve bitiş priz sürelerinin ısıl işleme maruz kalmış/kalmamış AYÇ ilave edilmesiyle önemli ölçüde değişmediğini ifade etmekte olup daha önce belirlenen priz süresi deney sonuçlarıyla da uyumludur. Literatürdeki diğer çalışmalarda da, karışımların yarı adyabatik kalorimetri analizinde en yüksek sıcaklığa ulaşma süresi ile priz süresi arasında bir ilişki olduğu belirtilmiştir [136–138].



Şekil 4.10 PÇ, AYÇ20 ve AYÇ700'ün yarı adyabatik kalorimetri sonuçları

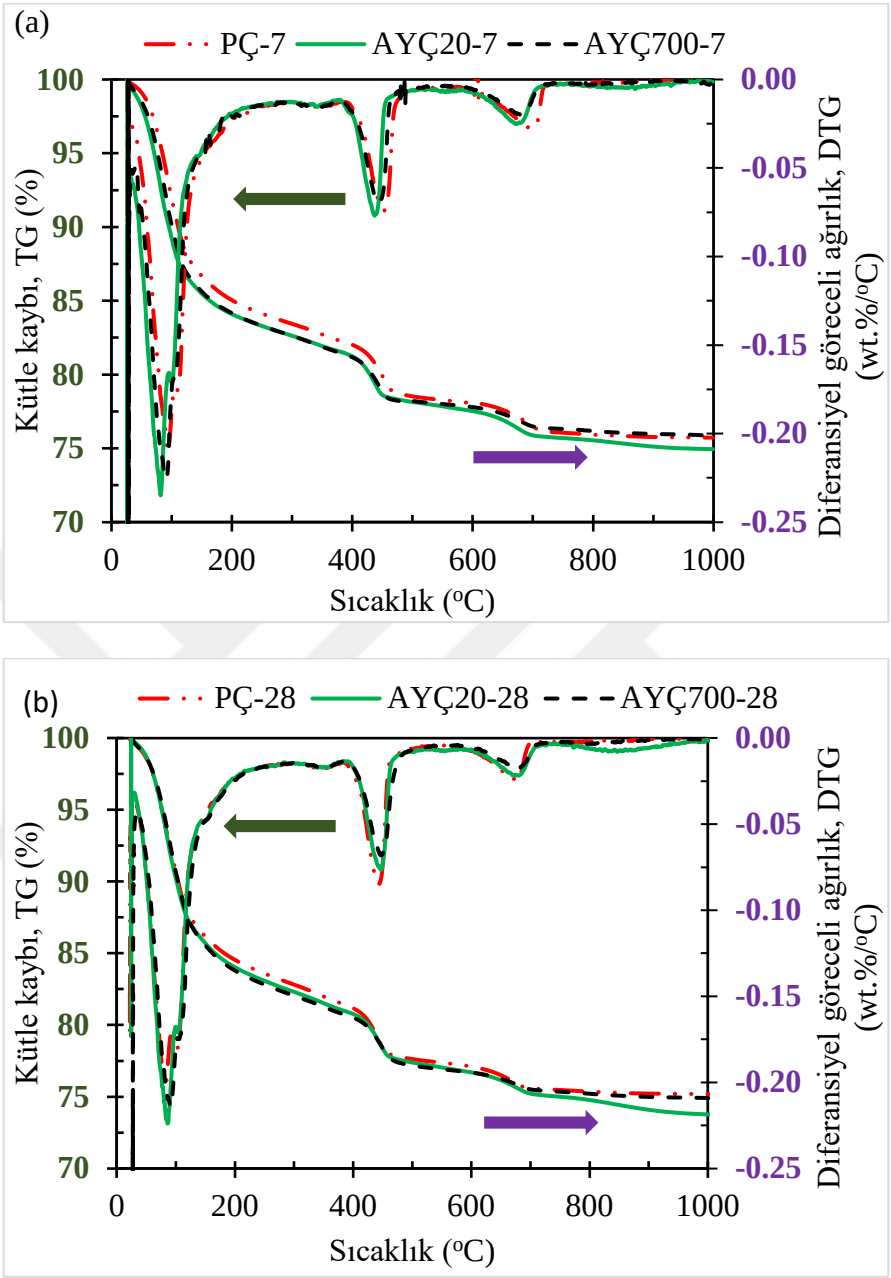
4.7 TG/DTA Analizi

Çalışmada PÇ referans olmak üzere, PÇ ile %20 oranda ikame AYÇ içeren hamur numunelerin puzolanik aktivitesi, 7, 28 ve 90. günlerde TG/DTA analizi kullanılarak ve zamana göre $Ca(OH)_2$ (CH) miktarındaki değişim izlenerek değerlendirilmiştir. TG grafiğinin birinci türevinden elde edilen diferansiyel termogravimetri (DTG) grafiği, sıcaklık ile göreceli ağırlık kaybı oranı arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir (Şekil 4.11). DTG eğrileri boyunca, belirgin kütle kaybı meydana gelen üç bölge olduğu gözlemlenmiştir. 80 ila 200 °C sıcaklık farkında gözlenen ağırlık kaybı, serbest su moleküllerinin buharlaşmasına ve C-S-H ve etrenjit ayrışmasına karşılık gelmektedir [139]. 400-500 °C sıcaklık aralığında görülen pik, CH'nin dehidroksilasyonunu, 600-800 °C sıcaklık aralığında belirlenen pik ise kalsiyum karbonatın dekarbonizasyonunu göstermektedir [140–142]. CH içeriği, her bir numune için ilgili grafik verileri kullanılarak aşağıda verilen Denklem 4.1 ile hesaplanmıştır [141,143].

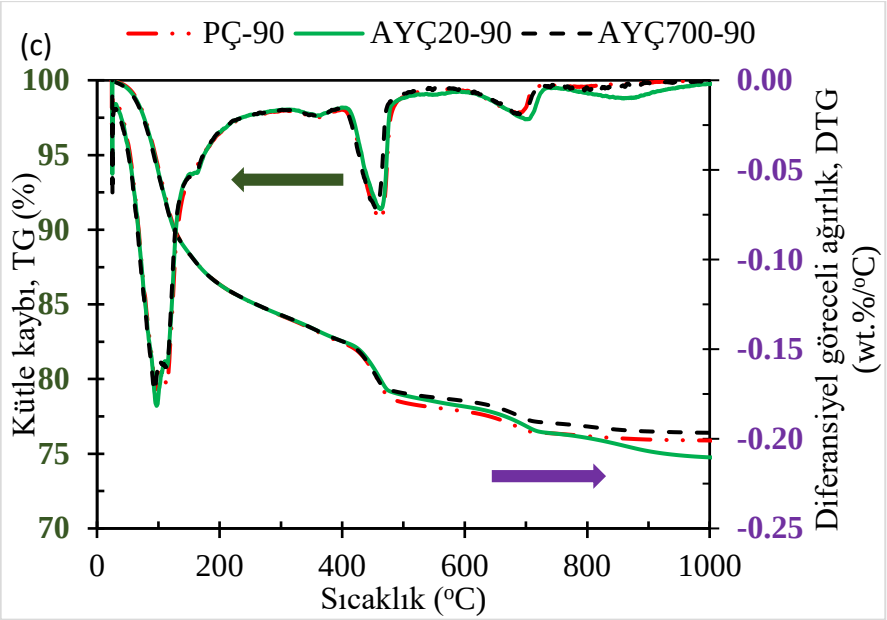
$$\%CH = (W_{CH}) \times \frac{M_{CH}}{M_{H_2O}} \tag{4.1}$$

Denklemdeki W_{CH} 400–500 °C'deki yüzdece kütle kaybını, M_{CH} CH'nin moleküler kütlesini (74 g/mol) ve M_{H2O} ise H_2O'nun moleküler kütlesini (18 g/mol) temsil etmektedir. CH'ın çimento esaslı malzemelerin hidratasyon derecesini gösterdiği yaygın olarak bilinmektedir. Benzer şekilde, zamana bağlı hidratasyon gelişimi ile azalan CH miktarı, çimento esaslı sistemlerde puzolanik aktiviteyi belirtir. TG/DTG eğrilerinden 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda hesaplanan CH miktarı, ilgili deney serileri için Tablo 4.1'de verilmiştir. AYÇ700 karışımında, hidratasyon yaşına bakılmaksızın en düşük CH yüzdesi tespit edilmiş, bu da bağıl olarak daha yüksek CH tüketimini ve puzolanik aktiviteye sahip olduğunu göstermektedir. 7, 28 ve 90 günlük AYÇ700'ün CH içeriği sırasıyla %12,3, %13,6 ve %14,0 olarak bulunurken, AYÇ20'nin CH miktarı %12,7 ile %14,8 arasında değişmektedir. AYÇ20'nin CH tüketiminin 7, 28 ve 90. günlerde PÇ'ye kıyasla sırasıyla %11, %6 ve %10 daha düşük olduğu bulunmuştur. AYÇ700 karışımı için bu değerler ilgili hidratasyon yaşlarında sırasıyla %14, %8 ve %15 olarak belirlenmiştir. AYÇ içeren her iki karışımda da CH tüketiminin 28. günde azaldığı, 90. günde ise tekrar arttığı tespit edilmiştir. Ek olarak, AYÇ700'deki CH tüketimi, 28 ve 90. günlerde AYÇ20 karışımına kıyasla yaklaşık %50 daha yüksek bulunmuştur. Bu durum, AYÇ700'ün puzolanik

malzeme olarak kullanılması için zamana ihtiyaç duyduğunu ve AYÇ20'ye kıyasla daha fazla puzolanik aktivite gösterdiğini belirtmektedir.



Şekil 4.11 PÇ, AYÇ20 ve AYÇ700'ün a) 7, b) 28 ve c) 90 günlük TG ve DTG analizi



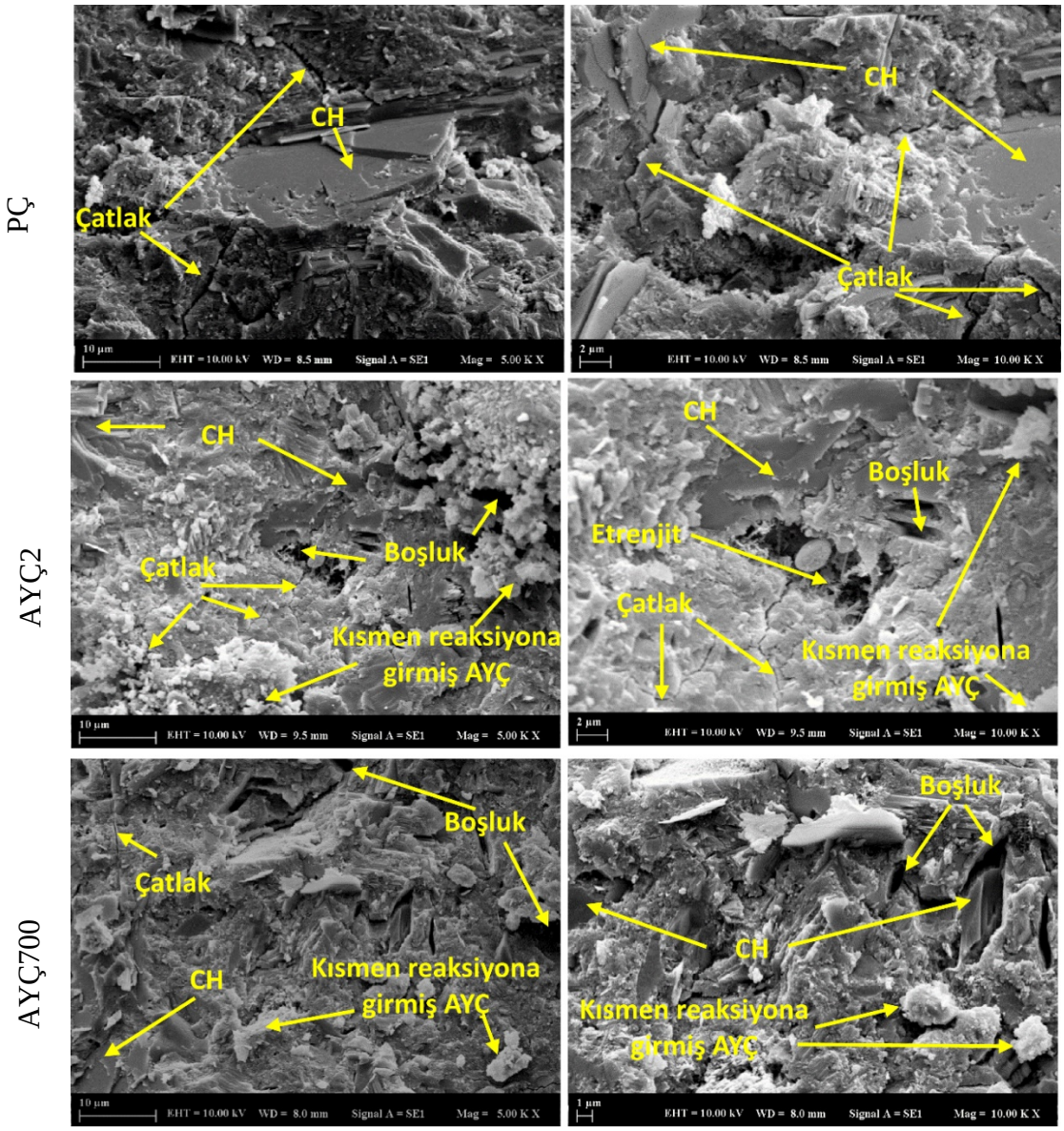
Şekil 4.11 PÇ, AYÇ20 ve AYÇ700'ün a) 7, b) 28 ve c) 90 günlük TG ve DTG analizi (devamı)

Tablo 4.1. Hidratasyon süresi boyunca numunelerin CH miktarları (%)

Karışım	7 gün	28 gün	90 gün
PÇ	14,4	14,8	16,4
AYÇ20	12,7	14,0	14,8
AYÇ700	12,3	13,6	14,0

4.8 SEM Analizi

28 gün kürlenen numunelerin SEM görüntüleri Şekil 4.12'de iki farklı büyütme oranında gösterilmektedir. Tüm numunelerde altıgen $Ca(OH)_2$ (CH) plakası ve kısa iğne benzeri C-S-H yapısı görülmektedir. Her karışımda çatlak oluşumu gözlemlenirken, boşluk yapısı sadece PÇ ile %20 oranda ikame edilen AYÇ20 ve AYÇ700 görüntülerinde tespit edilmiştir. Ayrıca etrenjit oluşumu sadece AYÇ20 ilave edilen karışımında mevcut olup bu durum AYÇ20'nin mukavemet gelişiminin diğer karışımlara göre neden daha yavaş olduğunu açıklamaktadır.

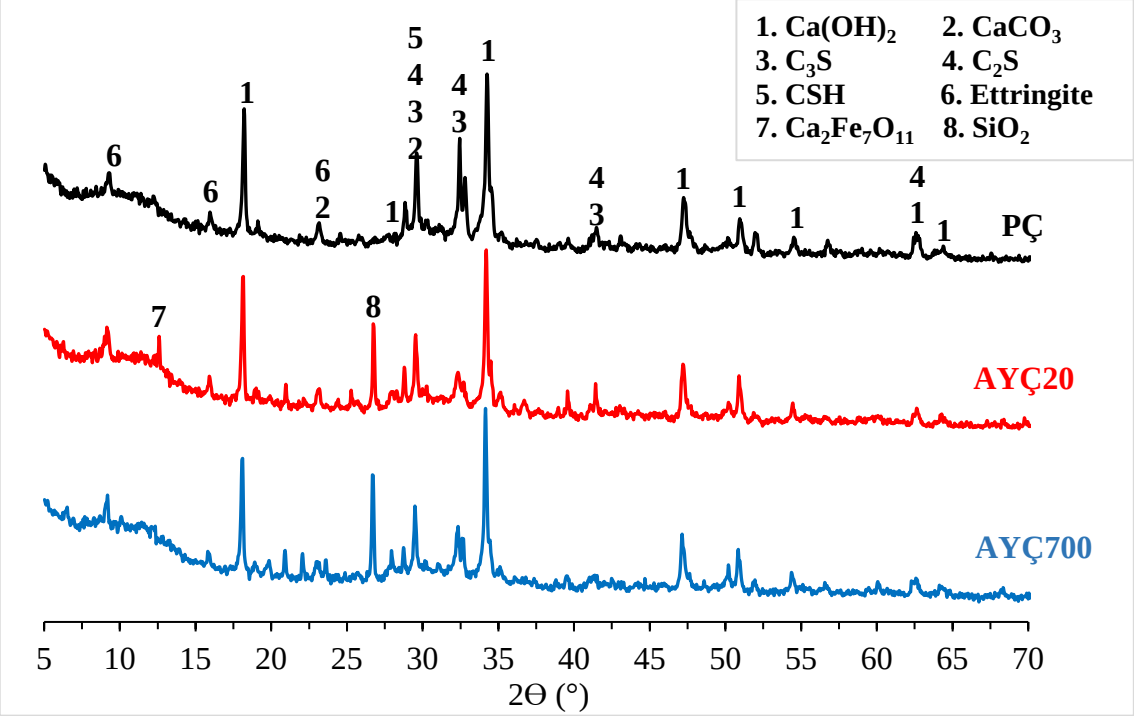


Şekil 4.12 PÇ, AYÇ20 ve AYÇ700'ün SEM görüntüleri

4.9 XRD Analizi

28 gün kürlenen numunelerin XRD desenleri Şekil 4.13'te verilmiştir. Numuneler, portlandit, kuvars (SiO_2, #PDF 01-086-1629), kalsit ($CaCO_3$, #PDF 01-085-1108), etrenjit, kalsiyum demir oksit, C-S-H, C_3S ve C_2S dahil olmak üzere çeşitli fazlar içermektedir. Tüm karışımlardaki ana fazın portlandit olduğu da görülmektedir. Bu durum TG/DTA analizinde belirlenen portlandit miktarları ile benzer bir eğilim göstermiştir. Kuvars minareli ise daha önce AYÇ hammaddesinde gözlendiği gibi PÇ ile %20 oranda ikame edilen AYÇ20 ve AYÇ700 numunelerinde de 26,8° 'de ($2\theta^{\circ}$)

gözlemlenmiştir. AYÇ'nin ilave edilmesi, daha amorf fazların oluştuğunu gösteren ve yaklaşık 32,5°'de ($2\theta^{\circ}$) tanımlanan C_3S veya C_2S bileşiğinin yoğunluğunu azaltmıştır [144].



Şekil 4.13. PÇ, AYÇ20 ve AYÇ700'ün XRD desenleri

5
ALKALİ-AKTİVE HAMUR SERİLERDE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÖN DENEYLER

5.1 Alkali-Aktive Hamur Tasarımı

Deneylerde bağlayıcı malzeme olarak AYÇ20 ve GYFC kullanılmış, AYÇ'nin ağırlıkça oranı %50, %60 ve %80 olarak belirlenmiştir. Alkali aktivatör olarak NaOH, KOH ve Na_2SiO_3 olmak üzere üç farklı çözelti kullanılmış, tüm serilerde çözelti/bağlayıcı (ç/b) oranı 0,3 olarak sabit tutulmuştur. Üretimlerde kullanılan malzeme miktarları 50x50x50 mm^3 boyutlarına sahip 3 küp numune hacmi için hesaplanmış, değerler Tablo 5.1-5.6'da özetlenmiştir. Tüm seriler üretimden 24 saat sonra kalıptan çıkartılıp deney gününe kadar sıcaklığı 20 ± 1 ^oC, bağıl nemi %55 ± 2 olan nem kabininde tutulmuştur.

Ön deneylerin ilki Tablo 5.1'de verilen malzeme miktarlarında AYÇ ile GYFC ikame edilerek yapılmıştır. Numune adlarında bulunan 50, 60 ve 80 sayıları AYÇ'nin karışımda ağırlıkça yüzde kullanım miktarını, 4, 6 ve 8 rakamları çözeltinin molaritesini, G harfi ise GYFC'yi belirtmektedir.

Tablo 5.1 GYFC ikameli ve KOH çözeltisi ile üretilen serilerin malzeme miktarları

Numune Adı	Molarite	AYÇ (g)	GYFC (g)	Su (g)	KOH (g)
AYÇ50-4M-G	4	301,3	301,3	180,8	40,6
AYÇ50-6M-G	6				60,9
AYÇ50-8M-G	8				81,1
AYÇ60-4M-G	4	361,1	240,8	180,6	40,5
AYÇ60-6M-G	6				60,8
AYÇ60-8M-G	8				81,0
AYÇ80-4M-G	4	480,4	120,1	180,2	40,4
AYÇ80-6M-G	6				60,6
AYÇ80-8M-G	8				80,9

İkinci karışımda, çözelti olarak NaOH ve Na_2SiO_3 kullanılmıştır (Tablo 5.2). Numune adında bulunan 50 sayısı AYÇ'nin karışımda ağırlıkça yüzde kullanım miktarını, 6 ve 8

rakamları çözeltinin molaritesini, 0,8 sayısı SiO_2/Na_2O (M_s) oranını, G harfi ise GYFC'yi belirtmektedir.

Tablo 5.2 GYFC ikameli, NaOH ve Na_2SiO_3 çözeltileri ile üretilen serilerin malzeme miktarları

	Molarite	**M_s**	**AYÇ (g)**	**GYFC (g)**	**Su (g)**	**NaOH (g)**	**Na_2SiO_3 (g)**
AYÇ50-6M-0,8G	6	0,8	308,2	308,2	119,2	33,2	103,1
AYÇ50-8M-0,8G	8	0,8	308,2	308,2	97,2	44,3	137,5

Üçüncü karışımda numune isimlerinde bulunan 40, 50 ve 60 sayıları AYÇ'nin karışımda ağırlıkça yüzde kullanım miktarını, 6, 8 ve 10 rakamları NaOH çözeltisinin molaritesini, G harfi ise GYFC'yi belirtmektedir (Tablo 5.3).

Tablo 5.3 GYFC ikameli ve NaOH çözeltisi ile üretilen serilerin malzeme miktarları

Numune Adı	**Molarite**	**AYÇ (g)**	**GYFC (g)**	**Su (g)**	**NaOH (g)**
AYÇ40-6M-G	6	241,3	361,9	181,0	43,4
AYÇ40-8M-G	8				57,9
AYÇ40-10M-G	10				72,4
AYÇ50-6M-G	6	301,3	301,3	180,8	43,4
AYÇ50-8M-G	8				57,8
AYÇ50-10M-G	10				72,3
AYÇ60-6M-G	6	361,1	240,8	180,6	43,3
AYÇ60-8M-G	8				57,8
AYÇ60-10M-G	10				72,2

Dördüncü karışımda ise çözelti olarak KOH kullanılıp seriler tekrarlanmıştır (Tablo 5.4).

Tablo 5.4 GYFC ikameli ve KOH çözeltisi ile üretilen serilerin malzeme miktarları

Numune Adı	Molarite	AYÇ (g)	GYFC (g)	Su (g)	KOH (g)
AYÇ40-6M-G	6	224,1	336,1	168,1	56,6
AYÇ40-8M-G	8				75,4
AYÇ40-10M-G	10				94,3
AYÇ50-6M-G	6	283,5	283,5	170,1	57,3
AYÇ50-8M-G	8				76,3
AYÇ50-10M-G	10				95,4
AYÇ60-6M-G	6	344,2	229,5	172,1	57,9
AYÇ60-8M-G	8				77,2
AYÇ60-10M-G	10				96,6

Beşinci karışım %50 GYFC ikame edilerek yapılmış, çözelti olarak ise 8M NaOH ile farklı oranlarda Na_2SiO_3/NaOH kullanılmıştır (Tablo 5.5).

Tablo 5.5 GYFC ikameli, NaOH ve farklı oranlarda Na_2SiO_3 çözeltileri ile üretilen serilerin malzeme miktarları

Numune Adı	Na_2SiO_3/ NaOH	AYÇ (g)	GYFC (g)	Su (g)	NaOH (g)	Na_2SiO_3 (g)
AYÇ50-8M-0,5G	0,5	301,3	301,3	162,3	57,8	28,9
AYÇ50-8M-0,75G	0,75			153,1		43,4
AYÇ50-8M-1,0G	1,0			143,9		57,8
AYÇ50-8M-1,5G	1,5			125,4		86,8
AYÇ50-8M-2,0G	2,0			107,0		115,7

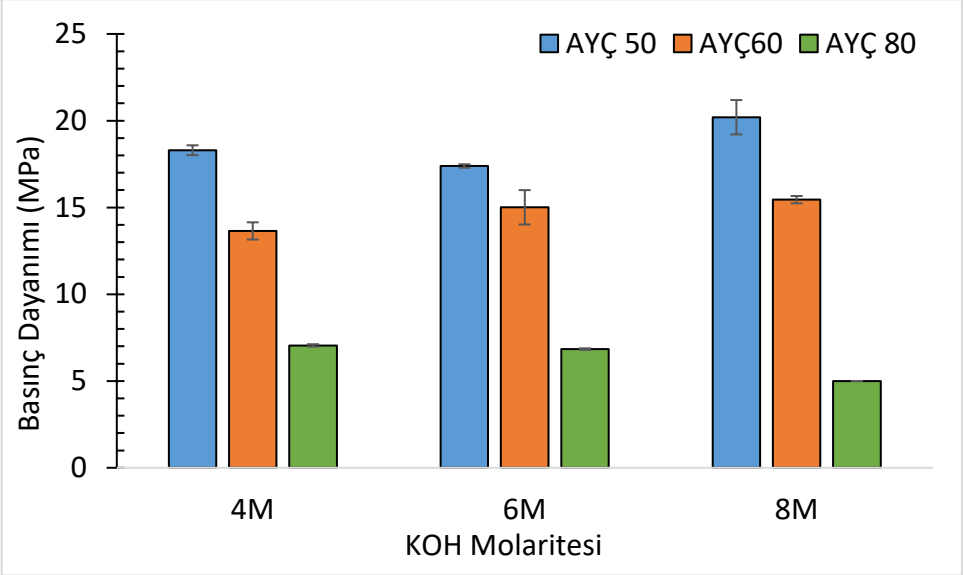
Sonuncu karışım ise %50 GYFC ikame edilerek yapılmış, çözelti olarak 6M NaOH ile farklı M_s (SiO_2/Na_2O) oranlarında Na_2SiO_3 kullanılmıştır (Tablo 5.6).

Tablo 5.6 GYFC ikameli, NaOH ve farklı Ms oranlarında Na_2SiO_3 çözeltileri ile üretilen serilerin malzeme miktarları

Numune Adı	M_s	AYÇ (g)	GYFC (g)	Su (g)	NaOH (g)	Na_2SiO_3 (g)
AYÇ50-6M-0,8G	0,8			119,0	32,9	96,8
AYÇ50-6M-1,2G	1,2	301,3	301,3	88,2	27,7	145,1
AYÇ50-6M-1,6G	1,6			57,3	22,4	193,5

5.2 Serilerin Basınç Dayanımı Sonuçları

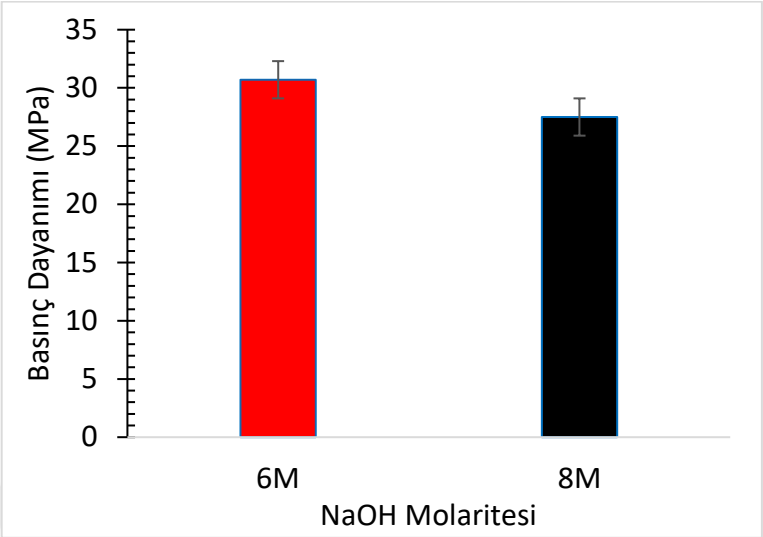
GYFC'ye %50, %60 ve %80 oranlarında AYÇ ikame edilerek ve çözelti olarak da KOH kullanılan serilerde elde edilen 7. gün basınç dayanımı değerleri Şekil 5.1'de verilmiştir. AYÇ'nin kullanım oranı arttıkça dayanımda düşüş görülmekle beraber numunelerdeki çatlak miktarında da azalma gözlenmiştir. KOH çözeltisinin molaritesi arttıkça dayanımda genel olarak bir artış görülmüş, çatlaklarda da azalma gözlenmektedir.



Şekil 5.1 GYFC ikamesi ve KOH çözeltisi ile üretilen serilerin 7. gün basınç dayanımları

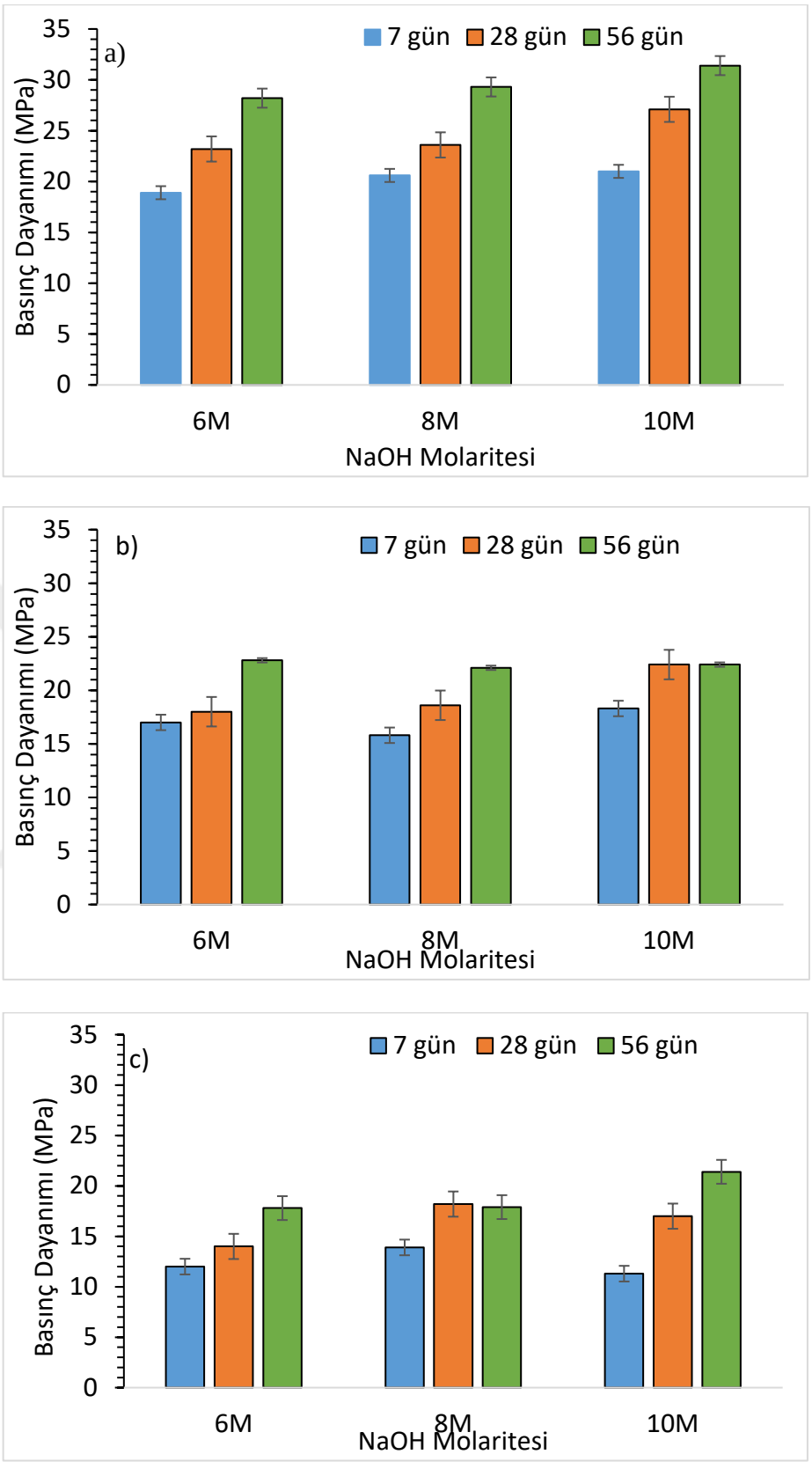
İkinci karışımda ise AYÇ'nin %50 oranda GYFC ile ikame edilip, 6 M ve 8 M NaOH çözeltisi ve sabit silika modülü (SiO_2/Na_2O=0,8) ile üretim gerçekleştirilmiş ve 7 günlük

deney sonuçları Şekil 5.2'de verilmiştir. 6 M çözelti kullanım durumunda 8 M çözelti kullanım durumuna göre %11,7 oranda dayanım artışı gözlenmiştir.

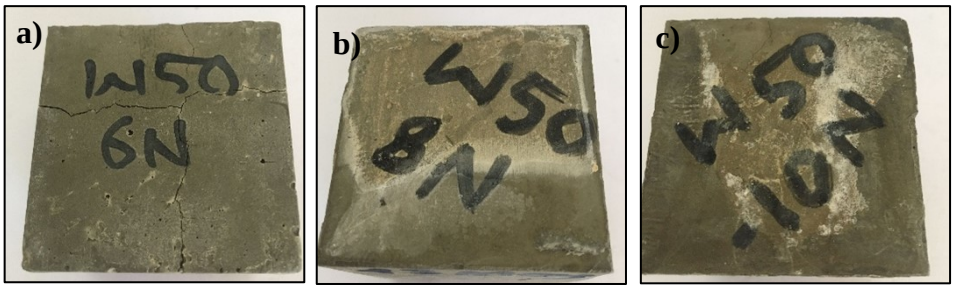


Şekil 5.2 %50 GYFC ikamesi, NaOH ve Na_2SiO_3 çözeltileri ile üretilen serilerin 7 günlük basınç dayanımları

Üçüncü karışımda AYÇ'ye ağırlıkça %40, 50 ve 60 oranlarda GYFC ikame edilip, 6 M, 8 M ve 10 M NaOH çözeltisi kullanılarak üretim gerçekleştirilmiş ve 7, 28 ve 56 günlük basınç deneyi sonuçları Şekil 5.3a, 5.3b ve 5.3c incelenerek yorumlanmıştır. Tüm serilerde molarite artışı ile dayanım artışı gözlenmiştir. Ancak AYÇ'nin %50 oranda kullanıldığı durumda ileri yaş dayanımlarında gözle görülür bir değişim saptanmamıştır. Şekil 5.4'te verilen örnek serilerde görüldüğü gibi NaOH molaritesi arttıkça çatlak oranı azalmıştır.

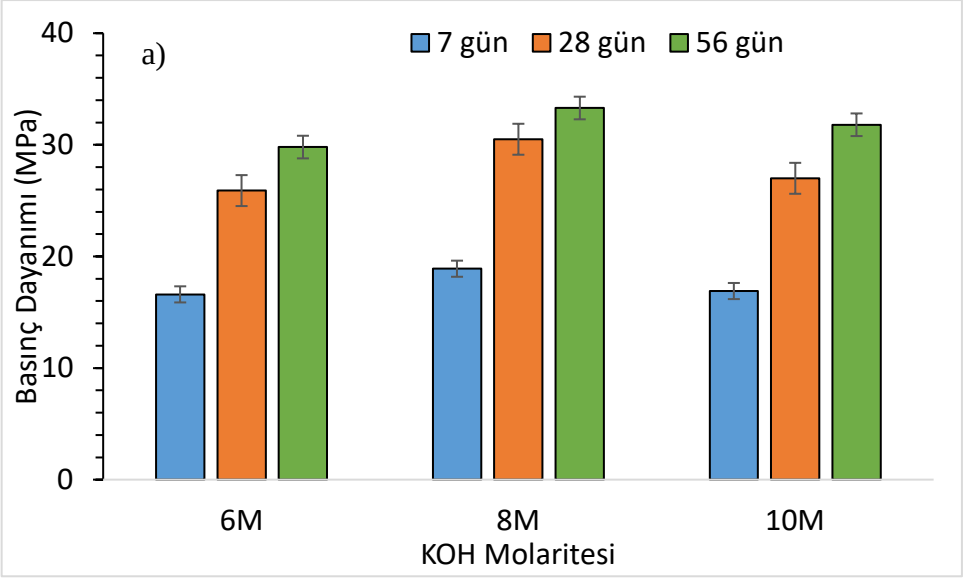


Şekil 5.3 AYÇ'nin GYFC ile a)%40, b)%50 ve c)%60 ikamesi ve NaOH çözeltisi ile üretilen serilerin dayanımları

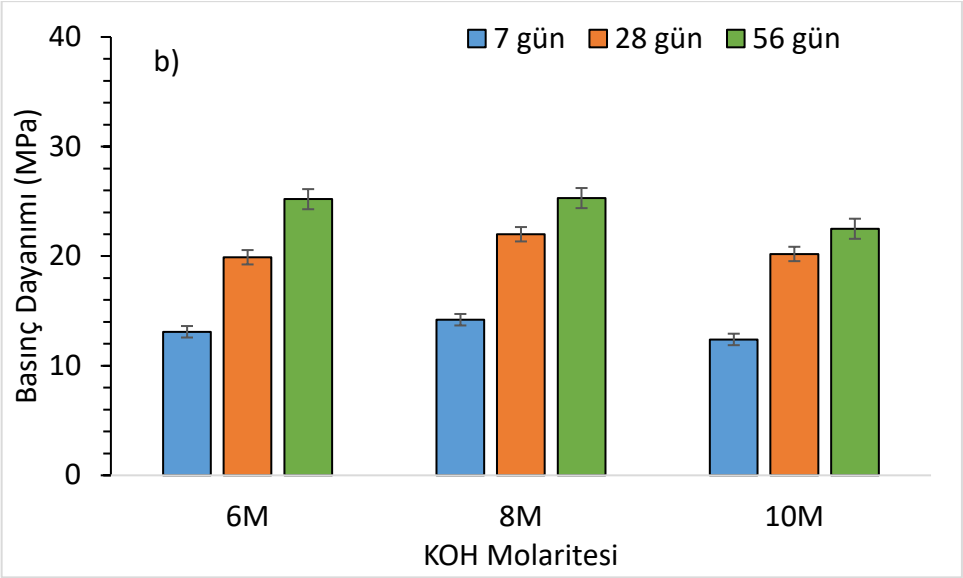


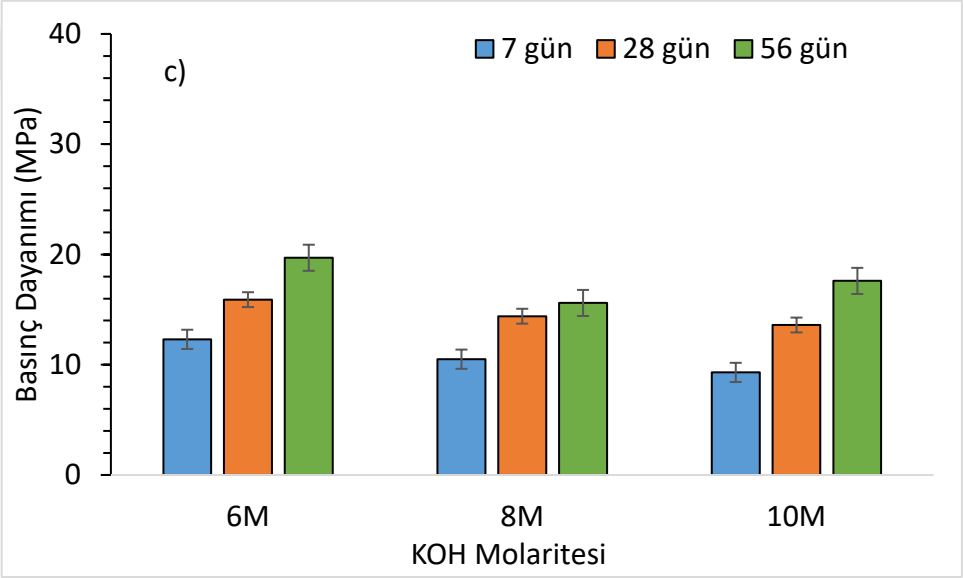
Şekil 5.4 % 50 AYÇ ile a) 6 M, b) 8 M ve c) 10 M NaOH üretilen seriler

Dördüncü karışımda AYÇ'ye ağırlıkça %40, 50 ve 60 oranlarda GYFC ikame edilip, 6 M, 8 M ve 10 M KOH çözeltisi kullanılarak üretim gerçekleştirilmiş, 7, 28 ve 56 günlük basınç deneyi sonuçları Şekil 5.5a, 5.5b ve 5.5c incelenerek yorumlanmıştır. AYÇ'nin %40 kullanılma durumunda en yüksek dayanımlar 8M KOH çözeltisi ile üretilen serilerde gözlenmiştir. AYÇ'nin %50, çözeltinin ise 6M ve 8M kullanımı durumunda dayanım değerlerinde belirgin bir fark yoktur, ancak 10M çözelti kullanılan serilere göre yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir. AYÇ'nin %60 kullanılma durumunda en yüksek dayanım değeri 6M çözelti kullanılan seride elde edilmiştir. Ek olarak, çözelti olarak KOH kullanılması halinde numunelerde çatlak gözlenmemiştir.



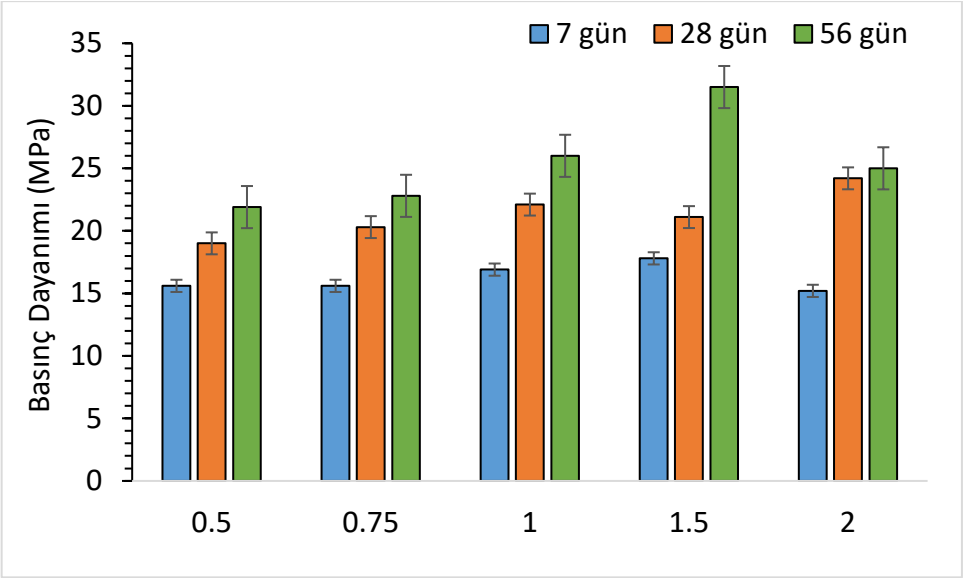
Şekil 5.5 AYÇ'nin GYFC ile a) %40, b) %50 ve c) %60 ikamesi ve KOH çözeltisi ile üretilen serilerin dayanımları





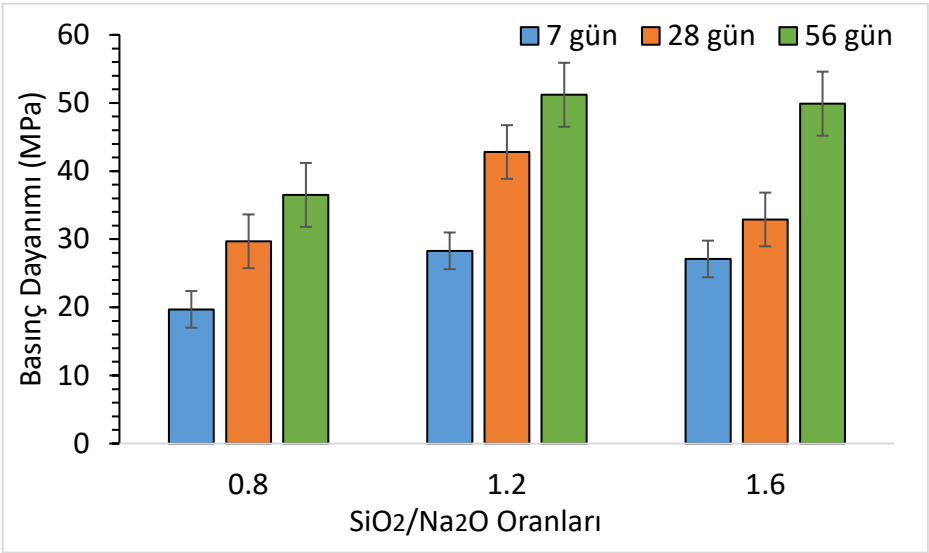
Şekil 5.5 AYÇ'nin GYFC ile a) %40, b) %50 ve c) %60 ikamesi ve KOH çözeltisi ile üretilen serilerin dayanımları (devamı)

Beşinci karışımda ise AYÇ'ye ağırlıkça %50 oranda GYFC ikame edilip, sabit 8 M NaOH çözeltisi ve 0,5, 0,75, 1,0, 1,5 ve 2,0 oranlarında Na_2SiO_3/NaOH kullanılarak numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.6'da verilen grafiğe göre 7, 28 ve 56 günlük dayanım değerleri en yüksek Na_2SiO_3/NaOH oranının 1,5 kullanıldığı serilerde görülmüştür. Numunelerde çatlak görülmemesine rağmen karışım aşamasında Na_2SiO_3/NaOH arttıkça kıvam kaybı meydana gelmiştir.



Şekil 5.6 %50 GYFC ikamesi, sabit NaOH çözeltisi ile farklı Na_2SiO_3/NaOH oranları kullanılan serilerin dayanımları

Son karışımda ise AYÇ'ye ağırlıkça %50 oranda mineral katkı maddesi olarak GYFC ikame edilip, sabit 6 M NaOH çözeltisi ve 0,8, 1,2 ve 1,6 oranlarda SiO_2/Na_2O seçilerek üretim gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.7'de verilen grafiğe göre 7, 28 ve 56 günlük dayanım değerleri en yüksek SiO_2/Na_2O oranının 1,2 olduğu serilerde görülmüş ve en yüksek dayanım değeri 51,2 MPa bulunmuştur. Ek olarak, Şekil 5.8'de görüldüğü gibi numunelerde çatlak mevcuttur.



Şekil 5.7 %50 GYFC ikamesi, sabit NaOH çözeltisi ve farklı SiO_2/Na_2O oranları ile üretilen serilerin dayanımları



Şekil 5.8 %50 GYFC ikamesi, sabit NaOH çözeltisi ve farklı SiO_2/Na_2O oranları kullanılarak serilerin üretimi

6
DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

6.1 Alkali-Aktive Hamur ve Harç Numunelerinin Hazırlanması

Ön deney sonuçlarından elde edilen veriler ışığında karar verilen karışım oranlarına bağlı olarak gerçekleştirilen üretimlere ait detay bilgiler Tablo 6.1'de verilmiştir. İlgili serilerde AYÇ20, GYFC ile ağırlıkça %0, %25, %50 ve %75 oranlarında ikame edilmiş, harç numune üretiminde standart CEN kumu hacimce %50 oranında sabit miktarda kullanılmıştır. Aktivatör olarak, ön deneyler sonucu karar verilen 6 M NaOH ve SiO_2/Na_2O (M_s) oranı 1,2 olan Na_2SiO_3 kombinasyonu kullanılmıştır. Alkali-aktive hamur (AAP) ve Alkali-aktive harç (AAM) numune üretimi için ç/b oranı sırasıyla 0,30 ve 0,35 olarak kullanılmıştır. Her iki numune üretiminde de katkı malzemesi kullanılmamıştır. Numunelerin isimlendirilmesi iki bölüme ayrılmıştır; P ve M harfleri sırasıyla hamur ve harcı, sayı ise AYÇ'nin karışımda kullanılma yüzdesini göstermektedir. Alkali aktivatör çözeltisi, >%99 saflıkta katı formdaki NaOH'ın musluk suyu içerisinde çözdürülmesi, farklı bir kapta Na_2SiO_3 ile karıştırılması ve laboratuvar koşullarında ortam sıcaklığına kadar soğumaya bırakılması ile hazırlanmıştır. Önceden tartılan AYÇ ve GYFC malzemeleri ve alkali aktivatör çözeltisi laboratuvar tipi mikser kullanılarak karıştırılmış ve AAP numuneleri üretilmiştir. AAM numuneleri hazırlanırken de benzer prosedür kullanılmış, ilave olarak hacimce kum eklenip, homojen bir karışım için karıştırma işlemine yaklaşık 5 dakika daha devam edilmiştir. Karışımlar ilgili kalıplara dökülüp sıkıştırma işlemi için yaklaşık 5 saniye mekanik olarak titreştirilmiştir. Daha sonra kalıpların üzeri buharlaşmayı önlemek için streç film ile kaplanmıştır. Numuneler hazırlandıktan 24 saat sonra kalıptan çıkartılıp, sıcaklığı 21±2 °C, bağıl nemi %55±2 olan nem kabininde öngörülen deney sürelerine kadar bekletilmiştir.

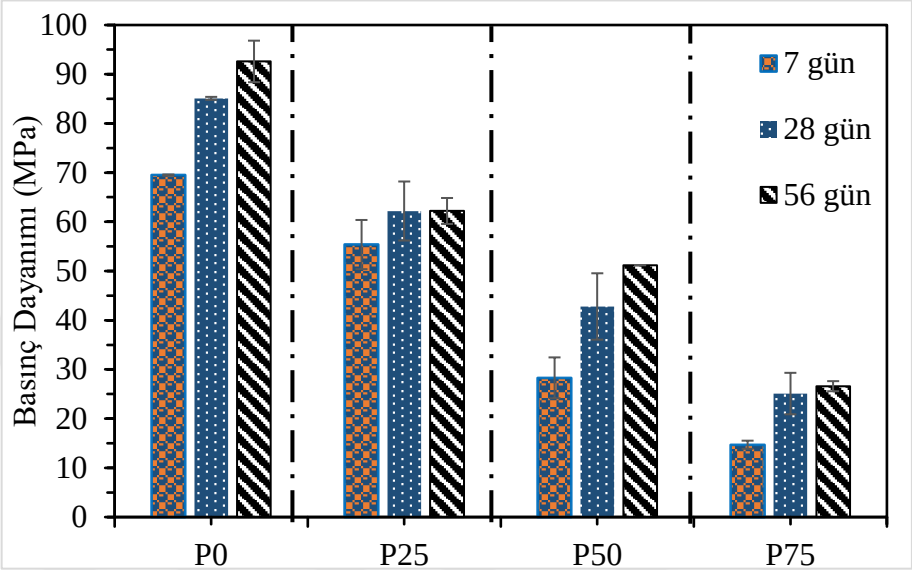
Tablo 6.1 AAP ve AAM numunelerinin karışım detayları

	Karışım	**AYÇ (ağırlıkça %)**	**GYFC (ağırlıkça %)**	**Kum (hacimce %)**	**NaOH molaritesi (M)**	**M_s**	**ç/b**
AAP	P0	0	100	-	6	1,2	0,30
	P25	25	75	-			
	P50	50	50	-			
	P75	75	25	-			
AAM	M0	0	100	50			0,35
	M25	25	75	50			
	M50	50	50	50			
	M75	75	25	50			

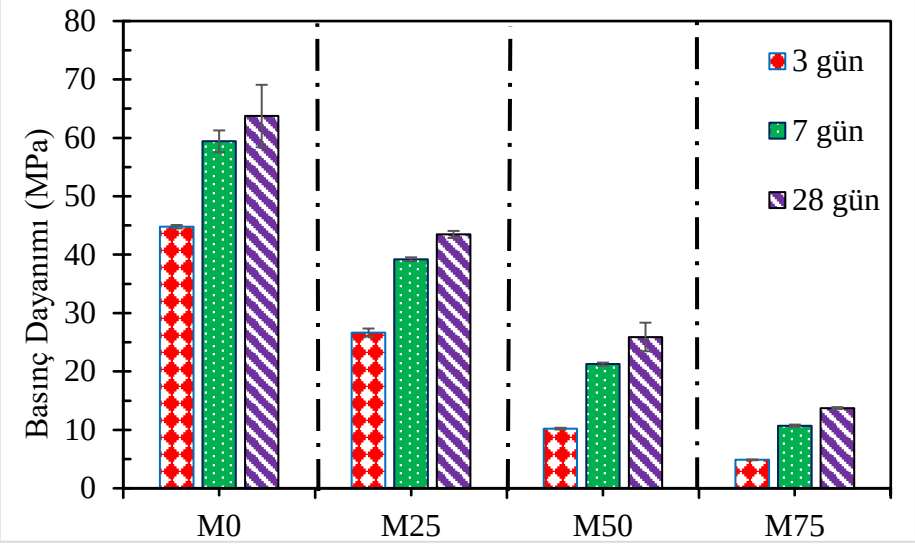
6.1.1 AAP ve AAM Numunelerin Basınç Dayanımı

Şekil 6.1 ve 6.2'de, AYÇ ikamesinin sırasıyla AAP ve AAM karışımlarının basınç dayanımlarına etkisi gösterilmiştir. AAP karışımları 7, 28 ve 56. günlerde test edilirken, AAM karışımlarının basınç dayanımı 3, 7 ve 28. günlerde incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre AAP karışımlarının 28. gündeki basınç dayanımları 25,1 ila 85,1 MPa arasında değişmektedir. Öte yandan harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı bir miktar azalmış ve 13,7 ila 63,7 MPa arasında değişmiştir. Hamur numunelerin harç numunelere göre daha yüksek mukavemet göstermesi bağlayıcı içeriğinin daha yüksek olması ve ince agrega ile matris arasında bulunan ara yüzey fazının olmaması ile açıklanabilir. Kür süresi arttıkça tüm numunelerin basınç dayanımlarının arttığı ve kontrol numunelerinin (AYÇ %0) diğerlerine göre daha yüksek basınç dayanımı gösterdiği ilgili grafiklerden de görülmektedir. AAM karışımlarının basınç dayanımı gelişimi alüminosilikat öncülerinde (AYÇ ve GYFC) çözünür kalsiyum içeriğinin

varlığına bağlıdır [145,146]. Daha yüksek AYÇ içeriğine sahip numunelerde mukavemetteki azalma, C-S-H ve/veya kalsiyum alümino-silikat hidrat (C-(A)-S-H) tipi jellerin sentezini sağlayan daha düşük, çözünür kalsiyum iyonu konsantrasyonu ile ilişkilidir. Ancak harç numunelerine %25'e varan AYÇ ilavesi, TS-EN 197-1 standardının önerdiği tüm kür yaşları için CEM I 42,5 R tipi PÇ harcının sınır basınç dayanım değerlerini karşılamıştır.



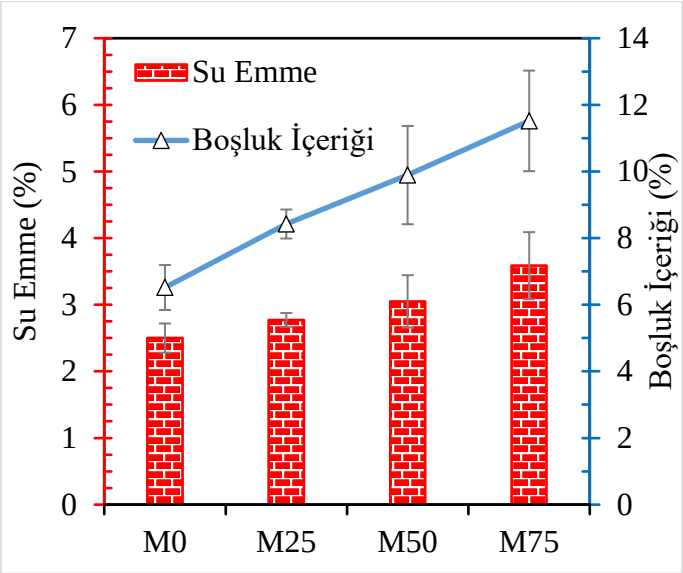
Şekil 6.1 AAP numunelerinin basınç dayanımı gelişimi



Şekil 6.2 AAM numunelerinin basınç dayanımı gelişimi

6.1.2 AAM Numunelerinin Su Emme ve Boşluk Oranı Tayini

Şekil 6.3, AAM numunelerinin su emme ve boşluk içeriğini göstermektedir. Daha düşük su emilimi, genel olarak AAM numunelerinde daha düşük boşluk miktarını ve bu boşlukların birbiri ile bağlantısının olmadığını göstermektedir. Ayrıca kapalı boşluklar, hava boşlukları ve kılcal boşlukların birleşimi, AAM karışımlarının toplam boşluk içeriğine eşittir ve boşluk içeriği, bilindiği üzere harçların dayanıklılığını da doğrudan etkileyen önemli bir parametredir [147,148]. %0, %25, %50 ve %75 oranlarda AYÇ ikamesi ile üretilen AAM numunelerinin su emmeleri sırasıyla %2,50, %2,77, %3,05 ve %3,59 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, AYÇ içeren AAM numunelerinin boşluk içeriğinin %8,42 ila %11,52 arasında değiştiği görülmüştür. Numunelerin iç yapı özellikleri, su emme ve boşluk içeriği ile ilişkilendirilebilir. Örneğin, C-A-S-H jeli içeren AAM numuneleri, jel yapısında daha yüksek miktarda bağlı su bulundurması nedeniyle sodyum alümina silikat hidrat (N-A-S-H) jel yapıları içeren karışımlardan daha az su emme eğilimine sahiptir [148,149]. Artan AYÇ içeriği ile C-A-S-H tipi jellerin azalıp N-A-S-H tipi jel oluşumu içyapı analizleri ile de tespit edilmektedir. Ayrıca, Na_2SiO_3 ile aktive edilen AAM karışımlarının su emmesi karışımda kullanılan bağlayıcı malzemelerin Si/Al oranına da bağlıdır. Yüksek Si/Al oranı, matris içindeki sodyum silikat jelinin nem stabilitesini düşürüp daha yüksek su emmesine ve boşluk içeriğine yol açabilir [150]. Bu nedenle, %100 GYFC (M0) içeren AAM karışımlarının en düşük su emme ve boşluk içeriği, XRD ve SEM analizi ile de doğrulanmış olup; bu harç serisinin göreceli olarak daha yoğun iç yapıya sahip olması ile, hidratasyon ürünlerinin C-A-S-H tipi jel yapısına sahip olması ile ve daha düşük Si/Al oranı ile ilişkili olduğu söylenebilir. Ayrıca, Tablo 6.2'de gösterildiği gibi, AYÇ içeren AAM karışımlarının su emme ve boşluk içeriğinin, literatürde belirtilen AAM'lerle benzer veya daha azdır.



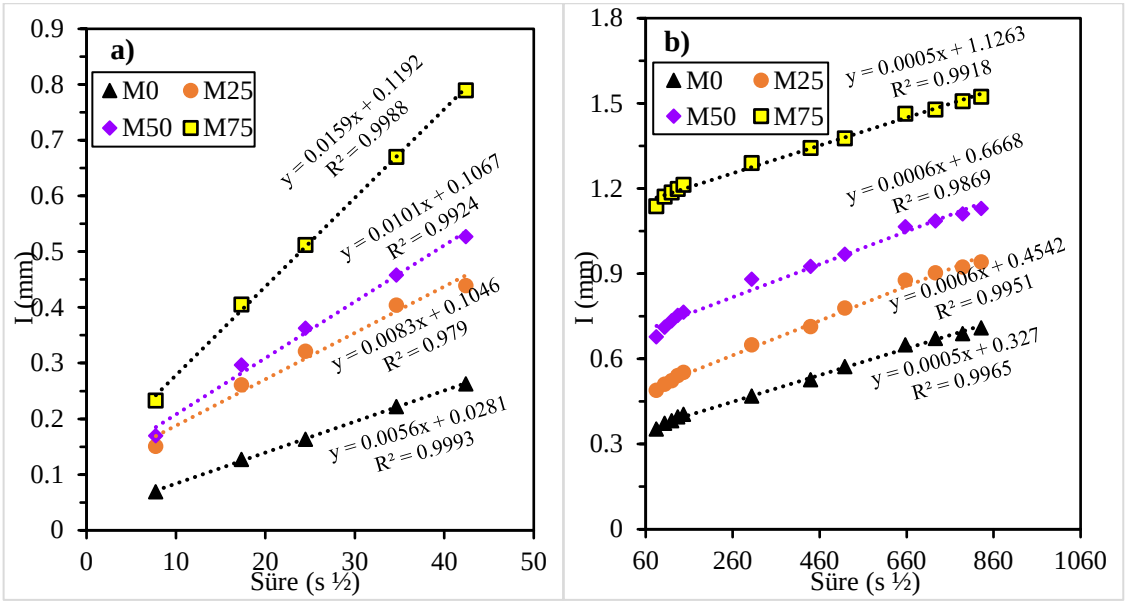
Şekil 6.3 AAM numunelerinin su emme ve boşluk içeriği

Tablo 6.2 GYFC esaslı AAM'lerin su emme ve boşluk içeriğinin karşılaştırılması

Referans	**Hammadde**	**Su emme (%)**	**Boşluk içeriği/ Porozite (%)**
Mevcut çalışma	GYFC, AYÇ	2,50-3,59	6,52-11,52
[151]	GYFC, UK	1,10-6,10	-
[152]	GYFC	3,61-6,37	8,40-14,16
[153]	GYFC	4,00-11,00	6,00-22,50
[154]	GYFC, SD	5,00-10,20	-
[155]	GYFC	5,50-8,00	12,50-18,00
[156]	GYFC, UK	-	7,80-14,00
[157]	GYFC, UK, Palm yakıtı külü	10,90-11,00	-
[158]	GYFC, Lityum cürufu	16,00-16,65	33,61-40,78

6.1.3 AAM Numunelerinin Sorptivitesi

Şekil 6.4, AAM numunelerinin su emme eğilimlerini ve sorptivitesindeki değişimi göstermektedir. Deney sonucunda, numunelerin su emmesi, ilgili standartta öngörülen zaman aralığına bağlı olarak birincil ve ikincil sorptivite değerleri elde edilmiştir. Bu değerler, grafiğin birinci ve ikinci bölümleri için çizilen doğrusal trend çizgisinin eğimi kullanılarak hesaplanmıştır. Birincil sorptivite, kılcal gözeneklerin hızlı bir şekilde doygunluğundan kaynaklanırken, ikincil sorptivite, büyük hava boşluklarının veya mikro çatlakların kademeli olarak doldurulmasından kaynaklanmaktadır [159]. Deney sonuçları değerlendirildiğinde, birincil sorptivite değerlerinin ikincil sorptivite değerlerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. AAM numuneleri için birincil sorptivite değerleri 0,0056 ile 0,0159 mm/s$^{1/2}$ arasında değişirken, ikincil sorptivite değerlerinin 0,0005 ile 0,0006 mm/s$^{1/2}$ arasında oldukça dar bir aralıkta değiştiği gözlenmiştir. AYÇ'nin ikame oranındaki artış, daha yüksek birincil sorptivite değerleri ile sonuçlanmış, ancak ikincil sorptiviteyi etkilememiştir. Referans karışımın (M0) %25, %50 ve %75 AYÇ içeren numunelere kıyasla %33, %45 ve %65 daha az birincil sorptiviteye sahip olduğu gözlenmiştir. Bu durum, daha önce de ifade edildiği üzere GYFC bazlı AAM numunelerinde daha fazla bulunan C-A-S-H jellerinin daha yoğun bir iç yapı oluşturması ve boşluk miktarını azaltması ile açıklanabilir [160,161].



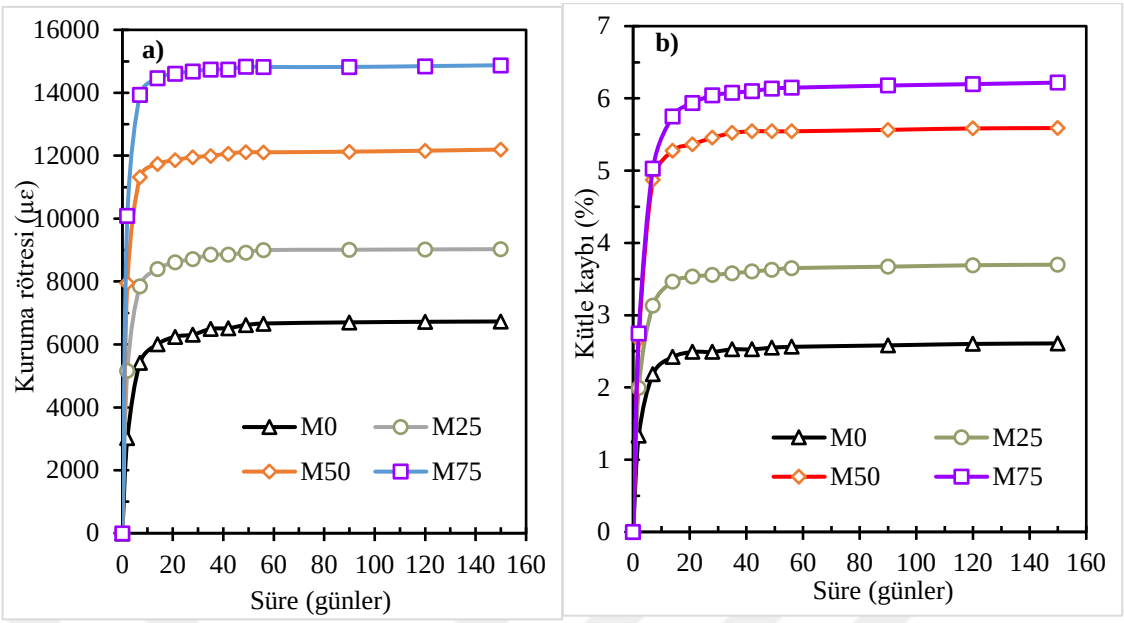
Şekil 6.4 AAM numunelerinin a) birincil b) ikincil sorptivite değerleri

6.1.4 AAM Numunelerinin Kuruma Rötresi

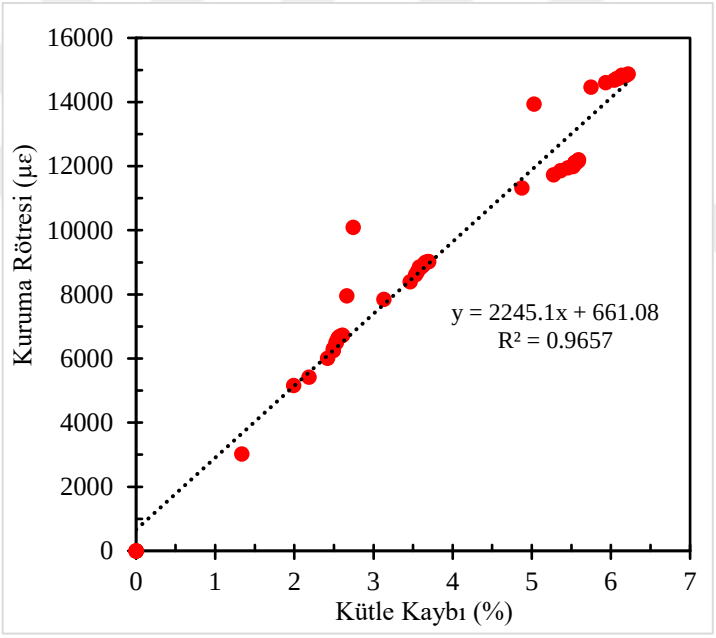
Şekil 6.5, AYÇ ikamesinin, AAM numunelerinin kuruma rötresi ve kütle kaybı üzerindeki etkisini göstermektedir. AAM numunelerinin kuruma rötresi 150. güne kadar ölçülmüş olup değerler 6730 ila 14876 με arasında değişmektedir. Tüm AAM numunelerinin kuruma rötresi, 14 günden sonra önemli ölçüde yavaşlayıp, 150. gündeki rötre değerlerinin yaklaşık %89 ile 97'sine karşılık gelmiştir. En yüksek kuruma rötresi %75 oranda AYÇ ile hazırlanan harç numunelerinde ölçülürken, en düşük kuruma rötresini referans harç numunesi göstermiştir. M25, M50 ve M75 numunelerinin kuruma rötresi, referans numunelere kıyasla sırasıyla yaklaşık %34, %81 ve %121 daha yüksek bulunmuştur.

AYÇ içeren numunelerin önemli ölçüde daha yüksek rötre değerlerine sahip olması, boşluk yapısında bulunan büyük miktarda kılcal boşlukların daha büyük kılcal gerilime sebep olması ile açıklanabilir [162]. Bu nedenle, matris içindeki daha büyük miktarda kılcal gözenek hacmi ve nispeten daha az yoğun içyapı, AYÇ içeren numunelerin önemli ölçüde daha fazla rötre yapmasına sebep olabilir.

Şekil 6.5b'de daha yüksek AYÇ içeriğinin AAM numunelerinin kütle kaybı değerlerini de arttırdığı gözlenmektedir. M75 harç numunelerinin kütle kaybı değeri, M0 ile karşılaştırıldığında yaklaşık 2,4 kat daha yüksektir. Rötre sonuçlarına benzer şekilde kütle kaybı değerleri, ilk 14 gün boyunca önemli ölçüde artıp, daha sonra tüm AAM numunelerinin maksimum kütle kaybının yaklaşık %93'ünden fazlası tamamlanmıştır.



Şekil 6.5 AAM numunelerinin a) kuruma rötresi b) kütle kaybı değerleri



Şekil 6.6 AAM numunelerinin kuruma rötresi ve kütle kaybı arasındaki ilişkisi

Şekil 6.6'da, farklı AYÇ ikame oranları için tüm AAM numunelerinin kuruma rötresi ve kütle kaybı arasındaki ilişki görülmektedir. Buna göre kütle kaybındaki artışın kuruma rötresini de arttırdığı söylenebilir. Karışımların kuruma rötresi, korelasyon katsayısı 0,9657 olan Denklem (6.1) ile tahmin edilebilir.

$$d_s = 2245{,}1 \times m_l + 661{,}08 \qquad (6.1)$$

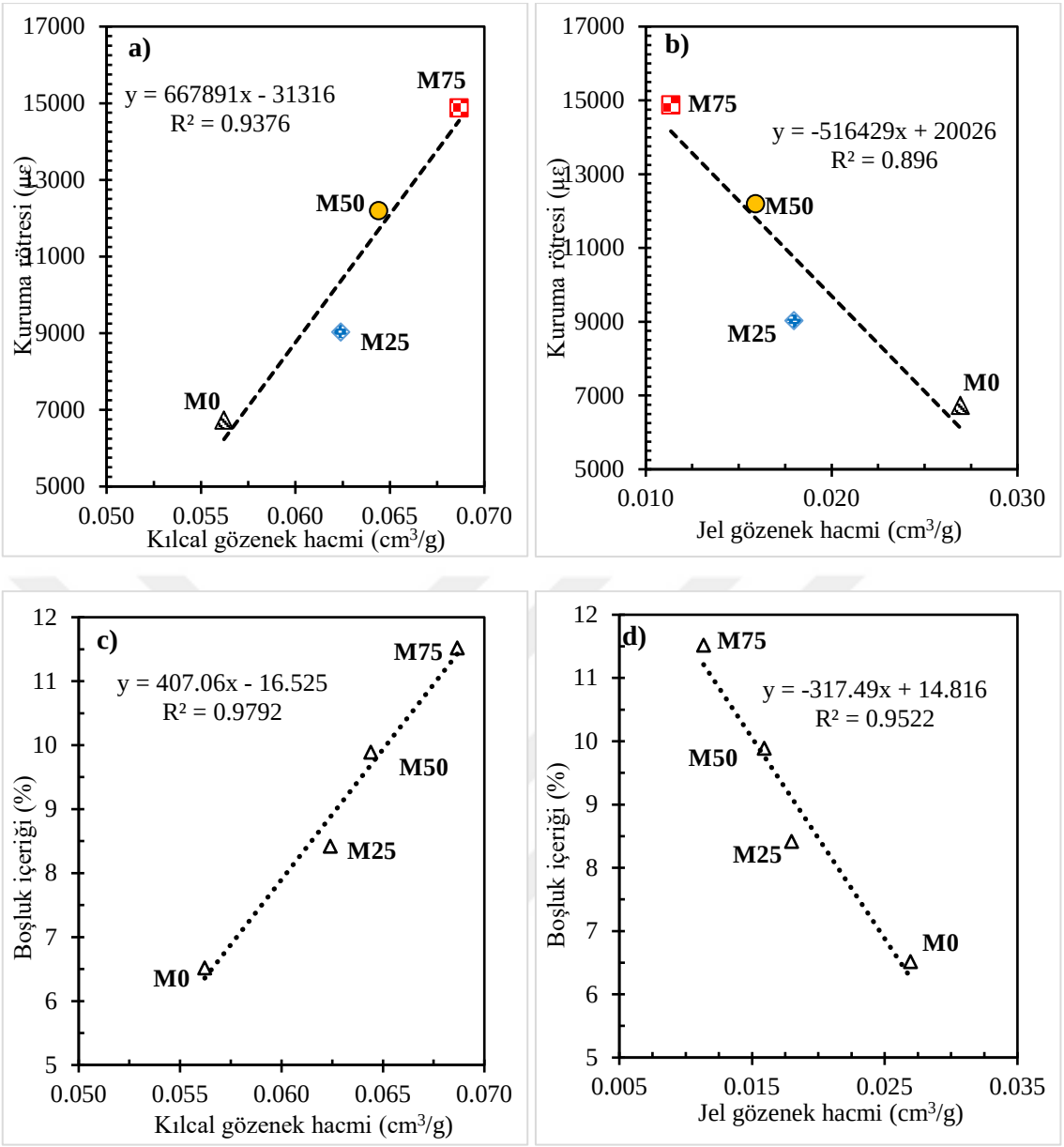
Burada d_s kuruma rötresini, m_l ise AAM numunelerinin ilgili gündeki kütle kaybı değerini ifade eder.

6.1.5 AAM Numunelerinin Kılcal ve Jel Boşluklarının Tayini

Jel tanelerinin içindeki kılcal su ve jel ve ara katmanda bulunan su, harç numunelerinde bulunan fiziksel su çeşitleridir [131]. Arşimet yöntemi, jel taneciklerindeki suyu ve kılcal suyu ölçmek için kullanılmış, sonuçlar Tablo 6.3'te gösterilmiştir. Deney sonuçları irdelendiğinde; AYÇ'nin ikame oranının artması, daha yüksek kılcal gözenek hacmine yol açarken, jel ve ara katmandaki gözenek hacminin toplam değerini azaltmıştır. Örnek olarak, AYÇ'nin ikame oranı %0'dan %75'e yükseldikçe, kılcal gözenek hacmi yaklaşık %22,2 artarken, jel ve ara katman suyunun toplam hacmi yaklaşık %57,6 azalmıştır. Şekil 6.7'de gösterilen korelasyonlara göre yüksek AYÇ ikamesi, kılcal gözenek hacmini arttırıp, AAM numunelerinde daha yüksek rötre ve boşluk içeriğine yol açmıştır. Benzer sonuçlar Zhang ve diğerlerinin [163] yaptığı çalışmalarda da ifade edilmiş, kılcal gözenek hacmi arttıkça rötre değerlerinin arttığı belirlenmiştir.

Tablo 6.3 AAM numunelerinin kılcal ve jel boşlukları

	Kılcal gözenek hacmi (cm^3/g)	**Jel ve ara katman gözenek hacmi (cm^3/g)**	**Kuruma rötresi (με)**	**Boşluk içeriği (%)**
M0	0,0562±0,002	0,0269±0,004	6730±110	6,52±0,67
M25	0,0624±0,003	0,018±0,001	9028±170	8,42±0,43
M50	0,0644±0,002	0,0159±0,001	12196±150	9,89±1,47
M75	0,0687±0,003	0,0114±0,005	14876±160	11,52±1,51



Şekil 6.7 Numunelerin a) kılcal gözenek hacmi ve kuruma rötresi, b) jel gözenek hacmi ve kuruma rötresi, c) kılcal gözenek hacmi ve boşluk içeriği ve d) jel gözenek hacmi ve boşluk içeriği arasındaki ilişki

6.1.6 AAM Numunelerinin Islanma-Kuruma Çevrimi

I-K çevrimleri, 28 günlük kürlemeden sonra GYFC ve AYÇ içeren AAM numunelerinin dayanıklılık özelliklerini değerlendirmek için yapılmıştır. Numunelerin I-K çevrimlerine maruz kaldıktan sonraki basınç dayanım ve kütle değişimi değerleri Şekil 6.8'de, artık basınç dayanım sonuçları ise Şekil 6.9'da gösterilmektedir. Deney sonuçları değerlendirildiğinde, tüm AAM numunelerinin basınç dayanımı, 28 günlük basınç

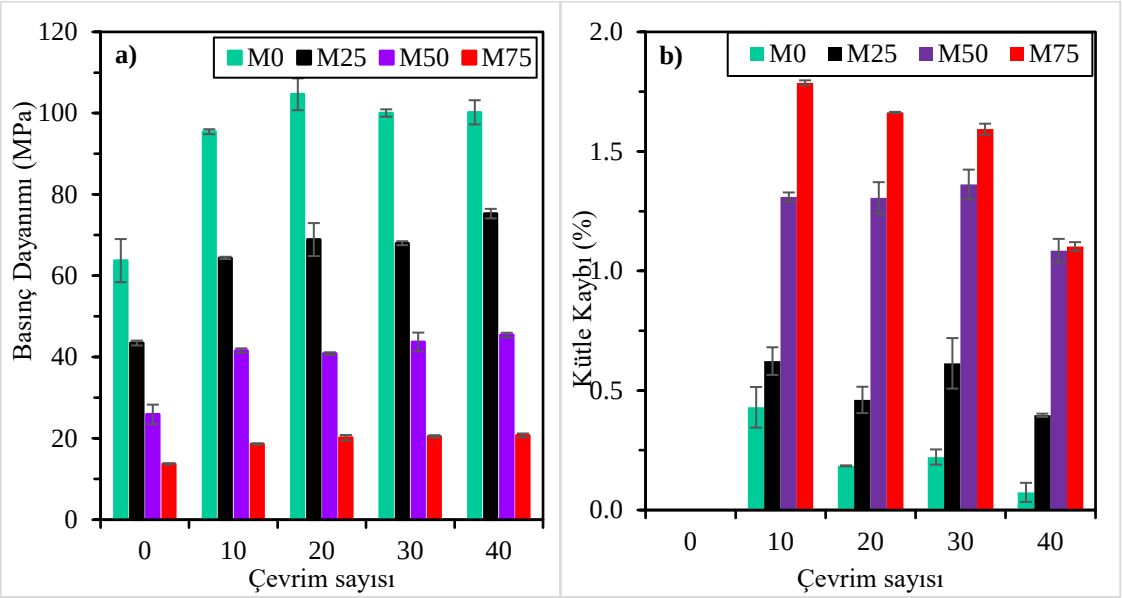
dayanımlarına kıyasla I-K çevrimleri arttıkça artış göstermiştir. M0 numunesinin basınç dayanımı ise 20. I-K çevrimine kadar artıp daha sonra nispeten azalmıştır. Ancak, AYÇ içeren numunelerin basınç dayanımı, artan I-K çevrimleri ile kademeli olarak artmıştır. M0 numunelerinin basınç dayanımı onuncu ve yirminci I-K çevriminden sonra sırasıyla %49,7 ve %64,2 artarken, otuzuncu ve kırkıncı I-K çevriminden sonra sırasıyla %57,0 ve %57,2 olmuştur. M25, M50 ve M75 numunelerinin kırkıncı I-K çevriminden sonra basınç dayanımındaki artış sırasıyla %73,2, %75,3 ve %51,0 olarak elde edilmiştir. I-K çevrimlerinden sonra basınç dayanımının iyileşmesi, çimento esaslı malzemelerin daha hızlı nem difüzyonuna neden olan yüksek kurutma sıcaklığına (60 °C) [164–167] ve C-S-H, C-A-S-H ve N-A-S-H [168–170] gibi mukavemet veren ürünlerin daha fazla oluşmasına sebep olan reaksiyonların artmasına bağlanabilir. I-K çevrimlerinin AAM numunelerinin basınç dayanımı gelişimi üzerindeki etkisini inceleyen önceki çalışmalarda da benzer şekilde çevrimlerin dayanım arttırıcı ürünlerin oluşumuna sebep olduğu ve dayanımı arttırdığı bulunmuştur [171–173].

Ayrıca, kırkıncı I-K çevriminde M25 ve M50 numunelerinin artık basınç dayanımındaki artış, C-A-S-H ve N-A-S-H jellerinin bir arada bulunmasına bağlanabilir. Düşük Ca^{+2} içeren bağlayıcı sistemlerin laboratuvar koşullarındaki basınç dayanımı gelişimi, yüksek Ca^{+2} içeren bağlayıcı sistemlerinden daha düşük olup istenilen dayanım özellikleri elde etmek için çoğunlukla yüksek kürleme sıcaklıkları önerilir [174–176]. Özellikle düşük Ca^{+2} içeren bağlayıcı sistemlerde [171] oluşan N-A-S-H jelleri, I-K çevriminde kurutma işlemi ile artmış ve böylece AYÇ oranı fazla olan numunelerde daha fazla artık mukavemet artışı sağlanmıştır.

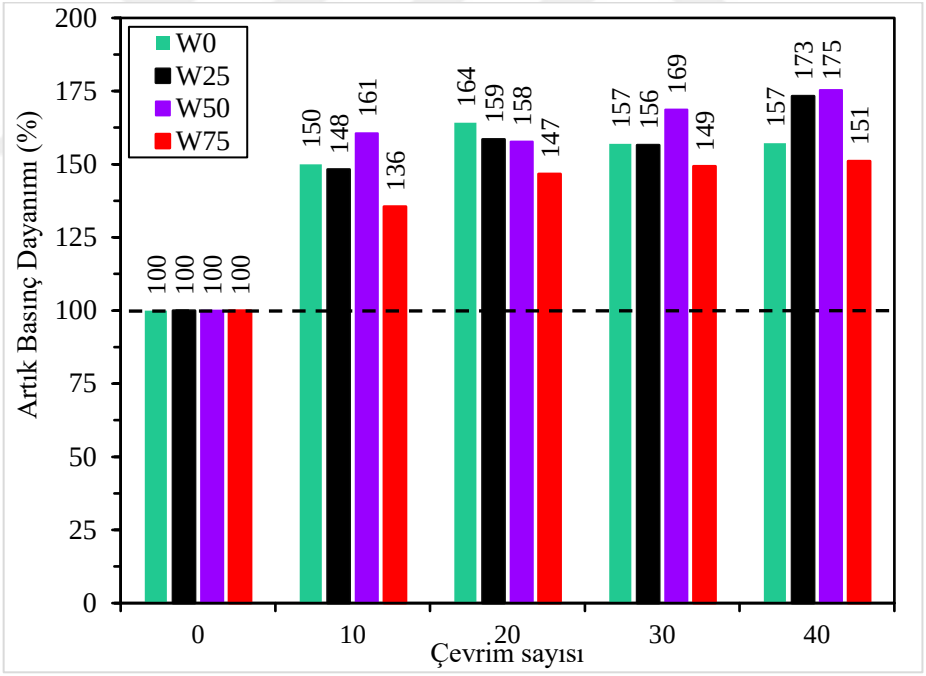
Kırkıncı I-K çevriminden sonra AAM numunelerinin kütle değişim değerleri %0,07 ila %1,10 arasında değişmektedir. AYÇ ikame oranındaki artış, I-K çevrimi sırasında AAM numunelerinin kütle değişimini de arttırmaktadır. Bunun nedeni, AYÇ içeren karışımların daha yüksek su emme özelliğine sahip olması ile açıklanabilir. En yüksek kütle değişim değerleri, tüm karışımlar için onuncu I-K çevriminden sonra gözlenmiştir. Bu durum, ilk on I-K çevrimi sırasında kütledeki önemli artışın numunelerin su emmesinin buharlaşmaya göre daha yüksek olduğunu göstermektedir.

AAM numunelerinin I-K çevrimlerine karşı dayanıklılığı, döngülerin bitiminden sonra çekilen fotoğraflarla da görsel olarak değerlendirilmiştir (Şekil 6.10). Görüntülerden de

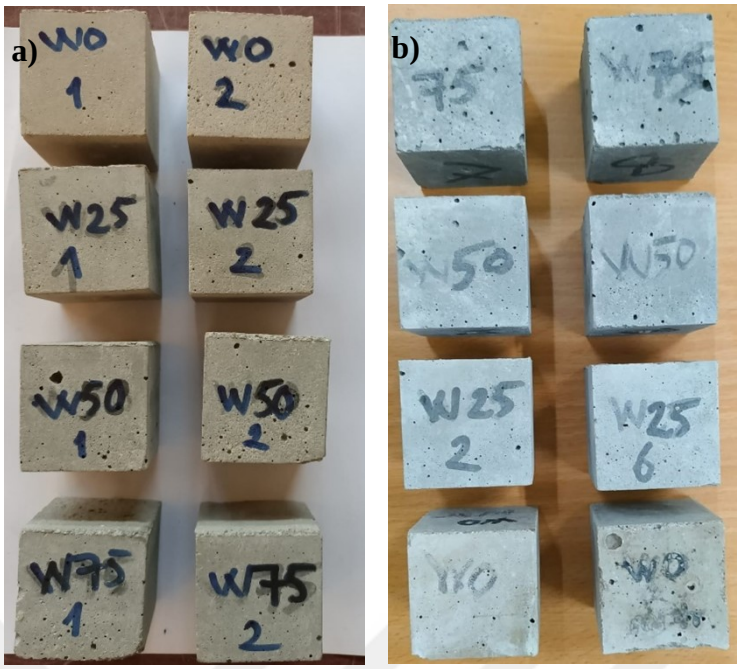
anlaşılacağı üzere, tüm AAM numuneleri, yüzeylerinde herhangi bir çatlak görünmeden yapısal bütünlüklerini çevrim sonuna kadar korumuştur.



Şekil 6.8 I-K çevriminin a) basınç dayanımına b) kütle kaybına etkisi



Şekil 6.9 AAM numunelerinin I-K çevrimindeki artık basınç dayanımı değerleri

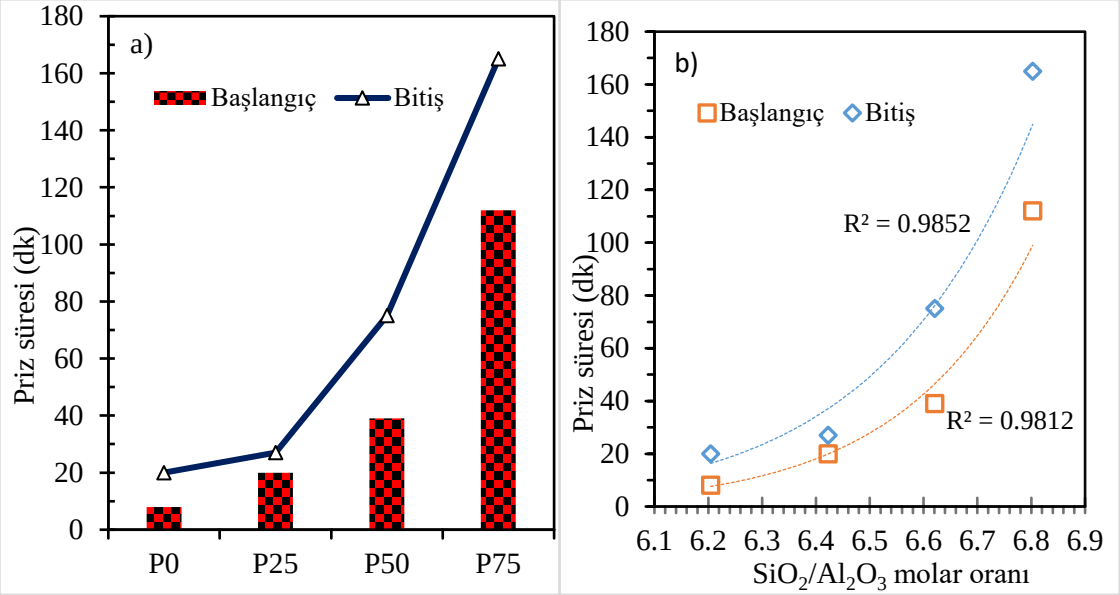


Şekil 6.10 AAM numunelerinin (a) I-K çevriminden önceki ve (b) 40.çevrimdeki görüntüleri

6.1.7 AAP Numunelerinin Priz Süresi Tayini

Şekil 6.11'de, AYÇ'nin farklı oranlarda GYFC ile ikamesinin ve SiO_2/Al_2O_3 oranının AAP karışımlarında priz sürelerine olan etkisi görülmektedir. AAP numunelerinin priz başlangıç süresi 8 ila 112 dakika arasında değişirken, priz bitiş süresi 20 ila 165 dakika arasında değişmektedir. %25 oranda AYÇ kullanılan numune ile %0 AYÇ içeren referans karışım (P0) karşılaştırıldığında, başlangıç ve bitiş priz sürelerinin sırasıyla 12 ve 7 dakika uzadığı görülmektedir. AYÇ'nin %75 oranında kullanım durumunda ise, referans karışımla kıyaslandığında, başlangıç ve bitiş priz sürelerinin sırasıyla yaklaşık 14 ve 8 kata kadar arttığı tespit edilmiştir. Şekil 6.11b'de gösterildiği gibi, priz süreleri ile SiO_2/Al_2O_3 molar oranı arasında güçlü bir korelasyon vardır. Priz süresindeki artış, artan AYÇ içeriği ile karışımların SiO_2/Al_2O_3 molar oranındaki artışa bağlanabilir [177]. Ayrıca, AYÇ'nin ikame edilmesiyle priz süresinin artışındaki bir diğer sebep, çözünür kalsiyum içeren fazlardaki azalmaya bağlı olarak kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) gibi reaksiyon jellerinin daha yavaş sentezlenmesi ile açıklanabilir [146,177,178]. Sonuç olarak, referans karışımının (P0) başlangıç ve bitiş priz sürelerinin çok hızlı olduğu (sırasıyla 8 ve 20 dk) dikkate alınırsa, GYFC esaslı AAM'nin pratikte uygulanabilirliğini

arttırıp priz süresini ayarlamak için belirli oranda AYÇ kullanımının uygun olacağı düşünülmektedir.



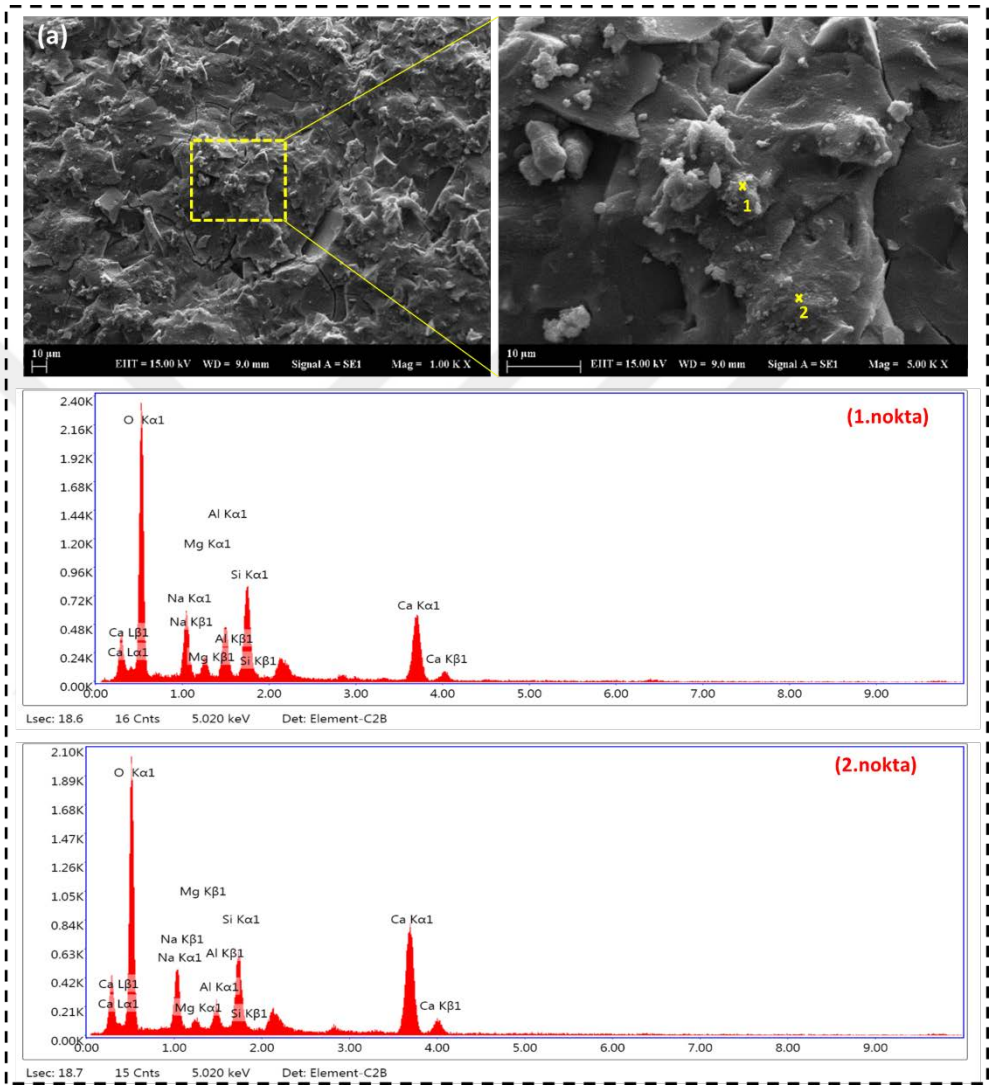
Şekil 6.11 a) Başlangıç ve bitiş priz süreleri ve b) başlangıç SiO_2/Al_2O_3 molar oranı ile AAP karışımlarının priz süreleri arasındaki ilişki

6.1.8 SEM-EDS Analizi

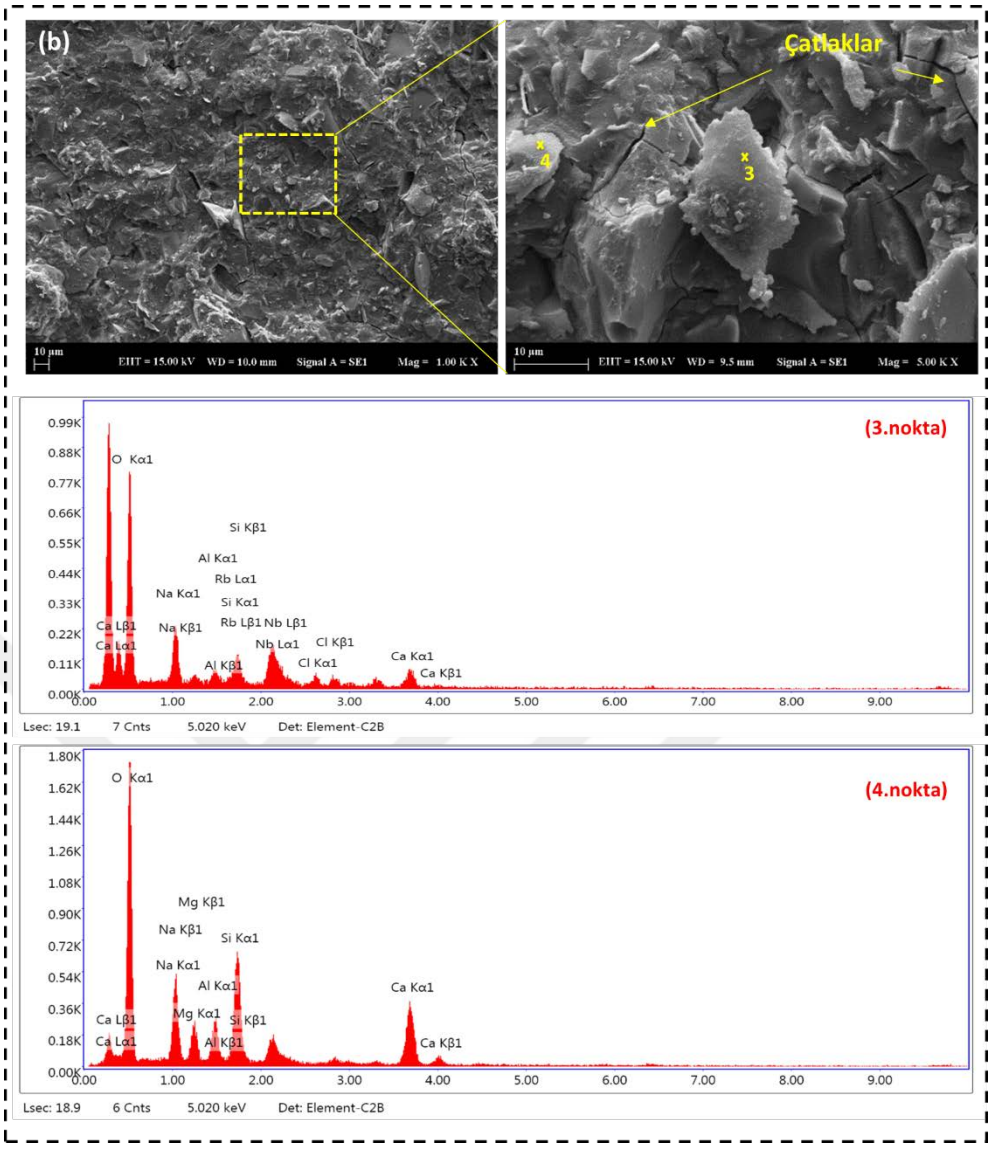
AYÇ'nin AAP numunelerinin iç yapı özelliklerine etkisi SEM-EDS analizi ile tayin edilmiştir. Şekil 6.12'de görüldüğü gibi AYÇ ikamesi ile matris morfolojisinin belirgin şekilde değiştiği söylenebilir. AYÇ'nin kullanılmadığı referans numunelerinde diğer numunelere kıyasla daha yoğun bir içyapı gözlenmiş, bu durumun bu seride daha yüksek basınç dayanımı sonucunun elde edilmesi ile uyumlu olduğu değerlendirilmiştir. AYÇ içeren hamur numunelerin matris fazında mikro çatlaklar gözlenmiş ve bu mikro çatlaklar, AYÇ ilavesi %25'in üzerine çıktıkça artmıştır. Matris fazda gözlenen mikro çatlaklar AYÇ içeren serilerin basınç dayanımındaki düşüşü ve yüksek su emme oranını doğrular niteliktedir.

EDS analizi sonuçları dikkate alındığında tüm hamur karışımlarında O, Si, Al, Ca ve Mg gibi elementlerin olduğu tespit edilmiştir. Referans numunesinin (P0) EDS spektrumları, matris içinde nispeten daha yüksek kalsiyum ve silikon elementine sahip C-S-H ve/veya C-A-S-H tipi jellerin varlığını ortaya koymaktadır. Literatürde, GYFC'nin NaOH ve Na_2SiO_3 ile aktive edildiğinde C-S-H ve/veya C-A-S-H jellerinin oluştuğuna dair benzer

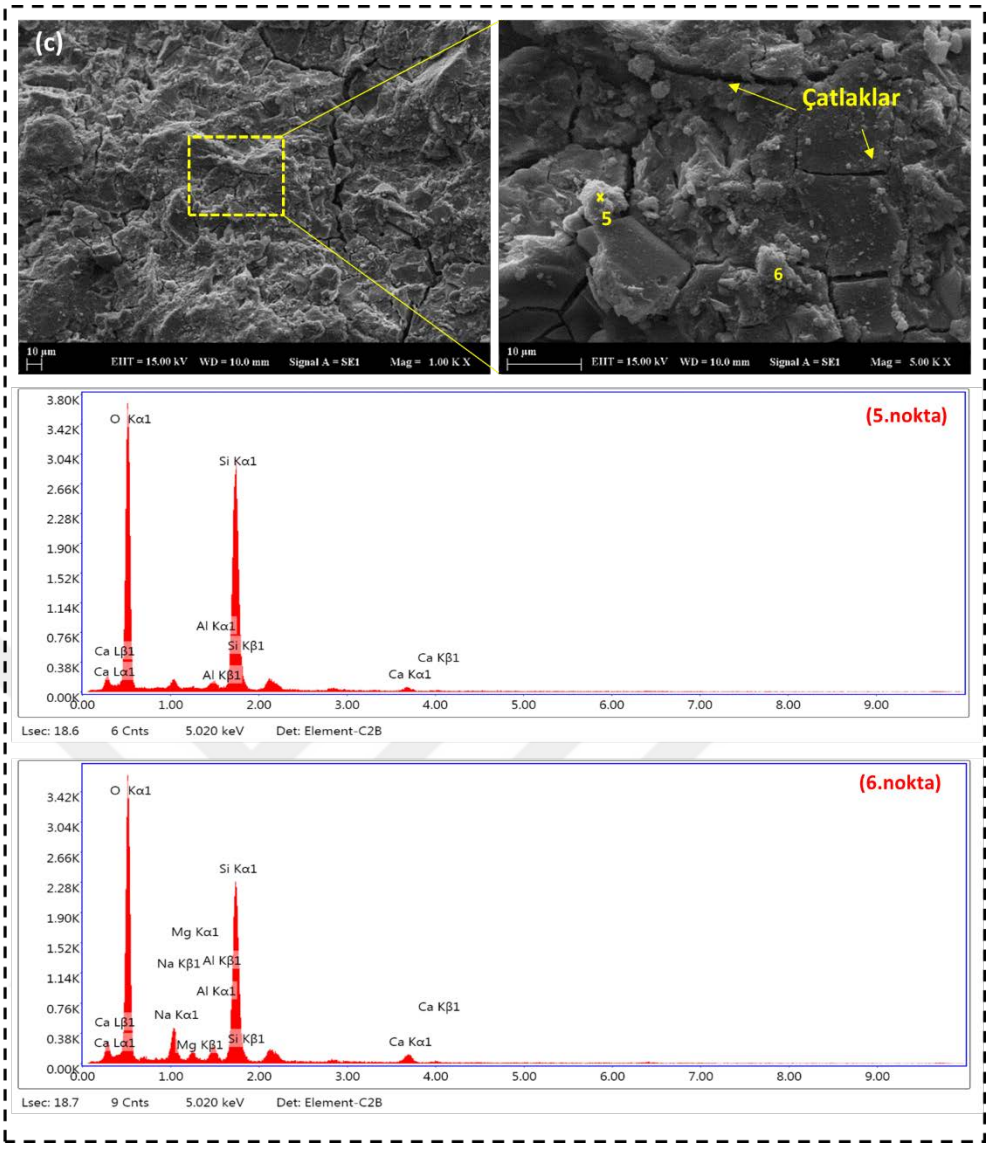
bulgulardan bahsedilmiştir [179–181]. Öte yandan, kalsiyum içeriği düşük olan AYÇ'nin kimyasal bileşimi dikkate alındığında, AYÇ miktarındaki artışın N-A-S-H-tipi jellerin oluşumuna yol açabileceği beklenmektedir. EDS sonuçları, nispeten daha yüksek miktarda silikon ve daha düşük kalsiyum içeriği ile N-A-S-H oluşumunu da desteklemektedir [75].



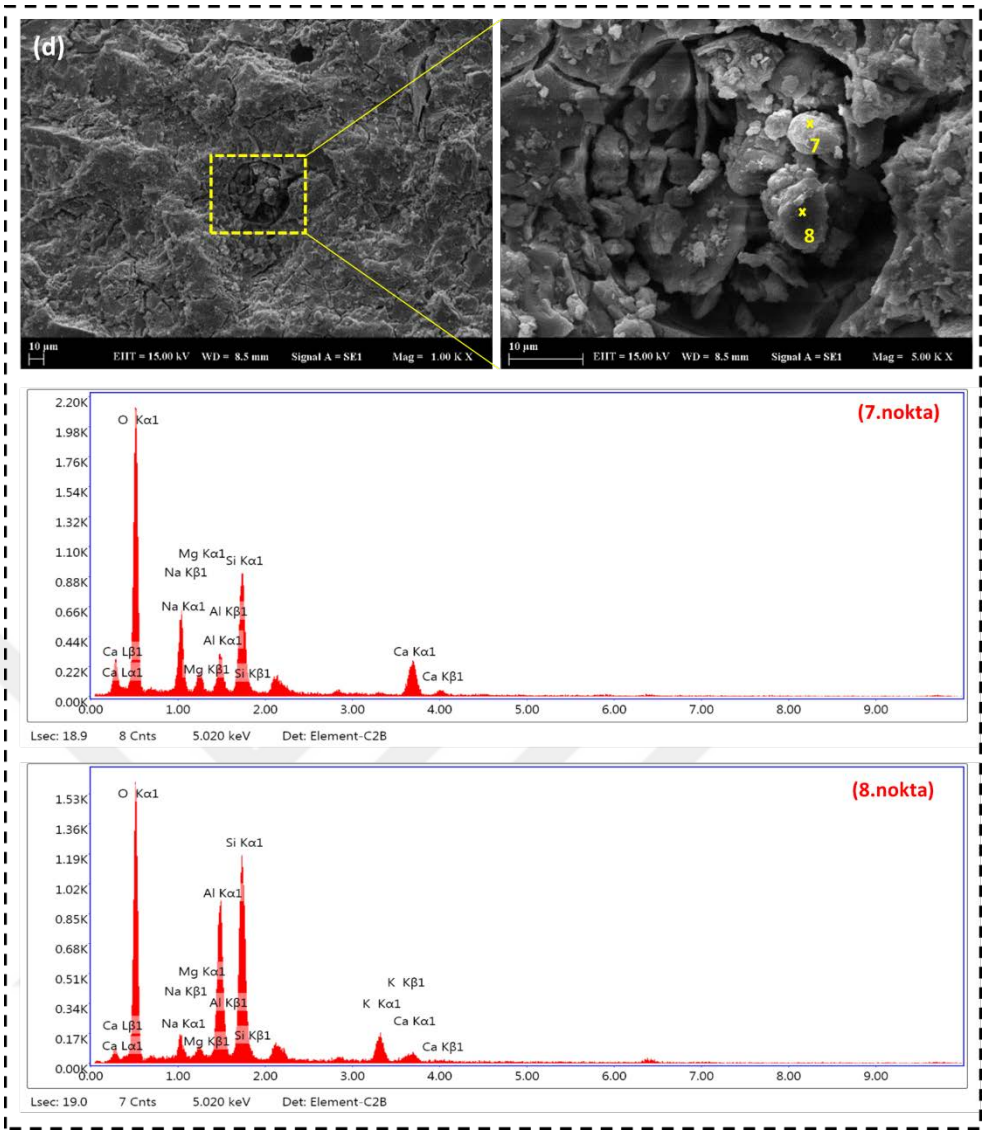
Şekil 6.12 SEM görüntüleri ve EDS sonuçları: a) P0, b) P25, c) P50, ve d) P75



Şekil 6.12 SEM görüntüleri ve EDS sonuçları: a) P0, b) P25, c) P50, ve d) P75 (devamı)

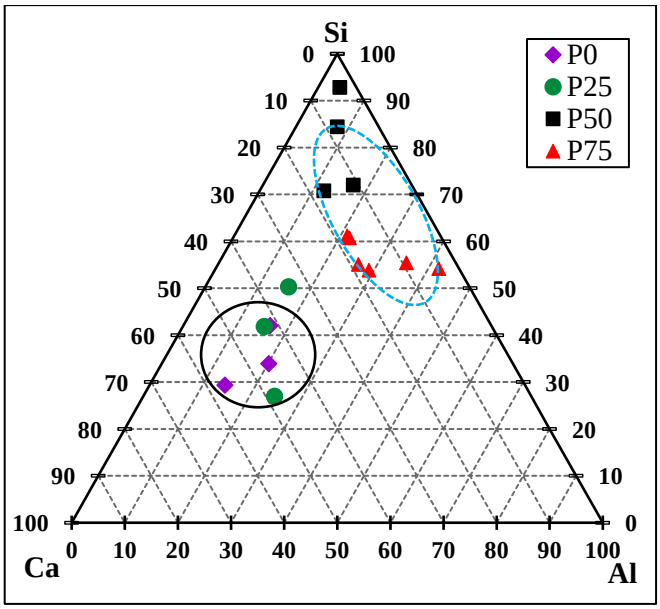


Şekil 6.12 SEM görüntüleri ve EDS sonuçları: a) P0, b) P25, c) P50, ve d) P75 (devamı)



Şekil 6.12 SEM görüntüleri ve EDS sonuçları: a) P0, b) P25, c) P50, ve d) P75 (devamı)

Şekil 6.13'te verilen üçlü faz diyagramı, EDS analizinden elde edilen AAP numunelerinin normalize edilmiş kalsiyum, alüminyum ve silikon içeriklerini göstermektedir. GYFC/AYÇ oranlarındaki değişiklikle birlikte jel bileşimindeki değişim farklı renklerle işaretlenmiştir. Siyah daire ile gösterilen bölüm C-A-S-H jelini, kesikli mavi daire ile gösterilen bölüm ise N-A-S-H jelini [182] temsil etmekte olup bu reaksiyon ürünlerinin alkali-aktive sistemde kullanılan bağlayıcının kimyasal bileşimine bağlı olarak değiştiğini de göstermektedir.

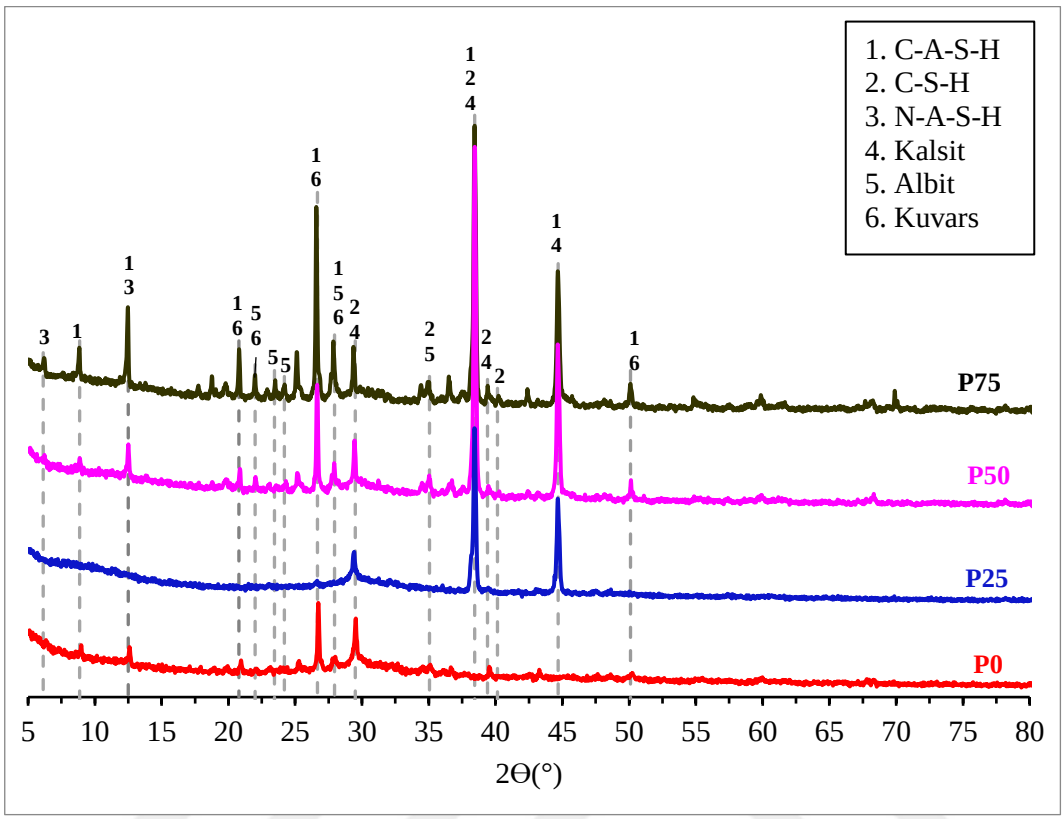


Şekil 6.13 AAP numunelerinin üçlü faz diyagramı

6.1.9 XRD Analizi

AAP numunelerinin mineralojik yapısı, Şekil 6.14'te gösterildiği gibi XRD analizi kullanılarak belirlenmiştir. Ana fazların kalsiyum silikat hidrat (C-S-H, #PDF 01-072-1864) ve kalsiyum alüminosilikat hidrat (C-A-S-H, #PDF 00-020-0452) benzer fazlar olduğu, ayrıca AYÇ içeren numunelerin hepsinde sodyum alüminosilikat hidrat (N-A-S-H, #PDF 01-083-2319) benzeri fazlara rastlandığı görülmüştür. Daha düşük miktarda AYÇ içeren numunelerde ise, 25°- 40° (2Θ°) aralığında geniş bir tümsek tespit edilmiştir. Ayrıca, AAP numunelerinde gözlenen kuvars (SiO_2), kalsit ve albit pikleri bağlayıcı olarak kullanılan malzemelerin tam olarak reaksiyonlara katılmadığını göstermektedir. Kuvars piki özellikle %50 ve %75 AYÇ içeren numunelerde 20,8°, 22,0°, 27,9° ve 50,1° (2Θ°) civarında tespit edilmiş ve kuvars pikinin yoğunluğu, GYFC oranı arttıkça önemli ölçüde azalmıştır. Bu durum, AYÇ oranındaki artış ile görülen dayanımdaki azalmayı açıklamaktadır. Literatürde bu durum yüksek miktardaki GYFC'nin, daha yüksek alkali-aktivasyon göstermesi ile ilişkilendirilmiştir [183]. Daha yüksek miktarda AYÇ içeren AAP numunelerinde ise, yaklaşık 12,5°'de kalsiyum ve sodyum alüminosilikat benzeri jeller (C-A-S-H ve N-A-S-H) gözlenmiştir. Ek olarak, yüksek AYÇ oranı, daha yüksek bir kristalleşme derecesine sebep olurken P0 ve P25 numuneleri, diğerlerine kıyasla daha

amorf yapı sergilemiştir. P0 ve P25 için amorf fazlar, P50 ve P75'e kıyasla daha yüksek reaktiviteye [184] ve dolayısıyla daha yüksek dayanıma sahip olduklarını göstermektedir.



Şekil 6.14 AAP numunelerinin XRD desenleri

7
SONUÇ VE ÖNERİLER

Endüstriyel bir atık olan AYÇ'nin öncelikle puzolanik aktivitesinin araştırılıp daha sonra alkali ile aktifleştirilmiş sistemlerde öncü malzeme olarak kullanımını amaçlayan çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda özetlenmektedir:

DAİ değerlerine göre AYÇ20'nin 7 ve 90. gün değerleri %75'in üzerinde kalmaktadır. Isıl işleme maruz kalan AYÇ (AYÇ700) ise tüm deney günlerinde DAİ, sınır değerin üzerinde bulunmuştur. Bu sonuca göre atık malzeme sınıfında olan AYÇ'nin, sıcaklık etkisi ile puzolanik aktivitesinin arttığı söylenebilir.

TS 25'e göre üretilen kireç harçların dayanım sonuçları sınır değer olan 4.0 MPa'a ulaşmamasına rağmen ilgili deney sonucuna göre AYÇ700'ün puzolanik aktivitesinin AYÇ20'ye göre yaklaşık %50 arttığı görülmüştür.

Frattini deney sonuçlarına göre hem AYÇ20 hem de AYÇ700'ün [CaO] konsantrasyonunun referans eğrisinin altında kaldığı belirlenmiştir. Bu sonuca göre kalsiyum hidroksitin AYÇ tarafından tüketilip puzolanik özellik gösterdiğini söylenebilir.

Frattini deneyine ek olarak numunelerin puzolanik aktivitesi TG/DTA analizi ile zamana göre $Ca(OH)_2$ içeriği izlenerek de değerlendirilmiştir. AYÇ700 karışımında, hidratasyon yaşına bakılmaksızın en düşük CH miktarı elde edilmiş olup bu durum daha yüksek CH tüketimini ve puzolanik aktiviteye sahip olduğunu göstermektedir.

Yarı adyabatik kalorimetri deney sonucuna göre AYÇ ilavesi numunenin hidratasyon sürecinde maksimum sıcaklığa erişme süresini etkilememiştir. Bu sonuç, aynı numunelere uygulanan priz süresi tayini deneyi ile de uyumludur.

Puzolanik aktivite deneyinde kullanılan numunelerde gerçekleştirilen SEM analizinde AYÇ20 karışımında etrenjit tespit edilmiş, bu durum AYÇ20'nin mukavemet gelişiminin AYÇ700'e göre neden daha yavaş olduğunu açıklamaktadır.

28 gün kürlenen numunelerin XRD analizinde tüm serilerdeki ana fazın portlandit olduğu görülmektedir. Bu durum TG/DTA analizinde belirlenen portlandit miktarları ile benzer

bir eğilim göstermektedir. Ayrıca, AYÇ'nin ilave edilmesi, daha amorf fazların oluşmasına katkıda bulunmuştur.

AYÇ'nin alkali ile aktive edilerek kullanılması sonucu, AYÇ oranındaki artış ile harç numunelerin priz süresinin, su emiliminin, boşluk içeriğinin ve sorptivitesinin de arttığı tespit edilmiştir.

Harç numunelerin basınç dayanımı, AYÇ oranındaki artışla sürekli olarak azalma göstermiştir. Ancak %25 AYÇ içeren AAM numuneleri, TS-EN 197-1 standardına bağlı olarak CEM I 42,5 R tipi çimentonun sınır basınç dayanımı değerlerini sağlamıştır.

Islanma-kuruma döngüsü deney sonuçları ise, tüm AAM numunelerinin yapısal bütünlüğünü koruduğunu ve referans numunelere kıyasla basınç dayanımlarının arttığını göstermiştir. Ayrıca, AYÇ'nin eklenmesi, ıslanma-kuruma döngülerinden sonra AAM numunelerinin artık basınç dayanımı değerlerini de olumlu bir şekilde artırmıştır.

AAM numunelerinin kuruma rötresi ve kütle kaybı, AYÇ oranının artmasıyla artmıştır. Arşimet deneyi sonucuna göre daha yüksek GYFC içeriği, harç numunelerinde daha düşük kılcal gözenek hacminin ve daha yüksek jel gözenek hacminin oluşmasına neden olmuştur. Ayrıca, kuruma rötresi ile hem kılcal gözenek hacmi hem de jel gözenek hacmi arasında güçlü korelasyonlar kurulmuştur.

XRD ve SEM-EDS analizleri, %100 GYFC içeren alkali-aktive serilerde ağırlıklı olarak C-A-S-H benzeri jellerin oluştuğunu, AYÇ içeriğindeki artışın ise N-A-S-H benzeri jellerin oluşumuna neden olduğunu göstermektedir. Bu farklılığa sebep olarak AYÇ oranının artması ile Ca^{+} miktarının azalması söylenebilir.

Deneysel çalışmalar, GYFC'nin hızlı priz alma özelliğinin, uygun miktarda AYÇ ilavesiyle ayarlanabileceğini de ortaya koymaktadır. Ayrıca, ıslanma-kuruma döngülerinden sonra daha yüksek bulunan artık basınç dayanımı sonuçlarına göre, AYÇ'nin dahil edilmesinin harcın dayanıklılığını artırabileceğini ve böylece daha çevreci olan bu malzemenin sıcak ve nemli iklimlerde kullanılmasının mümkün olabileceği söylenebilir.

Bu çalışmada malzemenin durabilite özelliklerinin araştırılması kılcal su emme, kuruma rötresi ve ıslanma kuruma ile sınırlı olup bir sonraki adım olarak uzun dönem

karbonatlaşma, agresif ortamlara karşı direnci ve donma-çözünme performansı da değerlendirilebilir.

Çalışmanın sürdürülebilirliği açısından farklı agrega ocaklarından da AYÇ temin edip, aynı fiziksel, mekanik ve durabilite çalışmaları yapılarak malzemenin sektörde de kullanımı açısından bir veri tabanı oluşturulması sağlanabilir.

AYÇ'nin beton yapımında bağlayıcı olarak kullanılmasının sürdürülebilir ve çevreci bir yaklaşım olduğuna dair sektörle iş birliği yapılıp bilgilendirici etkinlikler yapılabilir.

KAYNAKÇA

[1] A.E. Orhan, Çimento Üretiminden Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonlarının Hesaplanması, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 2018.

[2] A. Schaller, S. Kaufmann, Sustainability Report 2017, Düsseldorf, n.d. https://www.responsibilityreports.com/HostedData/ResponsibilityReportArchive/h/OTC_HENKY_2017.pdf (accessed March 10, 2023).

[3] Cement: production ranking top countries 2020, (2022). https://www.statista.com/statistics/267364/world-cement-production-by-country/ (accessed March 10, 2022).

[4] M. Nodehi, V.M. Taghvaee, Alkali-activated materials and geopolymer: A review of common precursors and activators addressing circular economy, Circular Economy and Sustainability. 2 (2022) 165–196.

[5] B.C. McLellan, R.P. Williams, J. Lay, A. Van Riessen, G.D. Corder, Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement, J Clean Prod. 19 (2011) 1080–1090. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010.

[6] A.O. Purdon, The action of alkalis on blast-furnace slag, Journal of the Society of Chemical Industry. 59 (1940) 191–202.

[7] J. Davidovits, Geopolymer Chemistry and Applications. 5-th edition, J. Davidovits.–Saint-Quentin, France. 5 (2020).

[8] J. Davidovits, Geopolymers: inorganic polymeric new materials, J Therm Anal Calorim. 37 (1991) 1633–1656.

[9] L. Vickers, A. Van Riessen, W.D.A. Rickard, Fire-resistant geopolymers: role of fibres and fillers to enhance thermal properties, Springer, 2015.

[10] B. Singh, G. Ishwarya, M. Gupta, S.K. Bhattacharyya, Geopolymer concrete: A review of some recent developments, Constr Build Mater. 85 (2015) 78–90.

[11] P. Rovnaník, Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer, Constr Build Mater. 24 (2010) 1176–1183.

[12] M.F. Nurruddin, H. Sani, B.S. Mohammed, I. Shaaban, Methods of curing geopolymer concrete: A review, International Journal of Advanced and Applied Sciences. 5 (2018) 31–36.

[13] F.G.M. Aredes, T.M.B. Campos, J.P.B. Machado, K.K. Sakane, G.P. Thim, D.D. Brunelli, Effect of cure temperature on the formation of metakaolinite-based geopolymer, Ceram Int. 41 (2015) 7302–7311.

[14] J.L. Provis, J.S.J. Van Deventer, Alkali activated materials: state-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM, Springer Science & Business Media, 2013.

[15] G. Fang, W.K. Ho, W. Tu, M. Zhang, Workability and mechanical properties of alkali-activated fly ash-slag concrete cured at ambient temperature, Constr Build Mater. 172 (2018) 476–487.

[16] H. Alanazi, J. Hu, Y.-R. Kim, Effect of slag, silica fume, and metakaolin on properties and performance of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature, Constr Build Mater. 197 (2019) 747–756.

[17] S.Y. Oderji, B. Chen, C. Shakya, M.R. Ahmad, S.F.A. Shah, Influence of superplasticizers and retarders on the workability and strength of one-part alkali-activated fly ash/slag binders cured at room temperature, Constr Build Mater. 229 (2019) 116891.

[18] S.F.A. Shah, B. Chen, S.Y. Oderji, M.A. Haque, M.R. Ahmad, Improvement of early strength of fly ash-slag based one-part alkali activated mortar, Constr Build Mater. 246 (2020) 118533.

[19] J.L. Provis, Alkali-activated materials, Cem Concr Res. 114 (2018) 40–48. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009.

[20] B. González-Corrochano, J. Alonso-Azcárate, L. Rodríguez, A.P. Lorenzo, M.F. Torío, J.J.T. Ramos, M.D. Corvinos, C. Muro, Valorization of washing aggregate sludge and sewage sludge for lightweight aggregates production, Constr Build Mater. 116 (2016) 252–262. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.04.095.

[21] B. González-Corrochano, J. Alonso-Azcárate, M. Rodas, Characterization of lightweight aggregates manufactured from washing aggregate sludge and fly ash,

Resour Conserv Recycl. 53 (2009) 571–581. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.04.008.

[22] H. Ozkan, N. Kabay, Manufacture of sintered aggregate using washing aggregate sludge and ground granulated blast furnace slag: Characterization of the aggregate and effects on concrete properties, Constr Build Mater. 342 (2022) 128025. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128025.

[23] E. Kłosek-Wawrzyn, A. Bugaj, Research on the possibility of using sludges from washing dolomite and limestone aggregates in the building ceramics technology, Gospodarka Surowcami Mineralnymi - Mineral Resources Management. 34 (2018) 65–82. https://doi.org/10.24425/122590.

[24] H. Özkan, N. Kabay, N. Miyan, Properties of Cold-Bonded and Sintered Aggregate Using Washing Aggregate Sludge and Their Incorporation in Concrete: A Promising Material, Sustainability 2022, Vol. 14, Page 4205. 14 (2022) 4205. https://doi.org/10.3390/SU14074205.

[25] R. Sokolar, S. Grygarova, Utilization of waste quarry washing sludge for the production of dry pressed ceramic bodies, Journal of the Ceramic Society of Japan. 121 (2013) 120–122. https://doi.org/10.2109/JCERSJ2.121.120.

[26] E. Kłosek-Wawrzyn, G. Łój, A. Bugaj, W. Wons, Waste sludge from washing dolomite aggregates as a raw material for brick production, Gospodarka Surowcami Mineralnymi. T. 35, z. 3 (2019) 37–48. https://doi.org/10.24425/GSM.2019.128532.

[27] Z. Xiaolong, Z. Shiyu, L. Hui, Z. Yingliang, Disposal of mine tailings via geopolymerization, J Clean Prod. 284 (2021). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124756.

[28] H. Xu, J.S.J. Van Deventer, Effect of source materials on geopolymerization, Ind Eng Chem Res. 42 (2003) 1698–1706. https://doi.org/10.1021/ie0206958.

[29] J. Singh, S.P. Singh, Geopolymerization of solid waste of non-ferrous metallurgy – A review, J Environ Manage. 251 (2019). https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109571.

[30] S. Singh, M.U. Aswath, R. V. Ranganath, Effect of mechanical activation of red mud on the strength of geopolymer binder, Constr Build Mater. 177 (2018) 91–101. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.05.096.

[31] A. Kumar, S. Kumar, Development of paving blocks from synergistic use of red mud and fly ash using geopolymerization, Constr Build Mater. 38 (2013) 865–871. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.013.

[32] S.Y. Kim, Y. Jun, D. Jeon, J.E. Oh, Synthesis of structural binder for red brick production based on red mud and fly ash activated using Ca(OH)2 and Na2CO3, Constr Build Mater. 147 (2017) 101–116. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.04.171.

[33] D.D. Dimas, I.P. Giannopoulou, D. Panias, UTILIZATION OF ALUMINA RED MUD FOR SYNTHESIS OF INORGANIC POLYMERIC MATERIALS, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 30 (2009) 211–239. https://doi.org/10.1080/08827500802498199.

[34] P.N. Lemougna, K. tuo Wang, Q. Tang, X. min Cui, Study on the development of inorganic polymers from red mud and slag system: Application in mortar and lightweight materials, Constr Build Mater. 156 (2017) 486–495. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.015.

[35] P. Krivenko, O. Kovalchuk, A. Pasko, T. Croymans, M. Hult, G. Lutter, N. Vandevenne, S. Schreurs, W. Schroeyers, Development of alkali activated cements and concrete mixture design with high volumes of red mud, Constr Build Mater. 151 (2017) 819–826. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.031.

[36] S. Ahmari, L. Zhang, J. Zhang, Effects of activator type/concentration and curing temperature on alkali-activated binder based on copper mine tailings, J Mater Sci. 47 (2012) 5933–5945. https://doi.org/10.1007/s10853-012-6497-9.

[37] T. Yang, X. Yao, Z. Zhang, Geopolymer prepared with high-magnesium nickel slag: Characterization of properties and microstructure, Constr Build Mater. 59 (2014) 188–194. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.038.

[38] Z. Zhang, Y. Zhu, T. Yang, L. Li, H. Zhu, H. Wang, Conversion of local industrial wastes into greener cement through geopolymer technology: A case study of high-

magnesium nickel slag, J Clean Prod. 141 (2017) 463–471. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.147.

[39] I. Capasso, B. Liguori, C. Ferone, D. Caputo, R. Cioffi, Strategies for the valorization of soil waste by geopolymer production: An overview, J Clean Prod. 288 (2021). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125646.

[40] G. Kürklü, G. Görhan, Investigation of usability of quarry dust waste in fly ash-based geopolymer adhesive mortar production, Constr Build Mater. 217 (2019) 498–506. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.104.

[41] E. Aprianti, P. Shafigh, S. Bahri, J.N. Farahani, Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes - A review, Constr Build Mater. 74 (2015) 176–187. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.010.

[42] X. Guo, H. Shi, W.A. Dick, Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer, Cem Concr Compos. 32 (2010) 142–147. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.003.

[43] Z. Yunsheng, S. Wei, L. Zongjin, Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement, Appl Clay Sci. 47 (2010) 271–275. https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.11.002.

[44] A. Elimbi, H.K. Tchakoute, D. Njopwouo, Effects of calcination temperature of kaolinite clays on the properties of geopolymer cements, Constr Build Mater. 25 (2011) 2805–2812. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.055.

[45] A. Bagheri, A. Nazari, J.G. Sanjayan, P. Rajeev, Alkali activated materials vs geopolymers: Role of boron as an eco-friendly replacement, Constr Build Mater. 146 (2017) 297–302. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.137.

[46] H. Xu, J.S.J. Van Deventer, The geopolymerisation of alumino-silicate minerals, Int J Miner Process. 59 (2000) 247–266. https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00074-5.

[47] J. Dietel, L.N. Warr, M. Bertmer, A. Steudel, G.H. Grathoff, K. Emmerich, The importance of specific surface area in the geopolymerization of heated illitic clay, Appl Clay Sci. 139 (2017) 99–107. https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.01.001.

[48] G. Kastiukas, X. Zhou, J. Castro-Gomes, Preparation Conditions for the Synthesis of Alkali-Activated Binders Using Tungsten Mining Waste, Journal of Materials in Civil Engineering. 29 (2017) 04017181. https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002029.

[49] M.W. Gitari, S.A. Akinyemi, R. Thobakgale, P.C. Ngoejana, L. Ramugondo, M. Matidza, S.E. Mhlongo, F.A. Dacosta, N. Nemapate, Physicochemical and mineralogical characterization of Musina mine copper and New Union gold mine tailings: Implications for fabrication of beneficial geopolymeric construction materials, Journal of African Earth Sciences. 137 (2018) 218–228. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.10.016.

[50] A. Singh, Remote sensing and GIS applications for municipal waste management, J Environ Manage. 243 (2019) 22–29. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.017.

[51] T. Narayana, Municipal solid waste management in India: From waste disposal to recovery of resources?, Waste Management. 29 (2009) 1163–1166. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.038.

[52] CEMBUREAU, Cementing the European Green Deal: Reaching Climate Neutrality along the Cement and Concrete Value Chain by 2050, Brussels. (2020). https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf (accessed August 26, 2022).

[53] A. Santamaría, A. García-Llona, V. Revilla-Cuesta, I. Piñero, V. Ortega-López, Bending tests on building beams containing electric arc furnace slag and alternative binders and manufactured with energy-saving placement techniques, Structures. 32 (2021) 1921–1933. https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2021.04.003.

[54] M. Amran, A. Al-Fakih, S.H. Chu, R. Fediuk, S. Haruna, A. Azevedo, N. Vatin, Long-term durability properties of geopolymer concrete: An in-depth review, Case Studies in Construction Materials. 15 (2021) e00661. https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2021.E00661.

[55] W. Zhang, X. Liu, Z. Zhang, Y. Li, J. Gu, Y. Wang, Y. Xue, Circulating fluidized bed fly ash-blast furnace slag based cementitious materials: Hydration behaviors

and performance, Constr Build Mater. 342 (2022) 128006. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128006.

[56] H. Mehdizadeh, X. Cheng, K.H. Mo, T.C. Ling, Upcycling of waste hydrated cement paste containing high-volume supplementary cementitious materials via CO2 pre-treatment, Journal of Building Engineering. 52 (2022) 104396. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104396.

[57] M. Carsana, M. Frassoni, L. Bertolini, Comparison of ground waste glass with other supplementary cementitious materials, Cem Concr Compos. 45 (2014) 39–45. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.005.

[58] C. Yang, C. Cui, J. Qin, X. Cui, Characteristics of the fired bricks with low-silicon iron tailings, Constr Build Mater. 70 (2014) 36–42. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.07.075.

[59] L. Weishi, L. Guoyuan, X. Ya, H. Qifei, The properties and formation mechanisms of eco-friendly brick building materials fabricated from low-silicon iron ore tailings, (2018). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.309.

[60] L.G.G. de Godoy, A.B. Rohden, M.R. Garcez, S. Da Dalt, L. Bonan Gomes, Production of supplementary cementitious material as a sustainable management strategy for water treatment sludge waste, Case Studies in Construction Materials. 12 (2020). https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00329.

[61] H.S. Ryu, D.M. Kim, S.H. Shin, W.K. Kim, S.M. Lim, W.J. Park, Properties of cement mortar using limestone sludge powder modified with recycled acetic acid, Sustainability (Switzerland). 11 (2019) 1–10. https://doi.org/10.3390/su11030879.

[62] J.E. Halliday, M.R. Jones, T.D. Dyer, K.D. Ravindra, Potential use of UK sewage sludge ash in cement-based concrete, Proceedings of Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management. 165 (2012) 57–66. https://doi.org/10.1680/warm.2012.165.2.57.

[63] D.S. Ing, S.C. Chin, T.K. Guan, A. Suil, The use of sewage sludge ash (SSA) as partial replacement of cement in concrete, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 11 (2016) 3771–3775.

[64] A. Souri, H. Kazemi-Kamyab, R. Snellings, R. Naghizadeh, F. Golestani-Fard, K. Scrivener, Pozzolanic activity of mechanochemically and thermally activated kaolins in cement, Cem Concr Res. 77 (2015) 47–59. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.017.

[65] B. Ilić, V. Radonjanin, M. Malešev, M. Zdujić, A. Mitrović, Effects of mechanical and thermal activation on pozzolanic activity of kaolin containing mica, Appl Clay Sci. 123 (2016) 173–181. https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.01.029.

[66] S. Cheng, K. Ge, T. Sun, Z. Shui, X. Chen, J.X. Lu, Pozzolanic activity of mechanochemically and thermally activated coal-series kaolin in cement-based materials, Constr Build Mater. 299 (2021) 123972. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123972.

[67] A. Bahhou, Y. Taha, Y. El Khessaimi, R. Hakkou, A. Tagnit-Hamou, M. Benzaazoua, Using Calcined Marls as Non-Common Supplementary Cementitious Materials—A Critical Review, Minerals 2021, Vol. 11, Page 517. 11 (2021) 517. https://doi.org/10.3390/MIN11050517.

[68] Y. Li, Q. Yuan, J. Li, Calcined Cutter Soil Mixing Residue-Based Alkali-Activated Cement: Compressive Strengths, Reaction Products, and Sustainability, ACS Sustain Chem Eng. 10 (2022) 288–304. https://doi.org/10.1021/ACSSUSCHEMENG.1C06194/ASSET/IMAGES/LARGE/SC1C06194_0015.JPEG.

[69] C. Sgarlata, A. Formia, C. Siligardi, F. Ferrari, C. Leonelli, Mine Clay Washing Residues as a Source for Alkali-Activated Binders, Materials 2022, Vol. 15, Page 83. 15 (2021) 83. https://doi.org/10.3390/MA15010083.

[70] H. Yanguatin, J.H. Ramírez, A. Tironi, J.I. Tobón, Effect of thermal treatment on pozzolanic activity of excavated waste clays, Constr Build Mater. 211 (2019) 814–823. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.03.300.

[71] M.A. Tantawy, A.M. El-Roudi, E.M. Abdalla, M.A. Abdelzaher, Evaluation of the Pozzolanic Activity of Sewage Sludge Ash, ISRN Chemical Engineering. 2012 (2012) 1–8. https://doi.org/10.5402/2012/487037.

[72] G. du Toit, E.M. van der Merwe, R.A. Kruger, J.M. McDonald, E.P. Kearsley, Characterisation of the hydration products of a chemically and mechanically activated high coal fly ash hybrid cement, Minerals. 12 (2022) 157.

[73] C.-K. Ma, A.Z. Awang, W. Omar, Structural and material performance of geopolymer concrete: A review, Constr Build Mater. 186 (2018) 90–102. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.111.

[74] J. Davidovits, Mineral Polymers and Methods of Making Them/United States Patent: 4,349,386, (1982).

[75] M. Ibrahim, M. Maslehuddin, An overview of factors influencing the properties of alkali-activated binders, J Clean Prod. 286 (2021) 124972. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124972.

[76] I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernández-Jiménez, An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders, in: Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes, Elsevier, 2015: pp. 19–47. https://doi.org/10.1533/9781782422884.1.19.

[77] A. Fernández-Jiménez, N. Cristelo, T. Miranda, Á. Palomo, Sustainable alkali activated materials: Precursor and activator derived from industrial wastes, J Clean Prod. 162 (2017) 1200–1209. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.151.

[78] J.L. Provis, A. Palomo, C. Shi, Advances in understanding alkali-activated materials, Cem Concr Res. 78 (2015) 110–125. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.013.

[79] T. Luukkonen, Z. Abdollahnejad, J. Yliniemi, P. Kinnunen, M. Illikainen, One-part alkali-activated materials: A review, Cem Concr Res. 103 (2018) 21–34. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.001.

[80] J. Davidovits, M. Davidovics, N. Davidovits, Geopolymeric fluoro-alumino-silicate binder and process for obtaining it, (1994).

[81] H. Xu, J.S.J. Van Deventer, The geopolymerisation of alumino-silicate minerals, Int J Miner Process. 59 (2000) 247–266.

[82] J. Davidovits, Geopolymers: inorganic polymeric new materials, J Therm Anal Calorim. 37 (1991) 1633–1656.

[83] J. Davidovits, Geopolymers and geopolymeric materials, Journal of Thermal Analysis. 35 (1989) 429–441.

[84] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J.L. Provis, G.C. Lukey, A. Palomo, J.S.J. van Deventer, Geopolymer technology: the current state of the art, J Mater Sci. 42 (2007) 2917–2933.

[85] C.-Y. Shew, T. Iwaki, Modelling of the inhomogeneous interior of polymer gels, Journal of Physics: Condensed Matter. 18 (2006) 3549. https://doi.org/10.1088/0953-8984/18/15/003.

[86] P. Duxson, J.L. Provis, G.C. Lukey, S.W. Mallicoat, W.M. Kriven, J.S.J. Van Deventer, Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties, Colloids Surf A Physicochem Eng Asp. 269 (2005) 47–58.

[87] L.N. Tchadjie, S.O. Ekolu, Enhancing the reactivity of aluminosilicate materials toward geopolymer synthesis, J Mater Sci. 53 (2018) 4709–4733. https://doi.org/10.1007/s10853-017-1907-7.

[88] A.E. Abubakr, A.M. Soliman, S.H. Diab, Effect of activator nature on the impact behaviour of Alkali-Activated slag mortar, Constr Build Mater. 257 (2020) 119531. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119531.

[89] S.F.A. Shah, B. Chen, S.Y. Oderji, M.A. Haque, M.R. Ahmad, Improvement of early strength of fly ash-slag based one-part alkali activated mortar, Constr Build Mater. 246 (2020) 118533. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118533.

[90] S.A. Bernal, J.L. Provis, Durability of alkali-activated materials: Progress and perspectives, Journal of the American Ceramic Society. 97 (2014) 997–1008. https://doi.org/10.1111/jace.12831.

[91] Y. Fu, L. Cai, W. Yonggen, Freeze–thaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete, Constr Build Mater. 25 (2011) 3144–3148. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.006.

[92] E. Gomaa, S. Sargon, C. Kashosi, A. Gheni, M.A. Elgawady, Mechanical Properties of High Early Strength Class C Fly Ash-Based Alkali Activated Concrete, 2674 (2020) 430–443. https://doi.org/10.1177/0361198120915892.

[93] A.B. Pascual, T.M. Tognonvi, A. Tagnit-Hamou, Optimization study of waste glass powder-based alkali activated materials incorporating metakaolin: Activation and curing conditions, J Clean Prod. 308 (2021) 127435. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127435.

[94] A.S.S.S. Nedunuri, S. Muhammad, Fundamental understanding of the setting behaviour of the alkali activated binders based on ground granulated blast furnace slag and fly ash, Constr Build Mater. 291 (2021) 123243. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123243.

[95] A. Alzaza, K. Ohenoja, M. Illikainen, One-part alkali-activated blast furnace slag for sustainable construction at subzero temperatures, Constr Build Mater. 276 (2021) 122026. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122026.

[96] J. Ren, L. Hu, Z. Dong, L. Tang, F. Xing, J. Liu, Effect of silica fume on the mechanical property and hydration characteristic of alkali-activated municipal solid waste incinerator (MSWI) fly ash, J Clean Prod. 295 (2021) 126317. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126317.

[97] A. Kumar, T.J. Saravanan, K. Bisht, K.I.S.A. Kabeer, A review on the utilization of red mud for the production of geopolymer and alkali activated concrete, Constr Build Mater. 302 (2021) 124170. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124170.

[98] L. Mengasini, M. Mavroulidou, M.J. Gunn, Alkali-activated concrete mixes with ground granulated blast furnace slag and paper sludge ash in seawater environments, Sustain Chem Pharm. 20 (2021) 100380. https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100380.

[99] S. Parathi, · Praveen Nagarajan, · Shashikala, A. Pallikkara, Ecofriendly geopolymer concrete: a comprehensive review, Clean Technol Environ Policy. 23 (2085) 1701–1713. https://doi.org/10.1007/s10098-021-02085-0.

[100] S. Ahmad, H.R. Khalid, A.A. Shaqraa, A.A. Bahraq, M. Maslehuddin, S.U. Al-Dulaijan, Properties of natural pozzolan-based geopolymer concrete: effects of natural pozzolan content, type of alkaline activator, and silicate/alkali ratio, European Journal of Environmental and Civil Engineering. (2022) 1–18.

[101] X. Liang, Y. Ji, Mechanical properties and permeability of red mud-blast furnace slag-based geopolymer concrete, SN Appl Sci. 3 (2021). https://doi.org/10.1007/s42452-020-03985-4.

[102] Y. Bai, W. Guo, X. Wang, H. Pan, Q. Zhao, D. Wang, Utilization of municipal solid waste incineration fly ash with red mud-carbide slag for eco-friendly geopolymer preparation, J Clean Prod. 340 (2022) 130820.

[103] Z. Sun, Q. Tang, B.S. Xakalashe, X. Fan, M. Gan, X. Chen, Z. Ji, X. Huang, B. Friedrich, Mechanical and environmental characteristics of red mud geopolymers, Constr Build Mater. 321 (2022) 125564.

[104] L. Qin, Q. Nie, H. Zhang, X. Jia, C. Zhang, Laboratory experimental study on red mud geopolymer used as road subgrade materials, in: E3S Web of Conferences, EDP Sciences, 2021: p. 02043.

[105] X. Zhao, C. Liu, L. Zuo, L. Wang, Q. Zhu, M. Wang, Investigation into the effect of calcium on the existence form of geopolymerized gel product of fly ash based geopolymers, Cem Concr Compos. 103 (2019) 279–292.

[106] X. Chen, J. Zhang, M. Lu, B. Chen, S. Gao, J. Bai, H. Zhang, Y. Yang, Study on the effect of calcium and sulfur content on the properties of fly ash based geopolymer, Constr Build Mater. 314 (2022) 125650.

[107] W. Chen, J. Li, Effects of Different Silicon Sources on the Properties of Geopolymer Planting Concrete Mixed with Red Mud, Sustainability. 15 (2023) 4427.

[108] L. Guo, Y. Wu, F. Xu, X. Song, J. Ye, P. Duan, Z. Zhang, Sulfate resistance of hybrid fiber reinforced metakaolin geopolymer composites, Compos B Eng. 183 (2020) 107689. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2019.107689.

[109] M. Luz, G. Ae, M.T. Blanco-Varela, A.S. Martínez-Ramírez, Alkali activation of metakaolins: parameters affecting mechanical, structural and microstructural properties, Journal of Material Science. 42 (2007) 2934–2943. https://doi.org/10.1007/s10853-006-0565-y.

[110] B. Zhang, K.J.D. MacKenzie, I.W.M. Brown, Crystalline phase formation in metakaolinite geopolymers activated with NaOH and sodium silicate, J Mater Sci. 44 (2009) 4668–4676. https://doi.org/10.1007/s10853-009-3715-1.

[111] C.R. Meesala, N.K. Verma, S. Kumar, Critical review on fly-ash based geopolymer concrete, Structural Concrete. 21 (2020) 1013–1028. https://doi.org/10.1002/suco.201900326.

[112] M. Sofi, J.S.J. van Deventer, P.A. Mendis, G.C. Lukey, Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs), Cem Concr Res. 37 (2007) 251–257. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.008.

[113] G. Görhan, G. Kürklü, The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures, Compos B Eng. 58 (2014) 371–377. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2013.10.082.

[114] E. Paul, Performance assessment of geopolymer concrete using various industrial wastes, Mater Today Proc. (2021). https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.660.

[115] S. Detphan, P. Chindaprasirt, Preparation of fly ash and rice husk ash geopolymer, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 16 (2009) 720–726. https://doi.org/10.1016/S1674-4799(10)60019-2.

[116] A. Nazari, J.G. Sanjayan, Synthesis of geopolymer from industrial wastes, J Clean Prod. 99 (2015) 297–304. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.03.003.

[117] T. Yang, X. Yao, Z. Zhang, Geopolymer prepared with high-magnesium nickel slag: characterization of properties and microstructure, Constr Build Mater. 59 (2014) 188–194.

[118] N. Ouffa, M. Benzaazoua, T. Belem, R. Trauchessec, A. Lecomte, Alkaline dissolution potential of aluminosilicate minerals for the geosynthesis of mine paste backfill, Mater Today Commun. 24 (2020). https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101221.

[119] T. Yang, X. Yao, Z. Zhang, Geopolymer prepared with high-magnesium nickel slag: characterization of properties and microstructure, Constr Build Mater. 59 (2014) 188–194.

[120] H. Ozkan, N. Kabay, Manufacture of sintered aggregate using washing aggregate sludge and ground granulated blast furnace slag: Characterization of the aggregate and effects on concrete properties, Constr Build Mater. 342 (2022) 128025. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128025.

[121] ASTM C311, Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete., 2005. https://doi.org/10.1520/C0311.

[122] ASTM C109, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or cube specimens), Pennsylvania, 2016. https://doi.org/10.1520/C0109.

[123] ASTM C618, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use, 2010. https://doi.org/10.1520/C0618-19.2.

[124] TS 25, Doğal puzolan (tras)-Çimento ve betonda kullanılan-Tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri, Ankara, 2008.

[125] British Standards Institution, Methods of testing cement. Part 5: Pozzolanicity test for pozzolanic cement, 2011.

[126] ASTM C191-19, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, 2019. https://doi.org/10.1520/C0191-19.

[127] ASTM C642-06, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, 2006. https://doi.org/10.1520/C0642-06.

[128] I. Ismail, S.A. Bernal, J.L. Provis, S. Hamdan, J.S.J. van Deventer, Drying-induced changes in the structure of alkali-activated pastes, J Mater Sci. 48 (2013) 3566–3577. https://doi.org/10.1007/s10853-013-7152-9.

[129] ASTM C1585, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, 2004. https://doi.org/10.1520/C1585-20.

[130] ASTM C596-01, Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement, 2001. https://doi.org/10.1520/C0596-01.

[131] T. Ishida, Y. Luan, T. Sagawa, T. Nawa, Modeling of early age behavior of blast furnace slag concrete based on micro-physical properties, Cem Concr Res. 41 (2011) 1357–1367. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.005.

[132] J.N. Yankwa Djobo, A. Elimbi, H. Kouamo Tchakouté, S. Kumar, Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars, Constr Build Mater. 124 (2016) 606–614. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.141.

[133] S. Kramar, V. Ducman, Evaluation of Ash Pozzolanic Activity by Means of the Strength Activity Index Test, Frattini Test and DTA/TG Analysis, Tehnički Vjesnik. 25 (2018) 1746–1752. https://doi.org/10.17559/TV-20171203193229.

[134] T. Li, G. Chen, J. Yang, L. Chong, X. Hu, Influence of curing conditions on mechanical properties and microstructure of magnesium potassium phosphate cement, Case Studies in Construction Materials. 17 (2022) e01264. https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01264.

[135] S. Puligilla, P. Mondal, Role of slag in microstructural development and hardening of fly ash-slag geopolymer, Cem Concr Res. 43 (2013) 70–80. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2012.10.004.

[136] X. Kang, H. Lei, Z. Xia, A comparative study of modified fall cone method and semi-adiabatic calorimetry for measurement of setting time of cement based materials, Constr Build Mater. 248 (2020) 118634. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118634.

[137] J.P. Sandberg, S. Liberman, Monitoring and Evaluation of Cement Hydration by Semi-Adiabatic Field Calorimetry, Special Publication. 241 (2007) 13–24. https://doi.org/10.14359/18648.

[138] V.T. Cost, A. Gardiner, Practical concrete mixture evaluation via semi-adiabatic calorimetry, in: NRMCA Technology Forum, 2009: p. 21.

[139] C. Nobouassia Bewa, L. Valentini, H. Kouamo Tchakouté, E. Kamseu, J.N. Yankwa Djobo, M.C. Dalconi, E. Garbin, G. Artioli, Reaction kinetics and microstructural characteristics of iron-rich-laterite-based phosphate binder, Constr Build Mater. 320 (2022) 126302. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.126302.

[140] S. K, B.B. Das, Pozzolanic reactivity and drying shrinkage characteristics of optimized blended cementitious composites comprising of Nano-Silica particles, Constr Build Mater. 316 (2022) 125796. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125796.

[141] K. Snehal, B.B. Das, S. Kumar, Influence of Integration of Phase Change Materials on Hydration and Microstructure Properties of Nanosilica Admixed Cementitious Mortar, Journal of Materials in Civil Engineering. 32 (2020) 04020108. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003178.

[142] K. Snehal, B.B. Das, M. Akanksha, Early age, hydration, mechanical and microstructure properties of nano-silica blended cementitious composites, Constr Build Mater. 233 (2020) 117212. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117212.

[143] K. Snehal, B.B. Das, Effect of phase-change materials on the hydration and mineralogy of cement mortar, Https://Doi.Org/10.1680/Jcoma.20.00045. (2020). https://doi.org/10.1680/JCOMA.20.00045.

[144] I. Tole, F. Delogu, E. Qoku, K. Habermehl-Cwirzen, A. Cwirzen, Enhancing the pozzolanic activity of three natural clays from Sweden by mechanochemical activation process, (2022) Available at SSRN 4100172.

[145] C. Kumar B, S.C. Yaragal, B.B. Das, Ferrochrome ash – Its usage potential in alkali activated slag mortars, J Clean Prod. 257 (2020) 120577. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120577.

[146] C.K. Yip, G.C. Lukey, J.L. Provis, J.S.J. van Deventer, Effect of calcium silicate sources on geopolymerisation, Cem Concr Res. 38 (2008) 554–564. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.11.001.

[147] B. Bhushan Jindal, P. Jangra, A. Garg, Effects of ultra fine slag as mineral admixture on the compressive strength, water absorption and permeability of rice husk ash based geopolymer concrete, Mater Today Proc. 32 (2020) 871–877. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.219.

[148] S.F. Ali Shah, B. Chen, M.R. Ahmad, M.A. Haque, Development of cleaner one-part geopolymer from lithium slag, J Clean Prod. 291 (2021) 125241. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125241.

[149] M. Chi, R. Huang, Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars, Constr Build Mater. 40 (2013) 291–298. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.003.

[150] P. Shoaei, F. Ameri, H. Reza Musaeei, T. Ghasemi, C.B. Cheah, Glass powder as a partial precursor in Portland cement and alkali-activated slag mortar: A comprehensive comparative study, Constr Build Mater. 251 (2020) 118991. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118991.

[151] M. Chi, R. Huang, Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars, Constr Build Mater. 40 (2013) 291–298. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.11.003.

[152] C.S. Thunuguntla, T.D. Gunneswara Rao, Effect of mix design parameters on mechanical and durability properties of alkali activated slag concrete, Constr Build Mater. 193 (2018) 173–188. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.10.189.

[153] D. Nasr, A.H. Pakshir, H. Ghayour, The influence of curing conditions and alkaline activator concentration on elevated temperature behavior of alkali activated slag (AAS) mortars, Constr Build Mater. 190 (2018) 108–119. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.09.099.

[154] M. Shariati, A. Shariati, N.T. Trung, P. Shoaei, F. Ameri, N. Bahrami, S.N. Zamanabadi, Alkali-activated slag (AAS) paste: Correlation between durability and microstructural characteristics, Constr Build Mater. 267 (2021) 120886. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120886.

[155] S. Aydin, B. Baradan, Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars, Compos B Eng. 57 (2014) 166–172. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2013.10.001.

[156] I. Ismail, S.A. Bernal, J.L. Provis, R. San Nicolas, D.G. Brice, A.R. Kilcullen, S. Hamdan, J.S.J. Van Deventer, Influence of fly ash on the water and chloride

permeability of alkali-activated slag mortars and concretes, Constr Build Mater. 48 (2013) 1187–1201. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.07.106.

[157] M.M. Hossain, M.R. Karim, M.M. A Elahi, M.F. Mohd Zain, Water absorption and sorptivity of alkali-activated ternary blended composite binder, Journal of Building Engineering. 31 (2020) 101370. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2020.101370.

[158] S.F. Ali Shah, B. Chen, M.R. Ahmad, M.A. Haque, Development of Cleaner One-part geopolymer from lithium slag, J Clean Prod. 291 (2021) 125241. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.125241.

[159] C.S. Thunuguntla, T.D. Gunneswara Rao, Effect of mix design parameters on mechanical and durability properties of alkali activated slag concrete, Constr Build Mater. 193 (2018) 173–188. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.189.

[160] I. Ismail, S.A. Bernal, J.L. Provis, R. San Nicolas, D.G. Brice, A.R. Kilcullen, S. Hamdan, J.S.J. van Deventer, Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes, Constr Build Mater. 48 (2013) 1187–1201. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.106.

[161] A. Mehta, R. Siddique, T. Ozbakkaloglu, F. Uddin Ahmed Shaikh, R. Belarbi, Fly ash and ground granulated blast furnace slag-based alkali-activated concrete: Mechanical, transport and microstructural properties, Constr Build Mater. 257 (2020) 119548. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119548.

[162] F. Matalkah, T. Salem, M. Shaafaey, P. Soroushian, Drying shrinkage of alkali activated binders cured at room temperature, Constr Build Mater. 201 (2019) 563–570. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.223.

[163] Z. Zuhua, Y. Xiao, Z. Huajun, C. Yue, Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer, Appl Clay Sci. 43 (2009) 218–223. https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.09.003.

[164] J. Mañosa, M. Cerezo-Piñas, A. Maldonado-Alameda, J. Formosa, J. Giro-Paloma, J.R. Rosell, J.M. Chimenos, Water treatment sludge as precursor in non-dehydroxylated kaolin-based alkali-activated cements, Appl Clay Sci. 204 (2021) 106032. https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106032.

[165] Y. Wang, M. Fall, A. Wu, Initial temperature-dependence of strength development and self-desiccation in cemented paste backfill that contains sodium silicate, Cem Concr Compos. 67 (2016) 101–110. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.01.005.

[166] H.-W. Reinhardt, M. Jooss, Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width, Cem Concr Res. 33 (2003) 981–985. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01099-2.

[167] E. Drouet, S. Poyet, J.-M. Torrenti, Temperature influence on water transport in hardened cement pastes, Cem Concr Res. 76 (2015) 37–50. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.002.

[168] F. Brue, C.A. Davy, F. Skoczylas, N. Burlion, X. Bourbon, Effect of temperature on the water retention properties of two high performance concretes, Cem Concr Res. 42 (2012) 384–396. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.11.005.

[169] C.D. Atiş, E.B. Görür, O. Karahan, C. Bilim, S. İlkentapar, E. Luga, Very high strength (120MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration, Constr Build Mater. 96 (2015) 673–678. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.089.

[170] J. Jiang, Y. Yuan, Q. Zeng, T. Mo, Relationship of moisture content with temperature and relative humidity in concrete, Magazine of Concrete Research. 65 (2013) 1494–1496. https://doi.org/10.1680/macr.13.00211.

[171] M. Hoy, R. Rachan, S. Horpibulsuk, A. Arulrajah, M. Mirzababaei, Effect of wetting–drying cycles on compressive strength and microstructure of recycled asphalt pavement – Fly ash geopolymer, Constr Build Mater. 144 (2017) 624–634. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.243.

[172] M. Olivia, H. Nikraz, Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method, Materials & Design (1980-2015). 36 (2012) 191–198. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.10.036.

[173] M.W. Hussin, A. Nur Farhayu, M.A.R. Bhutta, A.S.L. Nor Hasanah, Study on dry-wet cyclic resistance of geopolymer mortars using blended ash from agro-

industrial waste, in: Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 2013.

[174] M. Sofi, J.S.J. van Deventer, P.A. Mendis, G.C. Lukey, Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs), Cem Concr Res. 37 (2007) 251–257. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.008.

[175] D.H. Gray, Y.-K. Lin, Engineering Properties of Compacted Fly Ash, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 98 (1972) 361–380. https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001744.

[176] S. Songpiriyakij, T. Kubprasit, C. Jaturapitakkul, P. Chindaprasirt, Compressive strength and degree of reaction of biomass- and fly ash-based geopolymer, Constr Build Mater. 24 (2010) 236–240. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.09.002.

[177] P. De Silva, K. Sagoe-Crenstil, V. Sirivivatnanon, Kinetics of geopolymerization: Role of Al2O3 and SiO2, Cem Concr Res. 37 (2007) 512–518. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.003.

[178] R.H. Geraldo, L.F.R. Fernandes, G. Camarini, Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymer production, J Clean Prod. 149 (2017) 146–155. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.076.

[179] D.E. Angulo-Ramírez, R. Mejía de Gutiérrez, F. Puertas, Alkali-activated Portland blast-furnace slag cement: Mechanical properties and hydration, Constr Build Mater. 140 (2017) 119–128. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.092.

[180] O. Burciaga-Díaz, J.I. Escalante-García, Comparative performance of alkali activated slag/metakaolin cement pastes exposed to high temperatures, Cem Concr Compos. 84 (2017) 157–166. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.007.

[181] A. Saludung, T. Azeyanagi, Y. Ogawa, K. Kawai, Effect of silica fume on efflorescence formation and alkali leaching of alkali-activated slag, J Clean Prod. 315 (2021) 128210. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128210.

[182] I. Ismail, S.A. Bernal, J.L. Provis, R. San Nicolas, S. Hamdan, J.S.J. van Deventer, Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the

incorporation of fly ash, Cem Concr Compos. 45 (2014) 125–135. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.006.

[183] M. Kamath, S. Prashant, M. Kumar, Micro-characterisation of alkali activated paste with fly ash-GGBS-metakaolin binder system with ambient setting characteristics, Constr Build Mater. 277 (2021) 122323. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122323.

[184] T. Hertel, B. Blanpain, Y. Pontikes, A Proposal for a 100 % Use of Bauxite Residue Towards Inorganic Polymer Mortar, Journal of Sustainable Metallurgy. 2 (2016) 394–404. https://doi.org/10.1007/S40831-016-0080-6.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. S. Bilici, N. Kabay, Effects of using washing aggregate sludge on alkali-activated blast furnace slag based pastes, 6as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, 9-11 November 2022, Lisbon, Portugal.

Makaleler

1. S. Bilici, N. Kabay, N. Miyan, T. Omur, H. Ozkan, Effect of washing aggregate sludge waste on the properties of alkali-activated blast furnace slag, Journal of Building Engineering. 63 (2023) 105527. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.105527.

Projeler

1. Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü, "Endüstriyel bir atığın bağlayıcılık özelliğinin alternatif yöntemlerle araştırılması," Tez Projesi, Doktora, FDK-2021-4322, 18.03.2021.