

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



**ALKALİ-AKTİF YÜKSEK FIRIN CÜRUFU BAĞLAYICILI
HAFİF AGREGA İLE ÜRETİLEN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN
HARÇLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ**

Murat DENER

Doktora Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Yapı Bilim Dalı

OCAK 2022

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

ALKALİ-AKTİF YÜKSEK FIRIN CÜRUFU BAĞLAYICILI HAFİF
AGREGA İLE ÜRETİLEN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN
HARÇLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

Tez Yazarı
Murat DENER

Danışman
Doç. Dr. Mehmet KARATAŞ

İkinci Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Mehrzad MOHABBİ

OCAK 2022
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Başlığı:	Alkali-Aktif Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcılı Hafif Agrega ile Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Harçların Mühendislik Özellikleri
Yazarı:	Murat DENER
İlk Teslim Tarihi:	17.12.2021
Savunma Tarihi:	24.01.2022

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Doç. Dr. Mehmet KARATAŞ Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Bahar DEMİREL Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Ragıp İNCE Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Ahmet BENLİ Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğretim Üyesi Bilal BALUN Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza
Prof. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Alkali-Aktif Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcı Hafif Agregası ile Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Harçların Mühendislik Özellikleri” Başlıklı Doktora Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

24.01.2022

Murat DENER



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında yüksek fırın cürufunun alkalilerle aktif hale getirilmesiyle elde edilen alkali-aktif bağlayıcı malzemesinin, insan kaynaklı faaliyetler neticesinde atmosfere salınan karbondioksit gazının önemli bir oranından sorumlu olan Portland çimentosuna alternatif bağlayıcı malzeme olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Tez süreci boyunca bilgi birikimini, tecrübesini ve zamanını benden esirgemeyen değerli hocam ve danışmanım Sayın Doç. Dr. Mehmet KARATAŞ'a şükranlarımı sunarım. Çalışma sırasında her daim bilgi ve tecrübesine başvurduğum ikinci danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mehrzad MOHABBİ'ye teşekkür ederim.

Tez izleme süreci boyunca değerli vakitlerini ayıran Tez İzleme Komitesi Üyeleri Sayın Prof. Dr. Ragıp İNCE'ye ve Sayın Prof. Dr. Bahar DEMİREL'e teşekkür ederim.

Deneyisel çalışma sırasında bilgi ve tecrübelerine başvurduğum Sayın Doç. Dr. Ahmet BENLİ'ye ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Bilal BALUN'a, her daim destekçim olan oda arkadaşım Sayın Arş. Gör. Ömer Faruk NEMUTLU'ya, laboratuvar çalışmaları sırasında yardımcı olan kıymetli öğrenci arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak, hayatımın tüm dönemlerinde maddi ve manevi her konuda destekçim olan aileme bu vesile ile minnettarlıklarımı sunarım.

Murat DENER
ELAZIĞ, 2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. ALKALİ-AKTİF BAĞLAYICILAR.....	4
2.1. Tarihsel Gelişimi	4
2.2. Çevresel Etki	10
2.3. Alkali-Aktif Bağlayıcıların Yapısı ve Kimyası	11
2.3.1. Düşük Kalsiyum İçeren Sistemlerin Jel Yapısı	12
2.3.2. Yüksek Kalsiyum İçeren Sistemlerin Jel Yapısı	13
2.3.3. Yüksek Fırın Cürufunun Alkali Aktivasyonu	13
2.3.4. Portland Çimentosu ve Alkali-Aktif Bağlayıcılar Arasındaki Farklılıklar	16
2.4. Alkali-Aktif Bağlayıcıların Bileşenleri.....	16
2.4.1. Alüminosilikat Esaslı Malzeme.....	17
2.4.2. Alkali Aktivatör	17
2.5. Alkali-Aktif Bağlayıcıların Endüstrileşmesi	19
2.5.1. Temel Zorluklar, Engeller ve Teşvikler	19
2.5.2. Üretim Süreci, Uygulanması ve Yatırım Maliyeti.....	19
2.5.3. Standartlaşma Süreci	21
3. LİTERATÜR İNCELEMESİ	22
3.1. Alkali-Aktif Cürufun Mekanik Özellikleri	22
3.2. Alkali-Aktif Cürufun Durabilite Özellikleri	23
3.3. Kendiliğinden Yerleşen ve Hafif Agrega ile Üretilen AAM harçları	26
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	28
4.1. Kullanılan Malzemeler	28
4.1.1. Yüksek Fırın Cürufu.....	28
4.1.2. Portland Çimentosu	29
4.1.3. Agrega	30
4.1.4. Aktivatör	30
4.1.5. Akışkanlaştırıcı ve Karışım Suyu.....	31
4.2. Yöntem	31
4.2.1. İşlenebilirlik Deneyleri.....	33
4.2.2. Yoğunluk ve Su Emme Tayini	36
4.2.3. Basınç ve Eğilme Deneyleri	36
4.2.4. Ultra Ses Hızı Ölçüm Deneyi.....	37
4.2.5. Yüksek Sıcaklık Deneyi	37
4.2.6. Sülfat Saldırısı Deneyi	38
4.2.7. Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi.....	38

4.2.8. X-Işını Difraktometresi Analizi.....	39
4.2.9. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Analizi	40
4.3. Hazırlanan Karışımlar.....	41
4.3.1. Hamur Karışımları.....	41
4.3.2. Harç Karışımları.....	43
5. DENEY SONUÇLARI.....	46
5.1. Hamur Karışımları Deney Sonuçları	46
5.1.1. PÇ İkamesinin Etkisi.....	46
5.1.2. Na ₂ SiO ₃ /NaOH Oranının Etkisi	49
5.1.3. Kür Sıcaklığı Etkisi	50
5.1.4. Priz Süresi Deneyi Sonuçları.....	51
5.2. Harç Karışımları Deney Sonuçları.....	53
5.2.1. Slump Deneyi Sonuçları.....	53
5.2.2. Basınç Deneyi Sonuçları	55
5.2.3. Eğilme Deneyi Sonuçları.....	59
5.2.4. Su Emme ve Yoğunluk Deney Sonuçları	60
5.3. Yüksek Sıcaklık Deneyi Sonuçları	62
5.3.1. Basınç Deneyi Sonuçları	62
5.3.2. Görsel İnceleme.....	66
5.3.3. Ultra Ses Hızı Ölçüm Deneyi Sonuçları.....	67
5.3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu Analiz Sonuçları	70
5.3.5. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Analizi Sonuçları	76
5.3.6. X-Işını Difraktometresi Analizi Sonuçları	80
5.4. Sülfat Saldırısı Deneyi Sonuçları.....	82
5.4.1. Basınç Deneyi Sonuçları	82
5.4.2. Görsel İnceleme.....	87
5.4.3. Ağırlık Değişimi.....	89
5.4.4. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Analizi Sonuçları	92
6. SONUÇLAR.....	98
7. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİ.....	102
KAYNAKLAR.....	103
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Alkali-Aktif Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcılı Hafif Agregata ile Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Harçların Mühendislik Özellikleri

Murat DENER

Doktora Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2022, Sayfa: xiii + 114

Geliştirilmesinden bu yana betonda rakipsiz bir şekilde bağlayıcı malzeme olarak kullanılan Portland çimentosu insan faaliyetleri kaynaklı CO₂ emisyonunun %8'inden sorumludur. Alüminosilikat esaslı malzemelerin alkali aktivatör vasıtasıyla aktif hale getirilmesi esasına dayanan alkali-aktif malzemeler inşaat sektöründe çevresel kazanımlar elde etmeye yönelik geliştirilen bir bağlayıcıdır. Alkali-aktif malzemelerle arzu edildiği takdirde farklı niteliklere sahip harç/betonların üretilmesi bu malzemelerin inşaat sektöründe kullanılması yönündeki endişelerin giderilmesine yardımcı olacaktır.

Bu çalışmada öncelikle Na₂SiO₃/NaOH aktivatör oranının, Portland çimentosu ikame oranının ve kür sıcaklığının basınç dayanımına etkisi üretilen 34 seri hamur karışımı ile incelenmiştir. Bilahare pomza agregası kullanılarak 48 seri harç karışımı hazırlanmış, en iyi basınç dayanımına ve yayılma çapına sahip karışımlar yüksek sıcaklık ve sülfat saldırısı deneyleri için seçilmiştir. Harç numunelerinin yüksek sıcaklık direnci basınç deneyi, ultra ses hızı ölçümü, taramalı elektron mikroskobu, fourier dönüşümlü kızılötesi ve x-ışını difraktometresi analizleri yapılarak incelenmiştir Sülfat çözeltilerine maruz bırakılan numunelerin sülfat direnci görsel muayene, basınç dayanımında ve ağırlıkta meydana gelen değişimlerinin ölçülmesinin yanı sıra fourier dönüşümlü kızılötesi analizi ile araştırılmıştır.

Hafif ağırlıklı agregata kullanılarak üretilen alkali-aktif harç 240 mm yayılma çapına erişmiştir. 1000 °C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde bile dökülme meydana gelmediği görülmüştür. 800 °C sıcaklığa kıyasla 1000 °C sıcaklıktan sonra numunelerin dayanımında artış meydana gelmiştir. Dış görünümde meydana gelen değişimlere paralel olarak MgSO₄ çözeltisinde altı ay bekletilen numunelerin dayanımı önemli ölçüde azalırken aynı süre boyunca Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin dayanımı % 21,4 ile %37 arasında değişen değerlerde artmıştır. Yüksek sıcaklık direncinde olduğu gibi bağlayıcı olarak tamamen cüruftan oluşan numunelerin sülfat direnci Portland çimento ikameli emsallerine kıyasla daha yüksek olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Alkali-aktif malzeme, Yüksek fırın cürufu, Yüksek sıcaklık, Sülfat saldırısı, Hafif ağırlıklı agregata

ABSTRACT

Engineering Properties of Self-Compacting Alkali-Activated Blast Furnace Slag Mortars Produced with Lightweight Pumice Aggregate

Murat DENER

Ph.D. Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

January 2022, Pages: xiii + 114

Portland cement, which has been used as an unrivaled binder material since its development is responsible for 8% of CO₂ emissions from human activities. Alkali-activated materials based on the principle of activating aluminosilicate-based materials by means of alkali activators are a binder developed for environmental gains in the construction industry. The production of mortars/concrete having different properties with alkali-activated materials may eliminate the concerns about the use of these materials in the construction industry.

Firstly, the effects of Na₂SiO₃/NaOH ratio, Portland cement replacement ratio and curing temperature on the compressive strength were investigated with 34 series of paste mixes produced. 48 series of mortar mixtures were produced using pumice aggregate. Mixtures having best compressive strength and flow diameter were determined. The mixtures determined were reproduced for high temperature and sulfate attack tests. The high temperature resistance of the mortar specimens was investigated by compressive strength test, UPV measurement, scanning electron microscope, fourier-transform infrared spectroscopy and X-ray diffraction analyses. Sulfate resistance of the mixtures, on the other hand, was investigated by performing fourier-transform infrared spectroscopy analysis as well as compressive strength test, weight change measurement and visual inspection of the specimens immersed in 5% concentrated Na₂SO₄ and MgSO₄ solutions.

In this study the alkali-activated mortar produced using light-weight aggregate reached a flow diameter of 240 mm. It was observed that there was no spalling occurred even in the specimens exposed to 1000 °C. There was an increase in the strength of the specimens after 1000 °C temperature exposure compared to 800 °C temperature exposure. In accordance with the changes in the visual appearance, the strength of the specimens immersed in MgSO₄ solution decreased significantly at the end of six months, while the strength of the specimens immersed in Na₂SO₄ solution for the same period increased by values ranging from 21.4% to 37%. The sulfate resistance of the specimens, which consisted entirely of slag as binder, was higher than their Portland cement substituted counterparts, as was the high temperature resistance.

Keywords: Alkali-activated materials, Blast furnace slag, High temperature, Sulfate attack, Lightweight aggregate

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. AAM kullanılarak inşa edilen 20 katlı konut, Lipetsk, Rusya [16]	5
Şekil 2.2. AAM kullanılarak inşa edilen 9 katlı konut, Mariupol, Ukrayna [16]	5
Şekil 2.3. AAC betonu ile inşa edilen yol [11].....	6
Şekil 2.4. PÇ betonu ve AAC betonu ile imal edilen yollar [11].....	6
Şekil 2.5. AAM üretim tesisi ve yerinde döküm uygulaması[13, 35]	9
Şekil 2.6. AAM bağlayıcısı kullanılarak yapılan uygulamalar[13, 35]	9
Şekil 2.7. Katı bir AEM'nin alkali-aktivasyon süreci ve reaksiyon ürünleri [13].....	11
Şekil 2.8. Alkali-aktif YFC parçacığının reaksiyon mekanizması [16].....	14
Şekil 2.9. C-A-S-H jel yapısı [13].....	15
Şekil 4.1. YFC'nin tane dağılım eğrisi	28
Şekil 4.2. YFC'nin XRD spektrumu	29
Şekil 4.3. a) 0-2 mm kum b) 2-4 mm pomza.....	30
Şekil 4.4. a) Na ₂ SiO ₃ çözeltisi b) NaOH çözeltisi.....	31
Şekil 4.5. a) Etüv b) Halkalı öğütücü	32
Şekil 4.6. Harç mikseri	32
Şekil 4.7. a) Prizmatik kalıplar b) Streç ile sarılı kalıp.....	33
Şekil 4.8. Mini çökme-yayılma konisi.....	33
Şekil 4.9. Mini V-hunisi	34
Şekil 4.10. Mini V-hunisi deneyi	35
Şekil 4.11. Vicat aleti	35
Şekil 4.12. Arşimet terazisi	36
Şekil 4.13. a) Beton presi b) Eğilme cihazı	36
Şekil 4.14. UPV cihazı	37
Şekil 4.15. Yüksek sıcaklık fırını	38
Şekil 4.16. Na ₂ SO ₄ ve MgSO ₄ tuzları.....	38
Şekil 4.17. SEM cihazı	39
Şekil 4.18. XRD cihazı.....	40
Şekil 4.19. FTIR cihazı.....	40
Şekil 4.20. Taze haldeki hamur	42
Şekil 4.21. Taze haldeki harç	45
Şekil 5.1. PÇ ikamesinin basınç dayanımına etkisi	46

Şekil 5.2. SS/SH oranı 2 olan %20 PÇ ikameli numune	47
Şekil 5.3. SS/SH oranı 2.5 olan %20 PÇ ikameli numune	48
Şekil 5.4. SS/SH oranı 3 olan %20 PÇ ikameli numune	48
Şekil 5.5. SS/SH oranının basınç dayanımına etkisi.....	49
Şekil 5.6. Kür sıcaklığının basınç dayanımına etkisi.....	50
Şekil 5.7. Priz süresi tayini deneyi	52
Şekil 5.8. Priz süresi deneyi sonuçları.....	52
Şekil 5.9. Mini çökme-yayılma deneyi.....	53
Şekil 5.10. Mini çökme-yayılma deneyi sonuçları	54
Şekil 5.11. Üretilen harç numuneleri.....	55
Şekil 5.12. Basınç deneyi sonuçları - %60 PA	56
Şekil 5.13. Basınç deneyi sonuçları - %70 PA	57
Şekil 5.14. Basınç deneyi sonuçları - %80 PA	57
Şekil 5.15. 28 günlük eğilme dayanımları.....	59
Şekil 5.16. Yoğunluk ve su emme değerleri a) %60 PA b) %70 PA c) %80 PA	60
Şekil 5.17. Yoğunluk ve su emme değerleri arasındaki ilişki.....	61
Şekil 5.18. 3 ve 90 günlük görelî basınç dayanımları.....	63
Şekil 5.19. Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları.....	64
Şekil 5.20. Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımlarındaki değişim	65
Şekil 5.21. Yüksek sıcaklıklar sonrası numunelerin fiziksel görünümü.....	67
Şekil 5.22. 3 ve 90 günlük görelî UPV değerleri.....	68
Şekil 5.23. Yüksek sıcaklık sonrası UPV değerleri.....	69
Şekil 5.24. UPV değerleri ile basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	70
Şekil 5.25. PÇ içermeyen numunelerin yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası SEM görüntüleri.....	71
Şekil 5.26. % 15 PÇ ikameli numunelerin yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası SEM görüntüleri	72
Şekil 5.27. PÇ içermeyen ve %15 PÇ ikameli numunelerin SEM görüntülerinin kıyaslanması	73
Şekil 5.28. PÇ içermeyen numunenin elemental haritalandırılması	73
Şekil 5.29. %15 PÇ ikameli numunenin elemental haritalandırılması	74
Şekil 5.30. Yüksek sıcaklıklardan sonra numunelerin elemental haritalandırılması	75
Şekil 5.31. PÇ içermeyen numunelerin 25 °C'deki ve 600 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki FTIR spektrumları	77
Şekil 5.32. PÇ içermeyen numunelerin 800 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki FTIR spektrumları	77

Şekil 5.33. %15 PÇ ikameli numunelerin 25 °C'deki ve 600 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki FTIR spektrumları	79
Şekil 5.34. %15 PÇ ikameli numunelerin 800 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki FTIR spektrumları	79
Şekil 5.35. PÇ içermeyen numunelerin 25 °C ile 600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki XRD spektrumları.....	80
Şekil 5.36. %15 PÇ ikameli numunelerin 25 °C ile 600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki XRD spektrumları	81
Şekil 5.37. 28 günlük basınç dayanımları.....	83
Şekil 5.38. Na ₂ SO ₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımları.....	83
Şekil 5.39. Na ₂ SO ₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımlarındaki değişim	84
Şekil 5.40. MgSO ₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımları	85
Şekil 5.41. MgSO ₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımlarındaki değişim.....	86
Şekil 5.42. Altı ay boyunca Na ₂ SO ₄ ve MgSO ₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin fiziksel görünüşleri	88
Şekil 5.43. Bir, üç ve altı ay boyunca MgSO ₄ çözeltisinde bekletilen PÇ içermeyen ve %15 PÇ ikameli numunelerin fiziksel görünüşleri	89
Şekil 5.44. Na ₂ SO ₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin ağırlığında meydana gelen değişim	90
Şekil 5.45. MgSO ₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin ağırlığında meydana gelen değişim	91
Şekil 5.46. MgSO ₄ ve Na ₂ SO ₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin ağırlık ve basınç değişimleri arasındaki korelasyon	92
Şekil 5.47. Sülfat çözeltisine maruz bırakılmamış PÇ içermeyen numunenin FTIR spektrumu	93
Şekil 5.48. Sülfat çözeltisine maruz bırakılmamış %15 PÇ ikameli numunenin FTIR spektrumu	93
Şekil 5.49. MgSO ₄ çözeltisinde bekletilen PÇ içermeyen numunenin FTIR spektrumu.....	94
Şekil 5.50. MgSO ₄ çözeltisinde bekletilen %15 PÇ ikameli numunenin FTIR spektrumu	95
Şekil 5.51. Na ₂ SO ₄ çözeltisinde bekletilen PÇ içermeyen numunenin FTIR spektrumu	96
Şekil 5.52. Na ₂ SO ₄ çözeltisinde bekletilen %15 PÇ ikameli numunenin FTIR spektrumu.....	96

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. AAM terminolojisi[2]	7
Tablo 2.2. AAM gelişimi/zaman çizelgesi[2, 32, 33]	8
Tablo 2.3. PÇ klinkeri ile AAM arasındaki kimyasal farklılıklar[2]	16
Tablo 4.1. YFC'nin kimyasal bileşimi	29
Tablo 4.2. PÇ'nin kimyasal bileşimi	30
Tablo 4.3. NaOH ve Na ₂ SiO ₃ 'ün özellikleri.....	31
Tablo 4.4. Alkali-aktif harç için yayılma kriteri[129].....	34
Tablo 4.5. Hamur karışım oranları-SS/SH ve PÇ etkisi.....	41
Tablo 4.6. Hamur karışım oranları-kür sıcaklığı etkisi	43
Tablo 4.7. Harç karışım oranları	44
Tablo 5.1. PÇ içermeyen ve % 15 PÇ ikameli numunelerin SEM/EDX analiz sonucu.....	74
Tablo 5.2. Yüksek sıcaklıklardan sonra numunelerin SEM/EDX analiz sonucu.....	76

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Al_2O_3	: Alüminyum oksit
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	: Kalsiyum hidroksit
CaCO_3	: Kalsiyum karbonat
CaO	: Kalsiyum oksit
CO_2	: Karbondioksit
Fe_2O_3	: Demir oksit
H_2O	: Su
K_2O	: Potasyum oksit
MgO	: Magnezyum oksit
MgSO_4	: Magnezyum sülfat
Na_2O	: Sodyum oksit
Na_2SiO_3	: Sodyum silikat
Na_2SO_4	: Sodyum sülfat
NaOH	: Sodyum hidroksit
R^2	: Determinasyon katsayısı
SiO_2	: Silisyum dioksit

Kısaltmalar

a/b	: Alkali aktivatör/bağlayıcı malzeme
AAM	: Alkali-aktif malzeme
AEM	: Alümino-silikat esaslı malzeme
EDX	: Enerji dağılım spektrometrisi
FTIR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi
Ms	: Silika modülü
PA	: Pomza agregası
PÇ	: Portland çimentosu
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SH	: Sodyum hidroksit
SS	: Sodyum silikat
UPV	: Ultra ses hızı
XRD	: X-ışını difraktometresi
YFC	: Yüksek fırın cürufu

1. GİRİŞ

20. yüzyılda dünya nüfusu 3 kat artarak 1.5 milyardan 6 milyara yükselmiştir. Dünya Bankası verilerine göre dünya nüfusu 2020 yılında 7.75 milyar olmuştur [1]. Tahminler 21. yüzyılın ortalarına doğru dünya nüfusunun 9.6 milyar olacağı yönündedir [2]. Bu hızla artan nüfus, beton üretimi için milyarlarca ton çimento kullanılan büyük altyapı yapı projelerinin yapılması ve yeni şehirlerin oluşmasıyla neticelenmiştir. 2016 yılında toplam küresel bina taban alanı yaklaşık 235 milyar m² iken takip eden 40 yıl içerisinde bunun iki katına çıkacağı öngörülmektedir. Gitgide artan bu ihtiyacı karşılamakta en büyük rol şüphesiz betonun en temel bileşeni olan çimentoya düşmektedir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerin büyümesinde kilit rol oynayan gelişmiş altyapı projelerinin inşa edilmesi önümüzdeki 40-50 yıl boyunca çimento talebinde önemli bir artış yaşanacağına habercisidir [3, 4].

Portland çimentosu (PÇ) 180 yıl önce geliştirilmesinden bu yana inşaat için kullanılan betonda baskın, alternatifsiz bağlayıcı malzeme haline gelmiştir. Çok yönlülük, dayanım, dayanıklılık ve ekonomik değer bakımından çok avantajlı olduğu aşikardır. Ancak tüm bu olumlu özelliklere rağmen PÇ kusursuz değildir. Bu yargıya varılmasının birincil nedeni üretimi sırasında atmosfere salınan yüksek orandaki karbondioksit (CO₂) gazıdır. Küresel ölçekte PÇ üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonu insan faaliyetleri kaynaklı CO₂ emisyonunun önemli bir oranını oluşturmaktadır. Çimento üretiminde yer alan kimyasal ve termal yanma süreçlerinin, yıllık küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %8'inden sorumlu olduğu belirtilmektedir [5, 6]. Bir düşünce kuruluşu olan Chatham House'nin[3] 2018 yılında yayımladığı bir rapora göre çimento kaynaklı CO₂ emisyon salınımlarında Türkiye Çin, Hindistan, AB ve ABD'nin hemen arkasında yer almaktadır. 2018 Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansında [7] biraraya gelen çimento endüstrisi temsilcileri çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ salınımının 2030 yılına kadar en az %16 düşürülmesi gerektiği yönünde mutabık kalmıştır.

Ucuz, her yerde ve her şekilde üretilen, sağlam bir bina inşa etmek için tüm özellikleri barındıran betondan, PÇ üretiminden kaynaklanan CO₂ salınımı nedeniyle vazgeçilmesi gerçekçi bir yaklaşım değildir. Beton olmadan bina inşa etmek mümkün olsa da uygulanabilir değildir. Betonun en önemli bileşeni olan PÇ'ye alternatif olabilecek bağlayıcı malzemeler araştırmacıların üzerine yoğunlaştığı bir konudur. Bununla beraber beton endüstrisinin de bu değişimi desteklemesi araştırmaların başarıyla neticelenmesinde önemlidir. Bu hususta çevre dostu yapım işine odaklanan Biomason şirketinin başkanı Ginger Krieg Doiser, piyasa talebi ve yenilikçi teknolojiler ile iklim değişikliğine dair artan endişelerin inşaat sektörünü geniş anlamda alternatif yapı malzemelerine uyum sağlayacağı noktaya yaklaştırdığını belirtmektedir. PÇ'nin alternatiflerini keşfetmeye yönelik ek motivasyon, belirli uygulamalardaki ve ortamlardaki eksikliklerinden de kaynaklanmaktadır. Örneğin, hızlı onarım uygulamaları PÇ'nin sağlayabileceğinden daha hızlı bir

mukavemet kazancı gerektirir. Benzer şekilde, yüksek asitli veya yüksek sülfat konsantrasyonlu çevresel koşullar PÇ betonunun önemli ölçüde bozulmasına neden olabilir. Bu gibi durumlar için de PÇ'nin alternatiflerine talep vardır [5].

Hem enerji kullanımını hem de sera gazı emisyonlarını azaltma baskısı altında olan çimento endüstrisinin tanıdık ve güvenilir bir malzeme olan PÇ'ye alternatifler araması yeni bir girişim değildir. CO₂ emisyonunu düşürme arayışı ile farklı endüstrilerden atık malzemelerin kullanımı söz konusu olmuştur. PÇ betonu, kömür yanmasından kaynaklanan uçucu kül, demir-çelik endüstrisinin yan ürünü olan yüksek fırın cürufu (YFC) ve ferrosilikon üretiminden gelen silis dumanı dahil olmak üzere, mineral katkı malzemelerini halihazırda barındırmaktadır. Fakat bu mineral katkı malzemesi %10 ile %50 arasında değişen oranlarda PÇ'nin düşük bir kısmını ikame etmekte kullanılmaktadır. Tamamen veya neredeyse tamamen atık malzemelerden yapılmış bağlayıcılar üretmek için yeni bir fikir öne atılmıştır: alkali-aktif malzemeler (AAM) [5, 8].

AAM, bir amorf katı alüminosilikat esaslı malzeme (AEM) ile bir alkali aktivatör arasındaki reaksiyonla elde edilir. İlk olarak AEM, alkali aktivatör vasıtasıyla silikat ve alüminat birimlerine ayrıştırılır. Daha sonra bu birimler, bağlanma özelliklerine sahip amorf ve üç boyutlu bir matris üretmek için yeniden birleşir. Alüminosilikat öncüsü olarak kullanılan malzemeler genellikle silis dumanı, uçucu kül ve YFC gibi endüstriyel yan ürünlerdir. AAM çevresel faydalarının yanısıra iyi mekanik ve durabilite özelliklere sahip olmasından dolayı da PÇ'ye alternatif bağlayıcı olarak değerlendirilmektedir [5, 9–11].

PÇ yerine AAM kullanıldığında atmosfere salınan CO₂ emisyonunda meydana gelecek azalım oranını tek bir sayı vererek açıklamak mümkün değildir. AAM'nin karışım tasarımına, kür koşuluna, kullanılacak aktivatör oranlarına bağlı olarak AAM kullanılmasıyla CO₂ emisyonunda meydana gelecek tahmini azalım oranının %9 ile %97 arasında değiştiği ifade edilmiştir. AAM üretim parametrelerine bakılmaksızın bir ton bağlayıcıya düşen CO₂ emisyonun PÇ bağlayıcısına kıyasla düşük olacağı aşikardır. İyi formüle edilmiş alkali-aktif bir bağlayıcı, benzer mekanik performansla sahip PÇ'ye kıyasla CO₂ emisyonu bakımından oldukça önemli çevresel faydalar sağlayabilir [12, 13].

AAM üretimi için kullanıldığı takdirde uçucu kül, metakaolin vb. AEM'lere kıyasla daha düşük kür sıcaklıklarında sertleşip dayanım kazanabilen YFC demir-çelik endüstrisinden elde edilen bir yan/atık üründür [14]. Avrupa cüruf derneği (Euroslag) 2014 yılında yayımladığı bir raporda demir-çelik endüstrisinden kaynaklanan cürufun yüzde 43'ünün yol inşaatında, %5'inin çimento üretiminde kullanıldığını belirtmektedir. Ayrıca açığa çıkan cürufun %13'ü nihai depolanırken %19'u ise içsel depolanmaktadır [15]. Cürufun çimento üretiminde payı nispeten düşük kalmıştır. YFC'nin AAM üretiminde PÇ ikamesi olmaksızın veya düşük oranlarda (<%30) PÇ ikamesiyle kullanılması neticesinde PÇ üretiminden kaynaklan CO₂ emisyonu düşürülecek ve YFC'ye yeni bir kullanım alanı açılacaktır [16].

Demir cürufu agregası 2015 yılı itibariyle Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Yüksek Fen Kurulu birim fiyat listesine eklenmiştir. 2020 yılı itibariyle hidrolik bağlayıcı malzemeler için yapay agrega olarak tanımlanan 10.130.1044 poz numaralı demir cürufu karışık agreganın birim fiyatı 13.80 ₺/m³'tür [17]. Birim fiyatı Türkiye'de demir-çelik endüstrisinden elde edilen cüruf için yüksek pazar rekabetinin olmadığına işaret etmektedir. Bu durum YFC'nin AAM üretimi için ideal bir malzeme olabileceğini göstermektedir.

YFC içerdiği yüksek orandaki CaO içeriğiyle kalsiyum bakımından zengin malzeme olarak bilinmektedir. YFC'nin alkali aktivatör ile reaksiyonu neticesinde PÇ hidratasyonu sırasında elde edilen jele benzer C-S-H jeli ve yapısında küçük Al yüzdesi barındıran C-A-S-H jeli oluşur. Yalnızca su ile reaksiyona girdiğinde düşük bağlayıcılık özelliği gösteren YFC, alkali aktivatör vasıtasıyla reaksiyonunu hızlandırarak hızlı bir şekilde priz alır. Bu süreç, erken yaş dayanımının istendiği uygulamalarda değerli olabilir [13, 16]. Aydın ve Baradan [14] alkali-aktif cüruf (AAC) üzerine yaptıkları çalışmada YFC'nin yüksek sıcaklık kürüne ihtiyaç duymadan iyi mekanik özellik gösterdiğini belirtmiş, AAC bağlayıcısının PÇ'ye alternatif olma konusunda muazzam bir potansiyele sahip olduğunu ifade etmiştir. Palomo vd. [18] tarafından yapılan bir çalışmada ağırlıkça %20 PÇ, %80 YFC içeren alkali-aktif bağlayıcı üretiminin mümkün olduğu belirtilmiştir. Angulo-Ramirez vd. [19] YFC/PÇ (80/20) karışımının, sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) aktivatörleri ile aktif hale getirildiğinde %100 PÇ'den üretilen referans karışıma kıyasla daha iyi mekanik özellik gösterdiğini belirtmiştir. Puertas vd.'nin [20] yaptığı araştırma bu sonucu destekler niteliktedir.

Bu çalışma kapsamında öncelikle hamur numuneleri üretilip $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ (SS/SH) ve PÇ ikame oranlarının yanısıra farklı kür sıcaklıklarının basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenecektir. SS/SH oranı, PÇ ikame oranları ve kür sıcaklığı belirlendikten sonra birtakım parametreler değiştirilerek harç karışımları üretilecektir. Hafif agregaların buharlaşabilir su için rezarvuvar işlevi görmesi nedeniyle geleneksel bağlayıcı ile üretilen harç/betonların yüksek sıcaklıklarda dökülme direnci normal agrega ile üretilen harç/betonlara kıyasla daha düşük olmaktadır [21]. Hafif ağırlıklı pomza agregası (PA) kullanılarak üretilen alkali-aktif harç numunelerinin yüksek sıcaklık direnci, basınç dayanımı ve ultra ses hızı (UPV) ölçüm deneylerinin yanı sıra taramalı elektron mikroskobu (SEM), fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) ve X-ışını difraktometresi (XRD) analizleri ile araştırılacaktır. Tamamen PÇ ile üretilen geleneksel harç/betonlarda PÇ'nin yüksek C_3A içeriği nedeniyle sülfat saldırısının sorunlara yol açacağı bilinmektedir [22]. Bu çalışmada PÇ kullanılmadan veya düşük oranlarda PÇ kullanılarak üretilen alkali-aktif bağlayıcıların sülfat saldırısına karşı gösterdiği direnç görsel inceleme ve iç yapı analizlerinin yanı sıra basınç dayanımları ve ağırlıkta meydana gelen değişimler ölçülerek araştırılacaktır.

2. ALKALİ-AKTİF BAĞLAYICILAR

PÇ üretimi iki farklı yönden CO₂ emisyonuna neden olmaktadır. Bunlardan ilki klinker üretiminde kalsiyum karbonatın (CaCO₃) ısı ile CaO ve CO₂'ye ayrışmasıyla ortaya çıkmaktadır. Tahminlere göre bu süreçten kaynaklanan emisyonlar, toplam antropojenik CO₂ emisyonlarının yaklaşık %5'ini oluşturmaktadır. Ham bileşenleri 1000 °C'nin üzerinde sıcaklıkta ısıtmak için fosil yakıtların kullanılması ile ikinci emisyon kaynağı ortaya çıkmaktadır. Toplamda çimento endüstrisinden kaynaklanan CO₂ emisyonları, küresel emisyonların yaklaşık olarak %8'ini oluşturmaktadır. Çevresel faydalarının yanısıra iyi mekanik ve durabilite özelliklere sahip olmasından dolayı PÇ'ye alternatif bağlayıcı olarak öne çıkan alkali-aktif bağlayıcılar, bir amorf katı AEM ile bir alkali aktivatör arasındaki reaksiyonla elde edilir. İlk olarak, AEM alkali aktivatör vasıtasıyla silikat ve alüminat birimlerine ayrıştırılır. Daha sonra bu birimler, bağlanma özelliklerine sahip amorf ve üç boyutlu bir matris üretmek için yeniden birleşir. Alüminosilikat öncüsü olarak kullanılan malzemeler genellikle silis dumanı, uçucu kül ve YFC gibi endüstriyel yan ürünlerdir [10, 11, 23–26].

2.1. Tarihsel Gelişimi

Alman kimyager Kühl [27], 1908'de AAM'ler ile ilgili çalışma yayımlayan ilk kişi olmuştur. Çalışma, bağlayıcı malzeme üretmek için cürufun sodyum sülfat/karbonat, kireç ve su ile karıştırılmasını temel almıştır. Yaklaşık 30 yıl sonra Purdon [28] cürufaların farklı kimyasal aktivatörlerle etkileşimini detaylandıran ayrıntılı bir çalışma yayımlamıştır. Bu çimento türü daha sonra "Purdocement" adlı ticari bir ürüne dönüştürülmüştür. Buchwald vd. [29] tarafından 2015 yılında yayımlanan bir makalede 1950'lerde Purdocement kullanılarak inşa edilen yapılar incelenmiş ve kendi hizmet ömürleri için hala amaca uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Takip eden yıllarda AAM alanındaki öncü araştırmalar başlangıçta Glukhovsky [30], daha sonra ise Krivenko'nun [31] liderlik ettiği Ukraynalı bir araştırma grubundan gelmiştir. Mevzubahis araştırma grubu hem düşük hem de yüksek kalsiyum içerikli bağlayıcıları kapsamak suretiyle çeşitli alüminosilikat ve aktivatör çeşitlerine dayanan AAM karışımları geliştirmiştir [2]. Şekil 2.1'de AAC betonu kullanılarak Sovyetler Birliği'nde inşa edilen 20 katlı bir bina gösterilmektedir. Binanın dış duvarı yerinde döküm AAC betonu iken kat döşemeleri, merdivenler ve diğer kısımlar ise prefabrik AAC betonudur [16].



Şekil 2.1. AAM kullanılarak inşa edilen 20 katlı konut, Lipetsk, Rusya [16]

Şekil 2.2’de ise AAC betonu kullanılarak Ukrayna’nın Mariupol şehrinde inşa edilen 9 katlı konutlar gösterilmektedir.



Şekil 2.2. AAM kullanılarak inşa edilen 9 katlı konut, Mariupol, Ukrayna [16]

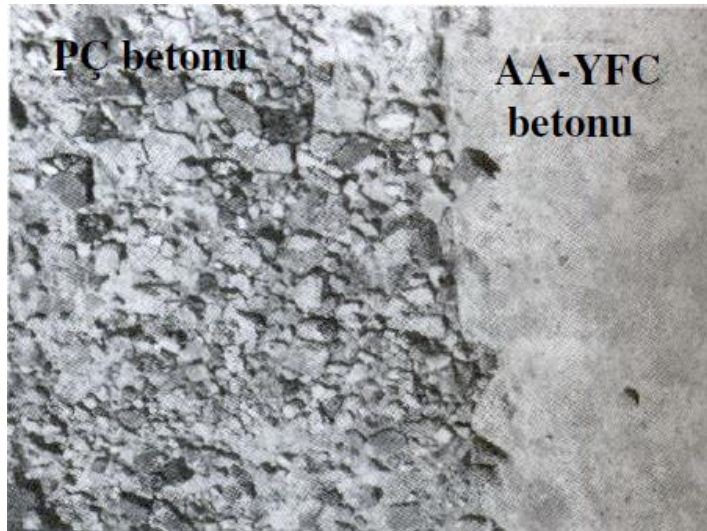
Konutların yanı sıra AAM’ler çeşitli uygulamalarda kullanılmış ve birkaç on yıl boyunca çok iyi bir hizmet performansı sağlamıştır. 1984 yılında Rusya’nın Magnitogorsk bölgesinde YFC’nin alkalilerle aktif hale getirilmesi suretiyle üretilen betondan iki yol yapılmıştır. Üretilen betonlar taşıma ile döküm sahasına getirilmiş ve ve beton doğal iklim koşullarında sertleşmiştir. Dökülen betonun tasarım dayanımı 30 MPa iken 16 yıl sonra yapılan kontrollerde basınç dayanımının 86 MPa olduğu görülmüştür. Beton yolda çatlama ve pullanma benzeri bozulmalar ise meydana

gelmemiştir. 1984 ile 1990 yılları arasında Rusya'nın Ternopol şehrinde AAC betonu ile yapılan yol Şekil 2.3'te görülmektedir. Üretim tarihinin üzerinden yaklaşık 25 yıl geçtikten sonra fotoğraflanan yolun bozulmadığı görülmektedir [11].



Şekil 2.3. AAC betonu ile inşa edilen yol [11]

1999 yılında aynı bölgede PÇ betonu ile imal edilen yolun AAC betonu ile kıyaslandığı fotoğraf Şekil 2.4'te gösterilmiştir. AAC betonu oldukça iyi durumdayken PÇ betonunun ciddi şekilde bozulduğu görülmektedir [11].



Şekil 2.4. PÇ betonu ve AAC betonu ile imal edilen yollar [11]

AAM üzerine araştırma ve ticarileştirme projelerini yürütmedeki temel motivasyon, ikinci dünya savaşı'ndan sonra meydana gelen çimento kıtlığı ile o dönemlerde sovyetlerde demir ve çelik

üretiminden kaynaklanan bol miktarda cüruftur. Literatürün büyük ölçüde Rusça veya Ukraynaca lisanında olması ve karışım tasarımlarının iyi kaydedilmemesi ve aktarılmaması nedeniyle o dönem Sovyetlerde üretilen AAM'lerin nasıl performans gösterdikleri hakkında aktarılan bilgiler oldukça sınırlıdır [2]. Fransız araştırmacı Davidovits metakaolinit, kireçtaşı ve dolomitin sinterlenmiş ürünlerini alüminosilikat bileşen olarak kullanarak ürettiği alkali-aktif bağlayıcıyı polimerik yapıları nedeniyle geopolimer olarak adlandırmış ve elde edilen sonuçları yayımlamıştır[32]. Pavel Krivenko, AAC betonlarının fiziksel ve mekanik özelliklerini incelediği çalışmanın sonuçlarını 1986 yılında yayımlamıştır. Sonraki önemli atılım ise 1999 yılında Angel Palomo'nun kömürle çalışan termik santrallerden elde edilen uçucu külün alkalilerle aktif hale getirilmesi suretiyle teknolojik olarak rekabetçi çimentolar üretilebilirliğini ele alan ilk makaleyi yayımlamasıyla olmuştur [11, 16]. Alkali-aktif bağlayıcılar, onları araştıran araştırma grubuna bağlı olarak kendisine ithaf edilen çeşitli terminolojilere sahip olmuştur. Bu terminolojiler Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. AAM terminolojisi [2]

Terminoloji	Araştırmacı
Toprak silikatları	Glukhovsky (1957)
Geopolimer	Davidovits (1973)
Alkali-aktif çimento	Narang, Chopra (1983)
F-çimento	Forss
Alçısız Portland çimentosu	Odler, Skalny, Brunauer (1983)
SKJ karışımı	Changgo (1991)
Jeoçimento	Krivenko ve arkadaşları (1991)
Alkali çimento	Krivenko (1994)

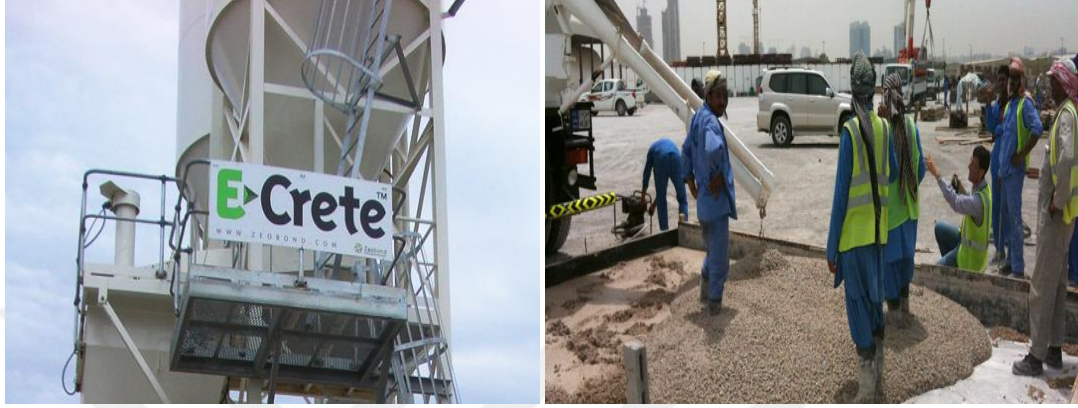
AAM alanında meydana gelen gelişmeler 1980'ler ve doksanlarda hızlı bir şekilde artmıştır. Günümüzde ise bilimsel araştırmalar, ticari açılımlar ve ulusal ve uluslararası standartlaşma [33] süreçlerini kapsayan çok aktif bir alan haline gelmiştir. AAM araştırmalarındaki önemli noktalar bir zaman çizelgesi halinde Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. AAM gelişimi/zaman çizelgesi [2, 34, 35]

Feret	1939	Bağlayıcı olarak kullanılan cüruflar
Purdon	1940	Alkali-cüruf kombinasyonları
Glukhovsky	1959	Alkali çimentoların gelişimi ve teorik temelleri
Glukhovsky	1965	Alkali çimentolar teriminin ilk defa kullanılması
Davidovits	1979	Geopolimer teriminin ilk defa kullanılması
Malinowski	1979	Antik su kemerlerinin karakterize edilmesi
Forss	1983	F tipi çimento (cüruf-alkali-süperplastikleştirici)
Langton ve Roy	1984	Tarihi yapı malzemelerinin karakterize edilmesi
Davidovits ve Sawyer	1985	"Pyrament" çimentosunun patentinin alınması
Krivenko	1986	Doktora tezi, $R_2O-RO-SiO_2-H_2O$
Malolepsy ve Petri	1986	Sentetik melit cürufların aktivasyonu
Malek vd.	1986	Cüruf çimento-düşük seviye radyoaktif atık formları
Davidovits	1987	Eski ve modern betonların kıyaslanması
Deja ve Malolepsy	1989	Kloridlere karşı direncin araştırılması
Kaushal vd.	1989	Alkali karışımlardan oluşan adyabatik kirlenmiş nükleer atık formları
Roy ve Langton	1989	Tarihi betonların analogları
Majundar vd.	1989	$C_{12}A_7$ -cüruf aktivasyonu
Talling ve Brandstettr	1989	Alkali-aktif cüruf
Wu vd.	1990	Cüruf çimentolarının aktivasyonu
Roy vd.	1991	Alkali-aktif çimentoların priz alması
Roy ve Silsbee	1992	Alkali-aktif çimentolara genel bakış
Palomo ve Glasser	1992	Metakaolin ile kalsine edilmiş kahverengi kil
Roy ve Malek	1993	Cüruf çimentolar
Glukhovsky	1994	Eski ve modern betonlar ile geleceğin betonları
Krivenko	1994	Alkali çimentolar
Wang ve Scivener	1995	Cüruf ve alkali-aktif yapıların içyapıları
Fernandez-Jimenez ve Puertas	1997	Alkali-aktif cüruf bağlayıcılar üzerine kinetik çalışma
Katz	1998	Alkali-aktif uçucu küllerin mikro yapıları
Davidovits	1999	Geopolimerik sistemlerin kimyası ve teknoloji
Gong ve Yang	2000	Alkali-aktif kırmızı çamur-cüruf çimentosu
Bakharev	2001-2002	Alkali-aktif cüruf betonları
Hajimohammadi, Provis ve Deventer	2008	One-part geopolimer
Provis ve Deventer	2009	Geopolimerler: yapısı, işlenmesi, özellikleri ve endüstriyel uygulamaları
BSI	2016	AAM için ilk büyük performans standardı

1990'lı yılların başında YFC/uçucu kül tabanlı alkali-aktif bağlayıcılar, boru üretimi için aside dirençli bir malzeme olarak Hollanda'da patentlenmiş ve pazarlanmıştır. Avrupa Birliği'nde devam

eden ticarileştirme çalışmaları Birleşik Krallık, Hollanda, Çek Cumhuriyeti ve Avrupa'daki şirketler tarafından alkali-aktif bağlayıcıların giderek artan şekilde ticari üretimine sebebiyet vermiştir [36]. Şekil 2.5'te AAM üretim tesisi ve yerinde döküm işlemi gösterilirken Şekil 2.6'da AAM kullanılarak gerçekleştirilen bazı uygulamalar gösterilmektedir [13, 30, 37].



Şekil 2.5. AAM üretim tesisi ve yerinde döküm uygulaması[13, 30]



Şekil 2.6. AAM bağlayıcısı kullanılarak yapılan uygulamalar[13, 30]

YFC/uçucu kül tabanlı alkali-aktif bağlayıcılar, Avustralya'da önemli bir ticari ürün olarak kullanılmıştır. Bu tür bağlayıcılar, E-Crete ticari markası altında pazarlanmıştır ve resmi düzenleyici kurum şartnamelerindeki beton için belirtilen şartları sağlamak suretiyle büyük inşaat altyapı ve yerel inşaat projelerinde kullanılmıştır [13].

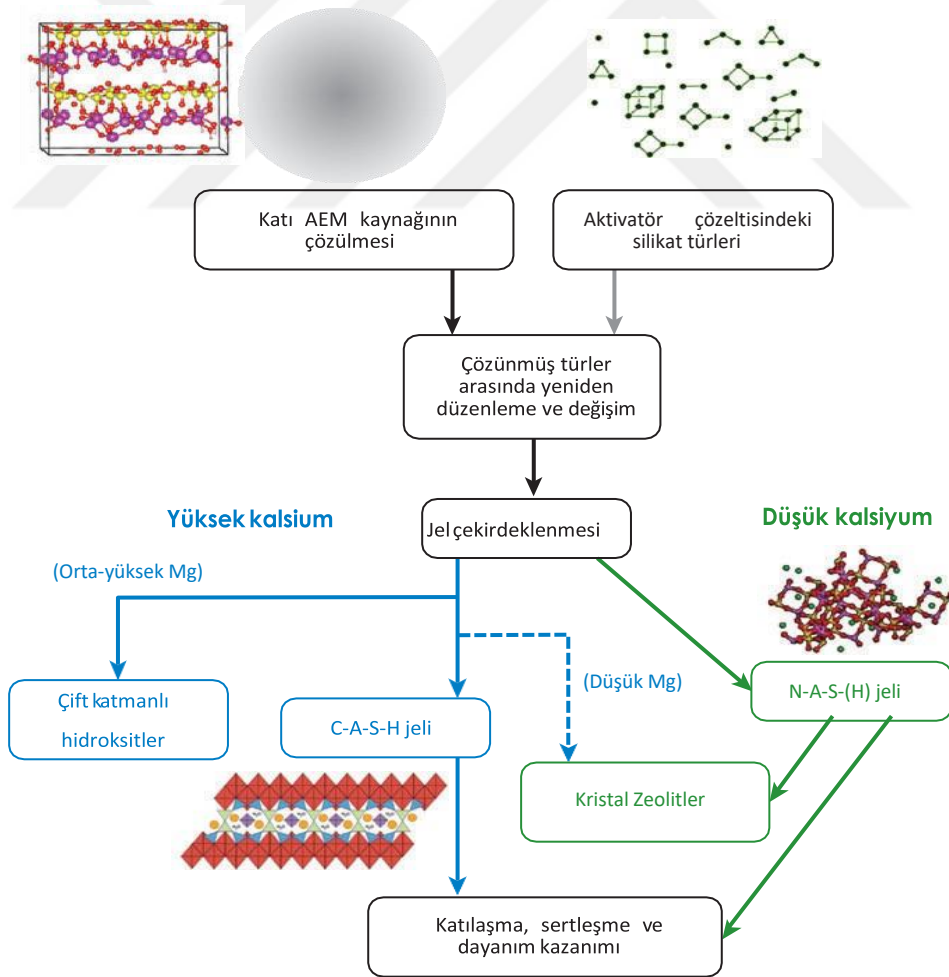
2.2. Çevresel Etki

Çimento ve beton üretimi, geniş ölçekli kullanımları nedeniyle önemli miktarda CO₂ emisyonuna neden olur. Önümüzdeki 50-100 yıl için öngörülen kentleşme, çimento ve beton talebinin artmaya devam edeceğini ve bu talebin daha çevreci malzemeler ile karşılanması gerektiğini göstermektedir [38]. Betonda bağlayıcı malzeme olarak kullanılan çimento, beton kütesinin yaklaşık %10'unu oluşturur ve yılda yaklaşık olarak 4 gigaton (Gt) üretilmektedir [39]. Küresel CO₂ emisyonunun yaklaşık %8'i çimento üretiminden kaynaklanır. Her bir ton çimento imalatından yaklaşık 650–920 kg CO₂ ortaya çıkar [23, 40]. Çelik üretiminin yalnızca üç kat arttığı, ahşap konstrüksiyonun aynı zaman diliminde neredeyse sabit kaldığı son 65 yılda çimento tüketimi on kat artmıştır [41]. Tahminler 21. yüzyılın ortalarına doğru dünya nüfusunun 9.6 milyar olacağı yönündedir [2]. Halihazırda yüksek olan konut açığını doldurma ihtiyacı ve güvenilir bir şekilde işleyen altyapı eksikliğiyle birlikte, bu nüfus artışının beton da dahil olmak üzere inşaat malzemeleri talebinde bir artışa neden olacağı beklenmektedir [38]. Giderek artan ihtiyacı daha çevreci malzemeler ile karşılamak araştırmacıların dikkatini çeken bir konu olmuş, AEM'lerin alkaliler ile aktif edilmesi yoluyla elde edilen yeni nesil bir bağlayıcı malzeme fikri ortaya çıkmıştır: alkali-aktif malzemeler. AAM kullanıldığında PÇ'ye kıyasla CO₂ emisyonunda meydana gelecek tahmini azalım, AAM karışım tasarımlarının seçimine, kür koşullarına, referans olarak seçilen PÇ sisteminin yapısına bağlı olarak %9 ile %97 arasında değişmektedir [12]. Bu oranlar konuma, karışım tasarımına ve istenen amaç doğrultusunda seçilen malzemeye bağlı olduğundan PÇ ile üretilen betona kıyasla AAM'lerin kullanılmasıyla meydana gelecek emisyon azalım oranını doğru bir şekilde temsil eden tek bir sayı vermek imkansızdır. Alkali aktivasyon teknolojisinin çevresel değerlendirmesini etkileyen bir başka önemli konu, özellikle aktivatör olmak üzere hammaddelerin tedariki ile ilgilidir [13]. Aktivatörlerin, özellikle en yaygın olarak, sodyum karbonat ve silisten yüksek sıcaklıklı bir işlem ile üretilen Na₂SiO₃'ün üretimi neticesinde bazı çevresel etkiler ortaya çıkar. AAM'lerin CO₂ emisyon hesabı yapılırken aktivatör olarak kullanılan silikatın üretiminde harcanan enerji de şüphesiz dikkate alınmalıdır [42]. Na₂SiO₃ gibi üretiminde enerji gerektiren aktivatörlerin AAM üretiminde farklı aktivatörler ile belli oranlarda kullanılacağı da göz önünde bulundurulursa bir ton bağlayıcıya düşen CO₂ emisyonu PÇ'ye göre hala çok düşük kalmaktadır. Kullanılan alkali karbonatların kaynağı ve elde edilmesi için uygulanan madencilik yoluna bağlı olarak da emisyonda önemli değişiklikler olabilir. Coğrafi çeşitliliğin emisyon hesabı üzerinde net bir etkisi olduğu açıkça görülmektedir. İyi formüle edilmiş alkali-aktif bir bağlayıcı, benzer mekanik

performansa sahip PÇ'ye kıyasla CO₂ emisyonu bakımından oldukça önemli çevresel faydalar sağlayabilir [13].

2.3. Alkali-Aktif Bağlayıcıların Yapısı ve Kimyası

AAM'lerin kimyası söz konusu olduğunda öncelikle bu sistemleri yapıya hakim olan jel türlerine göre sınıflandırmak gerekmektedir. Bu ayrım, esas olarak Şekil 2.7'de gösterildiği gibi sistemdeki kalsiyum içeriğine dayanılarak yapılır. Şekil 2.7'nin [13] sağ tarafında kalsiyum yönünden fakir olan jeller gösterilmektedir. Bu jel yapıları genellikle N-A-S-(H) olarak temsil edilir. Fakat aynı zamanda sodyum, potasyum veya kalsiyum ile değişebilir. Bu nedenle daha eksiksiz bir gösterim için N, K-(C)-A-S-(H) tercih edilebilir. Şekil 2.7'nin sağ tarafındaki yolda suyun, C-A-S-H jelinin aksine bu jel yapısının önemli bir yapısal bileşeni olmadığını belirtmek için H parantez içinde gösterilmektedir. SiO₂'yi temsil etmek için S, Al₂O₃ için A, CaO için C, Na₂O için N, K₂O için K ve H₂O için H kısaltmaları kullanılmıştır.



Şekil 2.7. Katı bir AEM'nin alkali-aktivasyon süreci ve reaksiyon ürünleri [13]

Jel yapısında potansiyel olarak bulunmayan, küçük veya opsiyonel bileşenler parantez içinde gösterilmektedir. Semboller arasındaki kısa çizgiler, stokiometrik olmayan bileşikler gösterir. C-A-S-H, stokiometrik olmayan kalsiyum silikat hidratı temsil ederken, CH (tire olmadan) Ca(OH)_2 'in (portlandit) stokiometrik olarak doğru bir temsildir. C-A-S-H tipi jeller, alüminyumun yapılarında oynadığı önemli rolü vurgulamak için parantez olmadan gösterilmektedir [13, 43].

2.3.1. Düşük Kalsiyum İçeren Sistemlerin Jel Yapısı

Bu sistemler, öncelikle alüminyum ve silis içeren malzemelerin aktivasyonunu kapsamaktadır. Düşük kalsiyum içeren malzemelerin reaksiyonunu başlatmak için yüksek alkali ortam ve 60 °C ile 200 °C arasında kür sıcaklığı gibi agresif çalışma koşulları gereklidir. Bu sistemde oluşan ana reaksiyon ürünü üç boyutlu bir inorganik alkali polimer olan N-A-S-(H) jelidir. Uçucu kül ve metakaolin, alkali çimentoda en yaygın olarak kullanılan düşük kalsiyumlu malzemelerdir [16]. Fernandez-Jimenez ve Palomo [44, 45], F tipi uçucu külün AAM üretiminde kullanıma uygun olması için aşağıda belirtilen özellikleri karşılaması gerektiğini belirtmiştir.

- $\text{CaO} \leq \%10$
- $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq \%10$
- $\text{Reaktif SiO}_2 \geq \%40$
- $d_{90} \leq 45 \mu\text{m}$
- $\text{Reaktif SiO}_2 / \text{reaktif Al}_2\text{O}_3 \geq 1.5$

Fernandez-Jimenez vd. [46], N-A-S-(H) jel oluşumunu detaylı bir yapısal model ile açıklamıştır; alüminosilikat kaynağı alkali çözelti ile temas ettiğinde, başta silis ve alümin monomerleri olmak üzere çeşitli türlerde çözünür. Bu monomerler, dimerler oluşturmak için etkileşime girerler, bu da diğer monomerlerle tepkimeye girerek trimerler, tetramerler vb. yapıları oluştururlar. Çözelti doygunluğa ulaştığında, Al bakımından zengin, yarı kararlı bir N-A-S-(H) jeli bir ara reaksiyon ürünü olarak çöker. Bu oluşum reaksiyonun erken aşamalarında alkali ortamda yüksek Al^{3+} iyon içeriği ile açıklanabilir. Çünkü Al-O bağları, Si-O bağlarından daha zayıf olduğundan reaktif alüminyum, silisten daha hızlı çözülür. Reaksiyon ilerledikçe, asıl alüminosilikat kaynağındaki Si-O grubu daha fazla çözülür ve reaksiyon ortamındaki silikon konsantrasyonunu ve N-A-S-(H) jelindeki oranını yükseltir. Bu yapısal düzenleme, elde edilen çimentonun birçok fiziksel özelliğinin geliştirilmesinde etkili olan polimerin nihai bileşimini, mikro gözenek yapısını ve malzemedeki dağılımını belirler. Bu tür sistemlerdeki ikincil reaksiyon ürünleri farklı zeolit türleridir. Farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar [47–49], kür sıcaklığının ve aktivatör tipinin reaksiyonun kinetiğini etkilediğini, kür sıcaklığının artmasıyla reaksiyon derecesinin arttığını göstermiştir. Düşük kalsiyum içerikli alüminosilikat esaslı malzemelerin aktivasyonunda

oluşan ürünlerin doğası, kür süresi ve sıcaklığına göre değişir. Uzun kürleme süreleri, silis bakımından zengin ürünlerin oluşumu sağlayarak dayanımın gelişmesine katkıda bulunur.

2.3.2. Yüksek Kalsiyum İçeren Sistemlerin Jel Yapısı

Bu sistemler yüksek kalsiyum ve silis içeriğine sahip malzemelerin aktivasyonu olarak tanımlanır [16]. Yüksek kalsiyumlu bağlayıcı sistemlerin $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ oranı yaklaşık olarak 1'dir [13]. Bu sistemlerin ön önemli ve yaygın olarak kullanılan örneği YFC'nin ($\text{SiO}_2+\text{CaO}>\% 70$) orta alkali koşullar altında aktivasyonudur. Bu durumda ana reaksiyon ürünü, PÇ hidratasyonu sırasında elde edilen jele benzer bir C-S-H jeli ve yapısında küçük bir Al yüzdesini barındıran C-A-S-H jelidir [16]. Sertleştirilmiş bir bağlayıcı oluşturmak için suyla çok yavaş reaksiyona giren YFC, alkali aktivatörler vasıtası ile reaksiyonunu hızlandırarak saatler içerisinde sertleşip mukavemet kazanır. Bu süreç, inşaat malzemelerinde gerekli olan erken yaş dayanımını kazanma açısından önem arz etmektedir [13].

2.3.3. Yüksek Fırın Cürufunun Alkali Aktivasyonu

YFC'nin kimyasal kompozisyonunda, kullanılan demir cevherinin kimyasal bileşimine bağlı olarak yapısında farklı bileşenler (manganez, kükürt, titanyum) olsa da ana bileşenler genellikle CaO , Al_2O_3 , SiO_2 ve MgO olarak bilinmektedir. Yavaş bir şekilde pişirilmesinden ötürü düşük reaktif özellikte ve kristalleşme eğiliminde olan cürufun, reaktif bir malzeme elde etmek için elzem olan hızlı bir şekilde soğutulması camsı bir yapı oluşmasıyla neticelenir. Genel olarak $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ oranı yaklaşık olarak bire eşit, toplam Al_2O_3 ve MgO muhtevası %15-30 arasında olan camsı YFC'ler alkali aktivasyona uygundur [13, 50]. Genellikle indirgenmiş formda bulunan sülfür, cüruf bazlı bağlayıcıların gözenek çözeltisinde negatif bir redoks potansiyeline yol açar. Bu durum tehlikeli veya radyoaktif geçiş metallerinin hareketsizleştirilmesini içeren bazı özel uygulamalarda çok değerli olabilir [51]. YFC esaslı AAM'lerde yüksek oranlarda MgO varlığı, hidrotalsit tipi ürünlerin oluşumuyla açıklanan dayanım artışına sebep olabilir [52, 53]. Magnezyum karbonatlaşmaya karşı durabiliteyi arttırmaktadır [54]. Bu artan durabilite, 2 ile 3 arasında değişen $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranları ile oluşan hidrotalsit grubu fazlarının varlığı ile ilişkilidir [13, 55]. Hidrotalsit oluşumunun dayanımda bir iyileşmeye yol açtığı belirtilmektedir. Bunun nedeni olarak C-A-S-H jeline hidrotalsit oluşumundan ötürü daha düşük oranda Al katılması olduğu düşünülmektedir. Alüminyum içeriğinin C-A-S-H-tipi jellerin mekanik özellikleri üzerindeki spesifik etkisi henüz net olmamakla birlikte YFC'deki yüksek Al_2O_3 oranının kürlenmenin ilk zamanlarında reaksiyonun kapsamını azaltarak daha düşük basınç dayanımına sebebiyet verdiği düşünülmektedir [13, 56]. Bir dizi çalışma [57, 58] alkali aktivasyon sistemlerinde cüruf reaktivitesinin büyük ölçüde bileşen fazlarına ve camsı yapısına bağlı olduğunu göstermiştir. Bununla beraber, reaktivite ile camsı faz

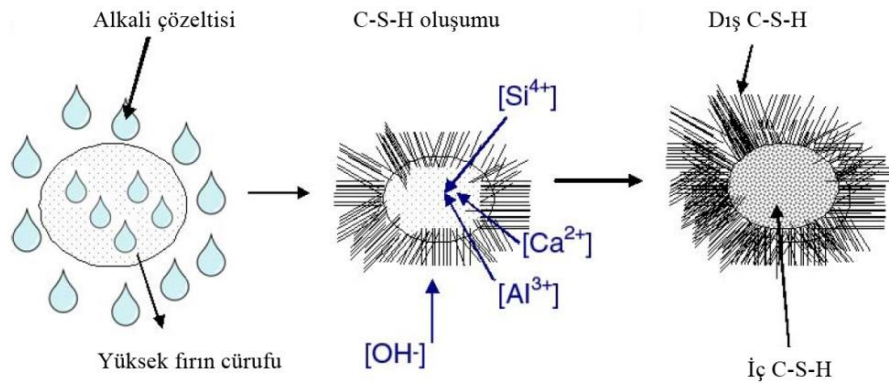
içeriği arasında doğrudan bir ilişki kanıtlanmamıştır. Bazı araştırmacılar [59] etkili cüruf aktivasyonu için camsı faz içeriğinin % 90'ın üzerinde olması gerektiğini düşünürken, bazıları [60] düşük camsı faz içerikli (%30 ila 65) cürufun da uygun olabileceğini belirtmiştir. Her halükarda, YFC reaktivitesi büyük ölçüde polimerizasyon derecesi(PD) olarak bilinen bir parametre ile tanımlanmaktadır(Denklem 2.1) [34].

$$PD = \frac{n(\text{CaO}) - 2n(\text{MgO}) - n(\text{Al}_2\text{O}_3) - n(\text{SO}_3)}{n(\text{SiO}_2) - 2n(\text{MgO}) - 0.5n(\text{Al}_2\text{O}_3)} \quad (2.1)$$

PD değeri normalde 1.3 ile 1.5 arasında değişir. Değer ne kadar yüksek olursa polimerizasyon derecesi de o kadar büyük olur ve bu da daha yüksek cüruf reaktivitesi anlamına gelir [34]. Glukhovsky ve Krivenko [61, 62], YFC gibi SiO_2 ve CaO bakımından zengin malzemelerin alkali-aktivasyonunu Denklem 2.2'deki model yardımıyla açıklamıştır.



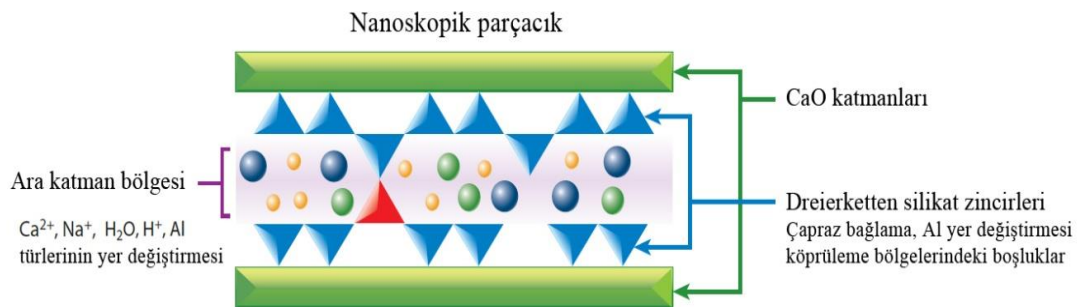
Bu denklemde alkalın katyon (R^+), Ca^{2+} iyonları ile katyonik değişim yoluyla hidrasyonun ilk aşamalarında yalnızca bir katalizör görevi görür. Reaksiyonlar ilerledikçe alkali katyonların yapıya alındığı belirtilmektedir [16]. Fernandez-Jimenez vd. [46, 63] alkali çözeltideki anyonun doğasının özellikle hidrasyonun erken aşamalarında ve çimento pastasının sertleşmesinde kilit bir rol oynadığını belirtmiştir. Reaksiyon mekanizmasına dair oluşturdukları model Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.8. Alkali-aktif YFC parçacığının reaksiyon mekanizması [16]

YFC gibi yüksek kalsiyum içeriğine sahip malzeme tabanlı AAM'lerin aktivasyonu neticesinde PÇ hidrasyon ürünlerine benzer ürünler oluşmaktadır. Oluşan ana reaksiyon ürünü ise bileşimi (daha

düşük Ca/Si oranı) ve yapısı C-S-H jelinden farklı olan C-A-S-H jelidir. Kullanılan alkali aktivatör tipi ve konsantrasyonu, YFC'nin yapısı ve bileşimi ile kür koşullarına bağlı olarak hidrotalsit, kalsit ve AFm fazı ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3\text{--mono}$) gibi ikincil ürünler oluşabilir. Al varlığı daha uzun doğrusal zincirlere yol açmasının yanı sıra aralıkli zincirler ve Si-O-Al bağı, dolayısıyla iki boyutlu yapıların oluşmasına yol açar. Bu şartlar altında C-S-H bağı C-A-S-H bağına dönüşür. PÇ sistemlerinde olduğu gibi, C-A-S-H jeli, bir dreierketten yapısına sahip tetrahedral olarak düzenlenmiş silikat zincir katmanlarını içerir. Her zincir, Şekil 2.9'da [13] gösterildiği gibi, $(3n-1)$ tetrahedra içerir. Ara tabaka bölgesi Ca^{2+} katyonları, alkaliler ve jel yapısına kimyasal olarak dahil edilen hidrasyon suyunu içerir. Bazı alkali katyonlar, tetrahedral zincir bölgelerinde Al^{3+} , Si^{4+} yerine geçtiğinde oluşan net negatif yükü de dengeler. Tobermorit benzeri yapının kısıtlamalarının meydana getirdiği kimyasal sınırlamalar nedeniyle, alüminyumun ve magnezyumun birincil bağlanma fazına alınma derecesi sınırlıdır. Dört yüzlü alüminyumun C-A-S-H zincirlerine dahil edilmesi, ağırlıklı olarak köprü yapan dört yüzlü sitelerde gerçekleşir ve alüminyum da ara katman bölgelerinde bulunabilir. Belirli yerlerde ikamenin gerçekleşmesi jelin çapraz bağlanma derecesine bağlı olarak toplam Al/Si oranına (maksimum 0.2) yapısal bir sınırlama getirir. C-A-S-H tipi yapılara Mg^{2+} 'nın iyonik yarıçapının tobermorit tipi yapıdaki Ca^{2+} bölgeleri için iyi bir eşleşme olmaması nedeniyle magnezyum katılması çok sınırlıdır. Bu nedenle, önemli miktarlarda alüminyum ve/veya magnezyum içeren YFC'nin alkali aktivasyonu, ikincil alüminyum ve/veya magnezyum açısından zengin reaksiyon ürünlerinin eşlik ettiği bir C-A-S H jeli oluşumuyla sonuçlanır [13].



Şekil 2.9. C-A-S-H jel yapısı [13]

Şekil 2.9'da mavi üçgenler, tetrahedral Si bölgelerini gösterirken kırmızı üçgen bir köprüleme bölgesinde Al ikamesini gösterir. Yeşil dikdörtgenler CaO katmanlarını, daireler ise çeşitli ara katman türlerini gösterir.

2.3.4. Portland Çimentosu ve Alkali-Aktif Bağlayıcılar Arasındaki Farklılıklar

Portland çimentosu gibi kalsiyum silikat esaslı çimentolar ile kıyas edildiğinde, AAM'lerin mikroskobik mekanizmalarla ilgili sertleşme süreci farklılıklar içerir [2]. Kullanılan kimyasal aktivatör konsantrasyonu ve miktarı reaksiyonun kimyasında oluşan bileşiklerin özelliklerini etkiler [64]. AAM'lerin kimyasal aktivasyonla uyarılmasında suyun rolü PÇ hidratasyon sisteminde olduğundan farklıdır. Su, kimyasal olarak aktifleştirilmiş bağlayıcı sentezi sırasında çözünme, hidroliz ve yoğunlaşma reaksiyonlarında yer alır. Su, alüminosilikatların çözünmesi ve çeşitli iyonların transferi, Al^{3+} ve Si^{4+} bileşiklerinin hidrolizi ve farklı alüminat ve silikat hidroksil türlerinin yoğunlaşması için ortam sağlar [65]. Tablo 2.3 kimyasal bir bakış açısıyla PÇ ve AAM arasındaki önemli kimyasal farkları göstermektedir.

Tablo 2.3. PÇ klinkeri ile AAM arasındaki kimyasal farklılıklar [2]

	Alkali-aktif bağlayıcı	PÇ klinkeri
Ham malzeme	Alüminosilikat esaslı malzeme+alkali aktivatör	Kalsiyum silikat/kalsiyum alüminat+su
Reaksiyon Ürünleri	Alüminosilikat jel	CSH, CAH, CAFH, $Ca(OH)_2$
XRD şablonu	Ağırlıklı olarak küçük kristal faz	Amorf CSH ve kristal fazlar $[Ca(OH)_2]$
FTIR şablonu	Si-O tepe noktası ($970-1030\text{ cm}^{-1}$) Si-O-Si(Al) tepe noktası (720 cm^{-1}) döngüsel silikat tepe noktası (590 cm^{-1})	Si-O tepe noktası ($970-1030\text{ cm}^{-1}$)

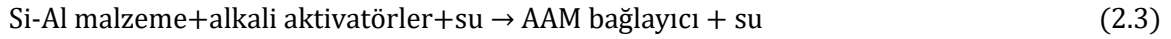
Alüminosilikat esaslı ham maddenin türü ve kimyasal bileşimi, AAM'leri harekete geçirerek, kimyasal reaksiyon ve sertleşme sürecini sağlar [2]. Kimyasal aktivatör, reaksiyon sürecinde katalizör görevinin yanı sıra ürünlerin nihai bileşimine de katılarak, karmaşık ve farklı bir reaksiyon ürünleri yapısının oluşmasına katkıda bulunur [66].

2.4. Alkali-Aktif Bağlayıcıların Bileşenleri

AAM'nin özellikleri, kullanılan alüminosilikat esaslı malzemeden büyük ölçüde etkilenir. AAM, bir tek malzemeden üretilbileceği gibi farklı malzemeler ile ikili veya üçlü kombinasyon şeklinde de üretilir. Alkali-aktif bağlayıcı ile geleneksel Portland çimentosu arasındaki en belirgin fark, Portland çimentosunun sertleşmesi için yalnızca su yeterliyken alkali aktivasyon için bir alkali aktivatöre ihtiyaç duyulmasıdır. Bu nedenle, kullanılan alkali aktivatörlerin AAM'nin özellikleri üzerine önemli bir etkisi bulunmaktadır [13, 67].

2.4.1. Alüminosilikat Esaslı Malzeme

AAM'lerin üretiminde kullanılan alüminosilikat esaslı malzemelerin çoğu PÇ betonlarında mineral katkı malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Si ve Al bakımından zengin amorf malzemeler alkali aktivasyon için temel gereksinimdir. Bununla birlikte metakaolin, uçucu kül, YFC, kaolinit killeri ve kırmızı çamur gibi malzemeler AAM üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Al-Si içeren malzemelerin alkali metallerle reaksiyona girdiği ve bir polimer ürünü ürettiği polimerizasyon işlemi Denklem 2.3'te gösterilmektedir [35, 68].



Alkali aktivasyon reaksiyonları; AEM'nin inceliğine ve kimyasal bileşimine bağlıdır. Genellikle amorf yapıda olan YFC, uçucu kül ve metakaolin gibi kalsine edilmiş malzemeler, kalsine edilmemiş malzemelere kıyasla reaksiyon sırasında yüksek reaktivite özelliği gösterir. Daha önceki çalışmalarda esas olarak YFC, uçucu kül ve metakaolin gibi öncüller AAM üretimi için kullanılmıştır. Fakat son yıllarda yapılan çalışmalar ile öncüllerin kaynaklarının ve türlerinin genişlemiş olduğu görülmektedir. Alkali aktivasyon öncülü olarak üzerinde çalışılan diğer malzemeler aşağıdaki gibidir [35].

- Boksitten alüminyum üretimi sırasında ortaya çıkan ve bir atık malzeme olan kırmızı çamur
- Manganez cevherinden demir üretimi esnasında atık olarak elde edilen siliko manganez cürufu
- Kömür kazısı ve yıkama sırasında boşaltılan bir maden atığı olan gang kömür
- Petrol rafinelerinin katalizör kalıntıları
- Termik santrallerde elektrik üretmek için yakılan kömür fırının altında kalan taban külü
- Elektrik üretmek için veya başka sebeplerden ötürü yakılan pirinç kabuğu külü
- Palmiye yağı endüstrisinin bir yan ürünü olan palmiye yağı yakıt külü
- Cam atığı
- Seramik atığı
- Doğal mineraller

2.4.2. Alkali Aktivatör

Alkali-aktif bağlayıcı ile geleneksel çimento arasındaki en belirgin fark, PÇ'nin sertleşmesi için yalnızca su yeterliyken, alkali aktivasyon için sulu formda bir alkali bileşene ihtiyaç duyulmasıdır [2]. Bu başlık altında ele alınacak çözeltiler, hidroksitler ve konsantre alkali metal silikatlardır. Alkali aktivasyon reaksiyonunu başlatmak için en az bir tane kimyasal aktivatör gerekir. İlk çözünme aşaması için pH değeri 13'ün üzerinde alkali hidroksitler ve/veya silikatlar gereklidir. NaOH ve Na₂SiO₃, tek başına veya karışım olarak en sık kullanılan aktivatörlerdendir. Bununla

birlikte, potasyum hidroksit ve potasyum silikat da kullanılmaktadır [2, 69]. NaOH, ulaşılabilirliği ve düşük viskozitesi nedeniyle AAM'lerde en çok kullanılan aktivatördür. Özellikle reaksiyonların başlangıcı ve gelişimi ile gözlemlenebilir zeolitik yapıların oluşumu için varlığının gerekli olduğu bilinmektedir. NaOH ve reaktif katı parçacıklar arasında artan temas, çözünme sırasında daha çok silikat ve alüminat monomer salınımı ile sonuçlanır [70]. Aktivatör olarak kullanılan NaOH'un konsantrasyonu AAM'lerde önemli bir parametredir. Alüminosilikat esaslı malzemelerden Si ve Al çözünmesini belirlemesi bağlayıcının dayanımını da etkileyeceği anlamına gelir [71]. Düşük konsantrasyon güçlü kimyasal reaksiyonunu engellerken, yüksek konsantrasyon silisin zamansız koagülasyonuna sebep olur [72]. Potasyum hidroksit, özel uygulamalarda bir miktar kullanım görmektedir [73]. Alkali silikatlar genellikle karbonat tuzları ve silisten eritilerek cam şekline getirilerek üretilir. Bu cam daha sonra viskoz, yapışkan bir çözelti oluşturmak suretiyle sıcak suda çözülür [74]. Alkali metal silikatlar, polimerizasyon reaksiyonunda önemli bir rol oynar. Çözelti olarak kullanılan Na_2SiO_3 , AAM üretiminde net bir şekilde en çok kullanılan alkali metal silikattır. Genellikle Al^{3+} gibi çözünmüş katyonlarla reaksiyona girip çözünmez silikatlar oluşturarak silika jelinin oluşumunu sağlar [69]. Lee ve Van Deventer, silikatların etkisini araştıran çalışmalarında uçucu kül esaslı AAM'lerde, alüminosilikat çözülmesinde dikkate değer bir artış olduğunu belirtmiştir [75]. Brough ve Atkinson [76], Na_2SiO_3 ile aktif hale getirilmiş cüruf üzerine yaptıkları çalışmada, daha yüksek erken dayanımın yanı sıra daha düşük gözeneklilik ile daha amorf ürünler elde etmişlerdir. Bu sonuçları destekleyen başka çalışmalar da mevcuttur [48].

Potasyum silikat çözeltileri, sodyum silikatlardan (molar bazda karşılaştırılabilir bileşimlerde) çok daha düşük bir viskozite sergiler. Bu fark, çözeltilerin her birinde bulunan katyonların hidratasyon özellikleri dikkate alınarak kavramsallaştırılabilir. Na^+ , ilk hidratasyon kabuğunda yaklaşık 6 koordinasyon numarası alma eğiliminde olan orta derecede güçlü bir hidratlanmış katyondur. Bununla birlikte, uçucu kül veya metakaolinden AAM üretimi için silika modülü (Ms) 1 olan sodyum silikat çözeltisinde (5 molal Na_2O), Na^+ başına yaklaşık 5.5 molekül su mevcuttur. Bu su miktarı, mevcut tüm Na^+ katyonlarını tamamen hidratlamak için yeterli değildir. Silikat anyonlarla bir miktar iyon eşleşmesi gerçekleşecek olsa da böyle bir çözeltideki serbestçe hareket eden su moleküllerinin sayısının sıfıra yaklaşacağı söylenebilir. Bu nedenle, sulu çözelti kimyasının hakkında bilinenler bu gibi durumlarda geçerli olmayabilir, çünkü hareketi çok kısıtlı olduğunda suyu bir çözücü olarak tanımlamak mümkün değildir. Bahsedilen durumdaki bir çözelti, nano yapısal düzeyde bir iyonik sıvıya daha yakın olabilir ve büyük miktarlarda silis de mevcut olduğunda çok yüksek viskozitelerden kısmen sorumludur. Bunun aksine, nispeten zayıf hidratlanmış bir katyon olan K^+ , suyun hareketini Na^+ ile aynı ölçüde kısıtlamaz, bu nedenle konsantre bir potasyum silikat çözeltisi daha rahat bir şekilde akabilir [13]. Potasyum silikat çözeltilerinin yüksek maliyeti, özellikle ticari üretimde yaygınlaşmasını engellemiş ve kullanımlarını yalnızca laboratuvar çalışmaları ile sınırlamıştır [2].

2.5. Alkali-Aktif Bağlayıcıların Endüstrileşmesi

AAM'lerin inşaat sektöründe bağlayıcı malzeme olarak kullanılması için aşması gereken birtakım zorluklar vardır. Bu zorluklar AAM'lerin teknik özelliklerinden ziyade yeni bir endüstrinin kurulmasına dair endişe ve güvensizliklerdir. AAM'lerin bir bağlayıcı olarak kullanılmasında önemli eşiklerden biri de standartlaşma sürecidir. Bu başlık altında temel zorluklar ve engellerin yanı sıra, AAM'lerin üretim ve standartlaşma süreçleri ele alınacaktır.

2.5.1. Temel Zorluklar, Engeller ve Teşvikler

Bazı araştırmacılar yüksek dayanım elde etmek için yüksek sıcaklık kürünün gerektiğini öne sürse de yüksek sıcaklık kürü uygulanmadan da yüksek mukavemet elde edildiği görülmektedir. Uygun şekilde tasarlanmış AAM oda sıcaklığında veya oda sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda da prizini tamamlayıp sertleşebilir [5, 77]. Alkalilerle aktif hale getirilmiş bağlayıcıların geliştirilmesinde ve pratikte uygulanması noktasında soru işaretlerinin tam olarak henüz giderilmediği teknik husus dayanıklılık konusudur. Fakat AAC bağlayıcılarının uygun kütleme rejimlerinin uygulanmasına bağlı olarak durabilitesinin artırılabilceği bilinmektedir [5, 78, 79]. Bunun yanı sıra Bir pH tamponu sağlamak için mevcut kalsiyum rezervuarı olmadığından alkali-aktif sistemlerde karbonatlaşma sorunlu olabilir. O halde dayanıklılık performansının, kompakt ve rafine bir gözenek yapısının geliştirilmesine büyük ölçüde bağlı olduğu söylenebilir [5, 80].

Alkalilerle aktifleştirilen bağlayıcıların endüstriyel ölçekte üretiminin karşı karşıya olduğu temel engeller büyük ölçüde teknik konulardan bağımsızdır. Önemli problemlerden biri geçmişte inşaat endüstrisindeki uygulamalarla bağlantısı olmayan alkali tedarikçilerine güvenme dahil olmak üzere tedarik zincirinin kontrolü hususundaki endişedir. Diğer bir önemli husus ise Portland çimentosu endüstrisinin halihazırda kullandığı mineral katkı malzemelere olan talebin yaratacağı rekabettir. Üretiminin çok olduğu bazı ülkelerde ise bu sorun aşılmayacak bir problem değildir. Alkali aktivasyon teknolojisine geçmeye yönelik en önemli teşvik küresel ölçekte atmosfere salınan CO₂'nin %8'inden sorumlu olan PÇ üretimini azaltılarak küresel ısınmayı engelleme konusunda sunacağı katkıdır. Bunun yanı sıra özellikle kimyasal saldırılara ve yüksek sıcaklıklara dayanıklılık açısından alkali-aktif malzemelerle elde edilebilen yüksek teknik performans, kanalizasyon boruları gibi özel uygulamalarda veya yangına dayanıklılık performansına ihtiyaç duyulan yerlerde cazip olanaklar sunabilir [8, 30, 81, 82].

2.5.2. Üretim Süreci, Uygulanması ve Yatırım Maliyeti

Kısa vadede, AAM betonların üretimini mümkün kılmak için yeni tesislerin baştan inşa edilmesi çok elzem değildir. AAM betonların karıştırılması ve dökümü için karıştırma enerjisi ve aktivatör dozajını optimize etmek suretiyle yapılacak küçük değişikliklerle PÇ betonları için kullanılan

teknoloji iş görebilir. AEM'ler ve aktivatörler ise mevcut tesisler kullanılarak üretilip hazırlanabilir. AEM üretimi için döner fırınlar şart değildir. AEM'lerin öğütülmesi gerekmektedir. Bu bağlayıcıları üretmek için gerekli olan tesisler PÇ üretmek için ihtiyaç duyulan tesislerden daha azdır ayrıca çok yüksek sıcaklıklara gerek duyulmadığından fosil yakıtlardan ziyade elektrik enerjisi yeterli gelmektedir [8].

AAM betonların karışım tasarımı, özellikle agrega sınıflandırması açısından PÇ betonları için kullanılanlara benzer şekillerde kullanılabilir ancak bağlayıcı mevcut duruma göre tasarlanıp optimize edilmelidir. Herhangi bir lokasyonda mevcut olan AEM'nin kimyası, mineralojisi ve inceliği farklılık gösterebilir. Aktivatörler de teknik ve ticari kaygılar gözetilerek seçilmelidir. Malzemeler arasındaki farklılıklar nedeniyle (kimyası, mineralojisi, inceliği) alkali-aktif bağlayıcılara veya betonlara uygulanabilecek evrensel bir karışım tasarım prosedürü henüz yoktur. Bu nedenle karışımların optimizasyonu her öncü malzeme için ayrı ayrı yapılır [8]. AAM'lerin sertleşme süreleri genel olarak PÇ esaslı malzemelerinkine benzerdir. Fakat, AAC'ler oldukça hızlı sertleşme eğilimindedir ve bazı durumlarda priz oranlarını düzenlemek için geciktiriciler kullanılabilir. Uçucu kül tabanlı bağlayıcı malzemelerin sertleşmesi için ise ısıya ihtiyaç duyulur. Kalsiyum içeriği yüksek olan uçucu küller ise ortam sıcaklığında da sertleşebilir. Genellikle en tercih edilen kürleme kapalı kürlemedir. Suda kür durumunda aktivatör süzülüp mukavemet gelişimini sınırlandırabilir. Ortam şartlarında herhangi bir işlem uygulanmadan kür edilmesi de yüzey çatlamasına sebep olabilir. Bununla beraber prekast üretim için buharla kürleme tercih edilir. AAM'lerin pratikte kullanımında karşılaşılmaması muhtemel ana zorluk, bu sistemlerde reoloji kontrolü için etkili katkıların geliştirilmesi veya tedarik edilmesiyle ilişkili zorluktur [8].

İlk çabalar, performansta bazı gelişmeler sunan organik bileşiklerin geliştirilmesine yol açsa da PÇ betonlarında süperakışkanlaştırıcıların sağladığı reoloji seviyelerinden çok uzak olmuştur. Alkali-aktif bağlayıcılarda çözelti katı arayüzünün daha ayrıntılı karakterizasyonuna duyulan ihtiyaç, bu bağlamda performansı iyileştirmenin anahtarı olarak belirlenmiştir. Mevcut şartlarda işlenebilirliğin kontrolü, istenen sonuçları elde etmek için karışım tasarımlarını değiştirme ve optimize etme becerisine dayanmaktadır. AAM'lerin üretim maliyeti temelde üreticinin malzeme tedarik zincirinin kontrol derecesine bağlıdır. Uçucu kül ve YFC gibi öncüllerin PÇ'nin birim fiyatına benzer bir fiyattan satın alınması gerekiyorsa, aktivatörün ek maliyeti bu malzemeleri nispeten daha pahalı hale getirecektir. Bununla birlikte, katı öncüller yerel olarak ve uygun maliyetli olarak elde edilebilirse ve aktivatör dozları düşük tutulursa, alkali ile aktifleştirilen bağlayıcıların maliyet açısından rekabetçi üretimi mümkün olabilir [8, 83, 84].

Demir-çelik endüstrisinin yan/atık ürünü olarak ortaya çıkan yüksek fırın cürufu karayolu inşaatında dolgu malzemesi, beton üretiminde agrega, çimento üretiminde katkı malzemesi, demiryolu inşaatında balast malzemesi olmak üzere inşaat sektöründe halihazırda kullanılmaktadır. Çevre ve Şehircilik bakanlığı [17] 2014 yılından itibaren cüruf için birim fiyatı listesi yayımlamaya

başlamıştır. Bu durum cürufun 2014 yılından önce ticari değerinin yüksek olmadığına işaret etmektedir. 2020 yılında ilan edilen birim fiyat listesinde demir cürufu karışık agreganın m³ fiyatı 10.35 TL olarak görülmektedir. Cürufun birim fiyatı Türkiye’de demir-çelik endüstrisinden elde edilen cüruf için yüksek pazar rekabetinin olmadığına işaret etmektedir. Bu durum YFC’nin AAM üretimi için ideal bir malzeme olabileceğini göstermektedir.

2.5.3. Standartlaşma Süreci

AAM’ler ile ilgili standardizasyon çabaları farklı alanlara nispeten hızlı ilerlemektedir. İsviçre’de[8, 85] AAM, ilgili ulusal kılavuzlarda yerini almıştır. Birleşik Krallık’ta ise alkali-aktif çimentolar ve betonlar için kamuya açık bir şartname 2016 yılında yayımlanmıştır [8]. ASTM ise AAM’nin performansa dayalı standart altında kullanabileceğini belirtmiştir [86]. Bu malzemelere özgü ilave test standartları geliştirme aşamasındadır [8]. Çin’de, GB/T 29423-2012 standart, kimyasal direnç uygulamaları için AAM’nin kullanımını açıklamaktadır. Rusya, Ukrayna ve Bağımsız Devletler Topluluğu ülkelerinde AAC betonları için uzun zamandır yürürlükte olan kapsamlı bir normatif standartlar seti vardır. Avustralya’nın Victoria eyaleti Eyalet Karayolları Otoritesi (VicRoads), AAM betonları açıkça içerecek şekilde standart özelliklerinin dördünü güncellemiştir [8].

3. LİTERATÜR İNCELEMESİ

AAM üretmek için YFC'nin kullanılması, çevresel faydaların yanı sıra PÇ'ye göre bazı önemli teknik avantajlar sunmaktadır. Bu avantajlar erken mekanik dayanım gelişimi, düşük gözeneklilik, daha düşük hidrasyon ısı ve daha iyi durabilite olarak belirtilmektedir. Bununla birlikte yüksek büzülme, hızlı priz alma ve çiçeklenme gibi bazı dezavantajları olduğu da ifade edilmektedir. PÇ ile harmanlanmış AAM'ler yenilikçi bir alternatif olarak kabul edilmektedir. Bu tür malzemeler, yüksek oranda endüstriyel yan ürünlerin düşük oranlarda (≤ 30) PÇ ile harmanlanması ve alkaliler ile aktif hale getirilmesi ile elde edilmektedir. Alkali-aktif Portland çimento ikameli bağlayıcıların erken yaşlarda bile iyi mekanik özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Bu başlık kapsamında YFC tabanlı alkali-aktif çimentoların mekanik ve durabilite özelliklerini araştıran çalışmalar incelenmiş, vurgulanan kısımlar bir bütünlük içerisinde ilgili alt başlıklar altında aktarılmıştır [14, 18, 19].

3.1. Alkali-Aktif Cürufun Mekanik Özellikleri

Bakharev vd. tarafından cürufun alkali aktivasyonu üzerine yapılan çalışmada Na_2SiO_3 'ün basınç dayanımı açısından NaOH ve sodyum karbonat aktivatörlerine göre en iyi aktivasyonu sağladığı bildirilmiştir [87]. AAC harçlarının mekanik özelliklerini inceleyen Jimenez vd. Na_2SiO_3 solüsyonunun en yüksek mekanik mukavemeti verdiğini, diğer önemli faktörlerin ise aktivatörün konsantrasyonu, kür sıcaklığı ve cürufun inceliği olduğunu belirtmiştir [88]. Shariati vd. AAC hamuru üzerine yaptıkları çalışmada aktivatör olarak farklı oranlarda SS/SH kullanmış, optimal SS/SH oranının 2.5 olduğunu belirtmişlerdir [89]. Aktivatörün AAC harcının dayanımı ve kuruma büzülmesi üzerindeki etkisini inceleyen Atiş vd. en yüksek basınç ve eğilme dayanımını elde etmek için Na_2SiO_3 solüsyonunun optimum bir $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı olduğu sonucuna varmıştır [90]. Aydın ve Baradan aktivatör çözeltisinin $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranının AAC'nin özellikleri için büyük önem taşıdığını belirtmiştir. Belirttikleri diğer önemli nokta yaklaşık 100 MPa basınç dayanımına sahip PÇ içermeyen yüksek performanslı kompozitin, YFC'nin sıcaklık kürüne ihtiyaç duymadan aktivasyonu ile kolayca elde edilebileceği olmuştur. AAC bağlayıcısının PÇ'ye alternatif olma konusunda muazzam bir potansiyele sahip olduğu vurgulanmıştır [14]. Gao ve arkadaşlarının çalışmalarından aldıkları sonuç hem silika modülünün hem de alkali aktivatör konsantrasyonunun erken dayanım üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, sıvı/katı oranının etkisinin ise sınırlı kaldığı yönünde olmuştur. Karışımın tasarım parametrelerinin ayarlanarak, AAC'lerin erken yaş performansının etkili bir şekilde geliştirilebileceği belirtilmiştir [91]. Bir başka çalışmada ise aktivatörün yüksek sodyum yüzdesinin daha yüksek bir dayanım elde ettirmesine rağmen, işlenebilirlik ve sertleşme sürelerinin ani reaksiyona ve Na_2SiO_3 solüsyonu ile aktif hale getirilen cürufun hızlı sertleşmesine bağlı olarak hızla azaldığı belirtilmiştir [92].

Chi vd. kür sıcaklığının AAC harçları üzerindeki etkisini inceleyebilmek için AAC numunelerini üç farklı kür sıcaklığına maruz bırakmıştır: 23, 65 ve 85 °C. 65 °C ve 85 °C’de kürlen numunelerin 3 günlük basınç dayanımının 23 °C’de kürlen numunelere kıyasla yüksek olduğu buna karşın 28 ve 56 günlük basınç dayanımlarının tüm kür sıcaklıklarında hemen hemen aynı olduğu ifade edilmiştir [93]. Benzer şekilde Bakharev vd. 60 °C kürlenme sıcaklığının AAC dayanımının erken yaşta hızla artmasına, ancak ileriki yaşlarda azalmasına neden olduğunu bildirmiştir [94]. Collins ve Sanjayan tarafından yapılan farklı çalışmalarda AAC betonunun erken yaşta dayanımı, işlenebilirliği ve mekanik özellikleri incelenmiştir. PÇ betonu ile elde edilen bir günlük basınç dayanımının, tek bağlayıcı olarak AAC ile elde edilebileceği ifade edilmiştir [95, 96]. Puertas vd. farklı karışım yüzdelerinde alkali-aktif YFC/PÇ numunelerinin, %100 PÇ içeren numunelerden daha yüksek basınç ve eğilme dayanımına sahip olduğunu belirtmiştir [20]. Bu sonuç, Angulo-Ramirez vd. tarafından yapılan çalışmayla tutarlıdır [19]. Angulo-Ramirez vd. AAM üretiminde YFC ve PÇ’yi sırasıyla %80 ve %20 oranında kullanmıştır. Hazırlanan karışım, Na_2SiO_3 ve NaOH ile aktif hale getirildiğinde %100 PÇ’den üretilen referans karışıma kıyasla çok daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Benzer sonuçların elde edildiği bir diğer çalışmada, karışımlar alkalilerle aktif hale getirildiğinde, çok düşük PÇ (%20) ve yüksek YFC (%80) içeriğine sahip bağlayıcıların üretilbileceği vurgulanmıştır. Aynı zamanda, harmanlanmış çimentoların erken yaşta iyi mekanik gelişim gösterdiği belirtilmiştir [18]. Zhang vd. ağırlıkça %10, 20 ve 30 PÇ içeriklerinde alkali-aktif YFC/PÇ bağlayıcılarının performansını incelemiştir. 20 °C kür sıcaklığında, alkali-aktif YFC/PÇ bağlayıcılarının basınç dayanımının PÇ’ninkinden her yaşta (1, 3, 7 ve 28 gün) daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. Basınç dayanımlarındaki farkın özellikle ilk günlerde daha belirgin olduğu belirtilmiştir. Basınç dayanımı açısından, YFC’nin PÇ’ye optimal oranı, alkali-aktif YFC/PÇ bağlayıcısında ağırlıkça %80/%20 olmuştur [97]. Yadollahi ve Dener tarafından ferrokrom cüruf tabanlı alkali-aktif çimentolar üzerine yapılan çalışmada basınç dayanımında PÇ ikamesinin %15’ine kadar önemli artışlar meydana geldiği, %20 PÇ ikamesinden sonra basınç dayanımının önemli ölçüde azaldığı belirtilmiştir [98].

3.2. Alkali-Aktif Cürufun Durabilite Özellikleri

Betonun geçirgenliği, dayanıklılığını belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Tasarım sırasında betonun olabildiğince az geçirgen olmasını sağlamak için önlemler alınmaktadır. Birkaç çalışma, AAC’nin PÇ betonuna kıyasla daha düşük bir geçirgenliğe sahip olduğunu göstermiştir [99, 100]. Bununla beraber, AAC’nin PÇ betonuna kıyasla daha geçirgen olduğunu belirten çalışmalar da mevcuttur [101, 102].

Sülfat saldırısı, betonun dayanıklılığını tehdit eden en büyük sorunlardan biridir. Beton, yüksek seviyelerde sülfat içeren topraklarda sülfat saldırısına maruz kalabileceği gibi farklı sülfürik kaynaklarla sürekli temas halinde olabilir [103]. Önceki çalışmalar, sülfat saldırısının betonda

genleşme, çatlama ve dökülmeye, dolayısıyla dayanım kaybına neden olabileceğini göstermiştir [104–106]. %100 PÇ ile üretilen betonda, PÇ'nin yüksek C₃A içeriği nedeniyle sülfat saldırısının sorunlu olduğu belirtilmektedir. O halde PÇ içermeyen veya düşük oranda PÇ içeren YFC tabanlı AAM'nin sülfat saldırısına karşı daha iyi durabilite göstermesi beklenebilir. AAC'nin Na₂SO₄ saldırısına, MgSO₄ saldırısına göre daha dayanıklı olduğu konusunda fikir birliği bulunmaktadır [22, 103, 107]. MgSO₄ saldırısının bir sonucu olarak, C-A-S-H yoğun bir dekalsifikasyon ve silikat polimerizasyonuna uğrar. Bu işlemle, C-A-S-H'nin M-A-S-H ve/veya silika jellerine dönüşmüş olabileceği düşünülmektedir. Aksine, Na₂SO₄'e maruz kaldığında, AAC'nin jel yapısında, zararlı etrenjit ve alçıtaşı'nın düşük oranda çökmesiyle fazla bir bozulma meydana gelmez [108]. Gong ve White, bu farkın sülfat tuzlarındaki katyon tiplerinin (Na⁺, Mg²⁺, H⁺) AAC'nin gözenek çözeltisinin PH değerini değiştirme kabiliyetiyle ilişkili olduğunu belirtmiştir [107]. Ye vd. farklı aktivatör bileşimleri ile üretilen AAC hamurunu %5 konsantrasyonlu Na₂SO₄ ve MgSO₄ solüsyonlarına maruz bırakmış ve Na₂SO₄ saldırısı sonucu etrenjit oluşumunun ve bileşimsel değişimin önemli olmadığını belirtmiştir. Bununla birlikte, MgSO₄ saldırısı sonrasında sertleşmiş AAC hamurunda brusit, alçıtaşı ve M-A-S-H tespit edilmiştir [108]. AAM harçlarının sülfat dayanıklılığının incelendiği bir çalışmada, %100 YFC içeren numuneler altı ay boyunca %10 konsantrasyonlu Na₂SO₄ çözeltisinde bekletildiğinde basınç dayanımında %52.72 artış kaydedilirken, aynı süre boyunca %10 konsantrasyonlu MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin dayanımında %48.9 azalma kaydedilmiştir. Ayrıca MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin, Na₂SO₄ çözeltisindekilere kıyasla kütle ve uzunluğunda daha fazla değişim meydana geldiği belirtilmiştir [109]. Bir başka çalışmada, %10 konsantrasyonlu MgSO₄ çözeltisinde bekletilen AAC numunelerinin ağırlığında önemli bir artış rapor edilmiştir [110]. Bu sonuçlarla tutarlı olarak diğer bir çalışmada %5 konsantrasyonlu MgSO₄ çözeltisinde bekletilen AAC numunelerinde aşırı fiziksel bozulmanın gözlemlendiği, ancak %5 konsantrasyonlu Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerde fiziksel bozulmanın meydana gelmediği belirtilmiştir [111]. YFC tabanlı AAM'ler, yüksek sıcaklık direnci açısından oldukça rekabetçi bir malzeme olarak dikkat çekmektedir [98, 112, 113]. AAC yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, jeldeki zayıf bağlanmış suyun hızlı dehidrasyonu bağlanma yapısına önemli ölçüde zarar vermeyerek mekanik özelliklerin daha iyi korunmasını sağlar [112]. Esasında her tür beton yüksek sıcaklığa karşı dayanıklıdır. Geleneksel betonda, 800 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, C-S-H ve betonun diğer bileşenleri de dahil olmak üzere kristal hidratlardan nem kaybının bir sonucu olarak ayrışma meydana gelir. AAC'deki nanogözenekler sayesinde, nem aşırı sıcaklıklarda betonu terk etmenin bir yolunu bulur, böylece alüminosilikat ağda herhangi bir hasar meydana gelmez [103]. Li, 800 °C'den yüksek bir sıcaklığa maruz kaldığında geleneksel betonda geniş yüzey çatlakları ve şiddetli dökülmeler meydana geldiğini, AAC betonunda ise küçük çatlaklar olduğunu ancak dökülme olmadığını bildirmiştir [114]. Rovnanik, AAC hamur numunelerini 1200 °C'ye varan sıcaklıklara

maruz bırakmış ve 800 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra basınç dayanımında önemli bir düşüş meydana geldiğini belirtmiştir. 1000 °C ve 1200 °C'de numunelerin basınç dayanımında daha fazla azalma meydana gelmemiştir [113]. AAC harcı üzerinde yapılan başka bir çalışmada, basınç dayanımında en yüksek düşüşün meydana geldiği sıcaklık değerinin 800 °C olduğu belirtilmiştir [115].

Alkali silika reaksiyonu (ASR) nedeniyle meydana gelen genleşmeleri azaltmak için PÇ betonunda cüruf kullanılsa da ASR reaktif agregalarla yapılan AAC'nin durabilitesi hakkında henüz bir fikir birliği yoktur. AAC'deki yüksek cüruf ve doğrudan olan kalsiyum içeriği ile AAC'nin ASR'ye dayanıklı olması beklense de Bakharev vd., AAC'nin ASR'ye karşı dayanıklılığın PÇ betonlarına göre daha düşük olduğunu belirtmiştir [116]. AAC'nin ASR'ye dayanıklı olduğunu belirten araştırmacılar bu dayanıklılığın, hidrasyon ürünlerine bağlanan gözenek çözeltisindeki alkalilerden kaynaklandığı öne sürmüştür. Bir başka deyişle, reaktif agregalarda silikayı çözmek için yeterli alkali olmadığı savunulmuştur [116, 117]. Bununla birlikte, bunun nasıl olduğu ve hidrasyon ürünlerine bağlı alkali miktarı hakkında açıklayıcı ifadeler bulunmadığı için bahsedilen yargı ikna edici bulunmamaktadır [103].

AAC'nin PÇ'ye kıyasla asit saldırısına karşı daha yüksek dirence sahip olduğu bilinmektedir [118]. Bununla birlikte AAC'nin asidik ortamlardan etkilenmediğini söylemek yanlış olur. Genel olarak AAC, düşük kalsiyum içeriği nedeniyle asit saldırısına PÇ'den daha dayanıklı bağlayıcı olarak değerlendirilebilir [103]. He vd. karbonatlaşmaya karşı dayanıklılığın AAC'nin dayanımı ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. 30 MPa'dan daha düşük basınç dayanımına sahip bir betonun hızlı karbonatlaşmaya uğradığı ve bunun da dayanımda hafif bir azalmaya yol açtığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, 30 MPa ile 50 MPa basınç dayanımı aralığındaki AAC'nin daha az karbonatlaşmaya uğrayıp önemli bir dayanım kaybı yaşamadığı ifade edilmiştir. 50 MPa'dan daha yüksek basınç dayanımına sahip AAC'nin ise karbonatlaşmaya uğramadığı tespit edilmiştir [118]. Bakharev vd., hızlandırılmış karbonasyon testi ile her iki bağlayıcı da değerlendirildiğinde AAC'nin karbonatlaşma oranının PÇ'ninkinden daha hızlı olduğunu ifade etmiştir. Bununla birlikte, AAC'nin karbonatlaşma hızının, doğal karbonasyona maruz kalındığında PÇ'ninkinden çok az yüksek olduğu belirtilmiştir [116].

Donma ve çözülme, iç çatlaklara, genişlemeye ve ağırlık kaybına yol açtığı için beton için zararlıdır. AAC'nin gözenek çözeltisindeki yüksek elektrolit konsantrasyonu ve düşük su talebi, AAC'nin donma ve çözülme döngüsüne dayanıklı olmasını sağlar [119]. Hava sürükleyici katkısı olmayan AAC'nin donma ve çözülme karşı yüksek durabiliteye sahip olduğu yargısı, 300 döngü tamamlanmadan bozulan PÇ numuneleri ile kıyas edilen çalışmayla desteklenmiştir [120]. Betondan serbest alkali içeren suyun dışarı sızması sonucu beton yüzeyinde oluşan beyazımsı birikintiler çiçeklenme olarak adlandırılmaktadır [121]. AAC numunesinin yüzeyinde oluşabilecek az miktarda çiçeklenme, dayanım ve dayanıklılığı için bir tehdit oluşturmaz. Bununla birlikte,

kullanılan belirli aktivatör türleri veya kür koşullarına bağlı olarak daha yüksek oranlarda oluştuğunda, AAC'nin bütünlüğü bozulabilir. Na_2SO_4 gibi çözünürlüğü az olan aktivatörler kullanıldığında veya nemli kürlemenin ardından bir kuru kürleme yapıldığında çiçeklenme oluşumu olasılığı yüksektir [103].

3.3. Kendiliğinden Yerleşen ve Hafif Agregalı ile Üretilen AAM harçları

Hafif agregalar sentetik kaynaklı olabileceği gibi süngertaşı veya vermikülit gibi doğal malzemeler de olabilir. Pomza, perlit, vermikülit gibi hafif agregaların kullanılması kompozitlerin yoğunluğunu azaltarak yapıların ölü yüklerinin azaltılmasına katkıda bulunur. Aynı zamanda daha yüksek ısı yalıtımı ve yangına karşı daha yüksek durabilite sağlar [122, 123].

Hafif ağırlıklı AAC harçları üzerine yapılan bir çalışmada aktivatör olarak Na_2SiO_3 ve NaOH karışımı, hafif agregalı olarak ise pomza kullanılmıştır. Bağlayıcı dozajının 634 kg/m^3 , süper akışkanlaştırıcının ise bağlayıcının ağırlıkça %5'i oranında olduğu belirtilmiştir. Agregalı olarak yalnızca pomza kullanmanın çok düşük basınç dayanımı, segregasyon ve kötü işlenebilirliğe yol açtığı ifade edilmiştir. Pomza agregası toplam agregalı hacminin %60'ı oranında kullanıldığında segregasyon sorununun önüne geçilmiştir. Değişen NaOH konsantrasyonlarında ve farklı $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranlarında üretilen hafif ağırlıklı harçların dayanımlarının 24 ile 32 Mpa arasında değiştiği belirtilmiştir [124]. Yang vd. genleştirilmiş hafif kil agregasının AAC betonu üzerindeki etkisini araştırmıştır. Genleştirilmiş kil agregası %0'dan %100'e olmak üzere farklı ikame oranlarında kullanılmıştır. Genleştirilmiş kil agregası oranının artmasıyla basınç dayanımının kademeli olarak 19.1'den 3.3'e gerilediği bildirilmiştir [125]. Abdulkareem vd. yüksek sıcaklıkların uçucu kül tabanlı hafif ağırlıklı alkali-aktif betonun özelliklerine etkisini inceledikleri çalışmada hafif agreganın yüksek sıcaklıklarda betonun mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediğini bildirmiştir [126]. Bir başka çalışmada PÇ ile harmanlanmış alkali-aktif hafif ağırlıklı harçların 500, 750 ve 1000 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki davranışları incelenmiştir. 500 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra, suyun buharlaşması ve çatlak oluşumu nedeniyle numunelerin basınç dayanımında bir düşüş meydana gelmiştir. 750 °C sıcaklıktan sonra çatlaklar ilerlemiş fakat matrisin yoğunlaşmasından dolayı basınç dayanımı yaklaşık olarak aynı kalmıştır. 1000 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra, numunelerin mekanik performansı gehlenit, albit ve nefelin oluşumu, matrisin yoğunlaşması ile amorf bir mikro yapıdan kristal bir mikro yapıya geçiş nedeniyle artmıştır [122]. Carabba vd. optimize edilmiş alkali-aktif hafif ağırlıklı harçların ticari çimento esaslı harçlardan daha iyi performans gösterdiğini belirtmiş [112], Zuda vd. yaptıkları çalışma ile bu yargıyı doğrulamıştır [127].

Kendiliğinden yerleşen beton, kendi ağırlığı altında akabilen, dolayısıyla sıkışık alanları ayrışmadan ve titreşime ihtiyaç duymadan dolduran bir beton türüdür. Kendiliğinden yerleşen betonda akışkanlık sağlayan harç bir nevi yağlayıcı görevi görür. Bu nedenle, harcın reolojisi

önemli ölçüde önemlidir ve birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir [128]. Abdollahnejad vd. YFC ve uçucu kül tabanlı alkali-aktif kendiliğinden yerleşen harçlar üzerine yaptıkları çalışmada kuruma büzülme oranlarının PÇ ile üretilen harçlara göre daha yüksek olduğunu belirtmiştir [129]. Ghosh ve Ghosh tarafından alkali-aktif kendiliğinden yerleşen harçlar üzerine yapılan bir çalışmada, priz süresi ve işlenebilirliğin yanı sıra mikro yapının gelişiminin temelde alkali içeriği, silika içeriği ve su/bağlayıcı oranına bağlı olduğu belirtilmiştir. Polimerizasyon işlemi sırasında AEM olarak kullanılan uçucu külü çözmek için güçlü alkali çözeltilere ihtiyaç duyulmuştur. Çözünme, polikondansasyon ve sertleşme aşamalarında suyun önemli rol oynadığı belirtilerek AAM karışımının istenen işlenebilirliği göz önünde bulundurularak su içeriğinin minimum seviyeye ayarlanması gerektiği vurgulanmıştır [130]. Genel olarak, alkali-aktif harç/betonların basınç dayanımı, kullanılan alüminosilikat öncüsünün Ca/Al oranıyla güçlü bir şekilde ilişkilendirilmiştir [130–132]. Bu oran ne kadar yüksekse, basınç dayanımı o kadar yüksek olmaktadır. Yüksek konsantrasyonda alkali aktivatörün işlenebilirlik özellikleri üzerindeki olumsuz etkisinin aksine, basınç dayanımı üzerinde olumlu bir etkisi vardır. Yüksek alkali aktivatör konsantrasyonu ile üretilen AAM dayanımının daha yüksek çıkması, daha yüksek silikat ve alüminat monomerlerinin çözünmesi sonucu daha fazla jel oluşumu ile açıklanabilir. Alkalilerin konsantrasyonun artışıyla dayanımın arttığı farklı çalışmalarda belirtilmiştir [133, 134]. Saini ve Vattipalli, NaOH aktivatörünün konsantrasyonu artırıldığında alkali-aktif kendiliğinden yerleşen harç karışımlarının işlenebilirliğinde bir düşüş olduğunu belirtmiştir [133].

Literatür incelemesinde hafif ağırlıklı agrega ile üretilen kendiliğinden yerleşen kompozitler ile ilgili çalışmalar olsa da [135–140], yazarın bilgisi dahilinde hafif ağırlıklı agrega ile üretilen kendiliğinden yerleşen alkali-aktif kompozitler ile ilgili herhangi bir çalışma mevcut değildir. Geleneksel çimentoya alternatif bir malzeme olarak düşünülen AAM'lerin arzulandığı takdirde kendiliğinden yerleşebilirlik ve hafiflik niteliklerini bir arada sağlaması PÇ'ye alternatif olarak değerlendirilmesi açısından elzemdir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

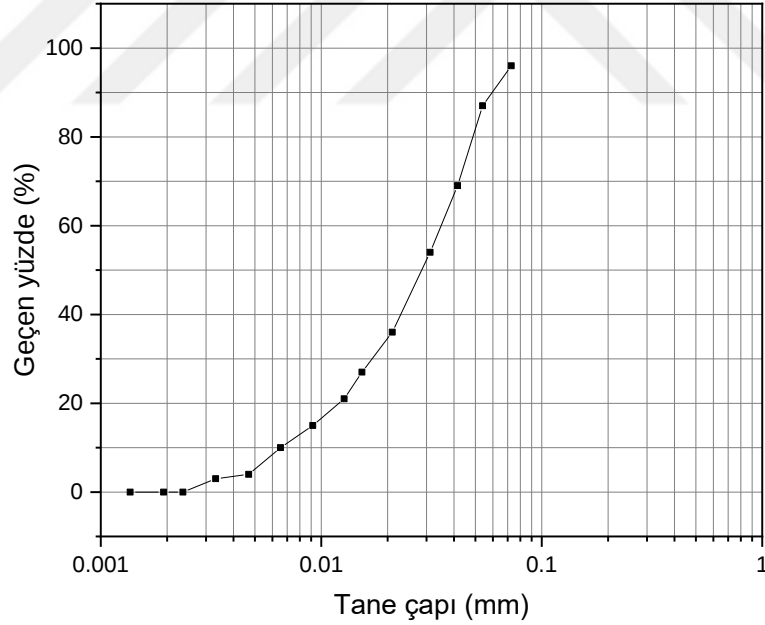
Bu bölümde kullanılan malzemelerin özellikleri, hamur ve harç karışım serileri ile uygulanan deneyler yer almaktadır. Deneysel çalışmalar Bingöl Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarı ile Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir.

4.1. Kullanılan Malzemeler

Tez çalışması kapsamında kullanılan malzemeler ve bu malzemelerin tespit edilen özellikleri aşağıda verilmiştir.

4.1.1. Yüksek Fırın Cürufu

AEM olarak kullanılan YFC Ereğli Demir-Çelik fabrikasından temin edilmiştir. Halkalı öğütücüde öğütülen YFC'nin tane dağılım eğrisi Şekil 4.1'de verilmiştir.



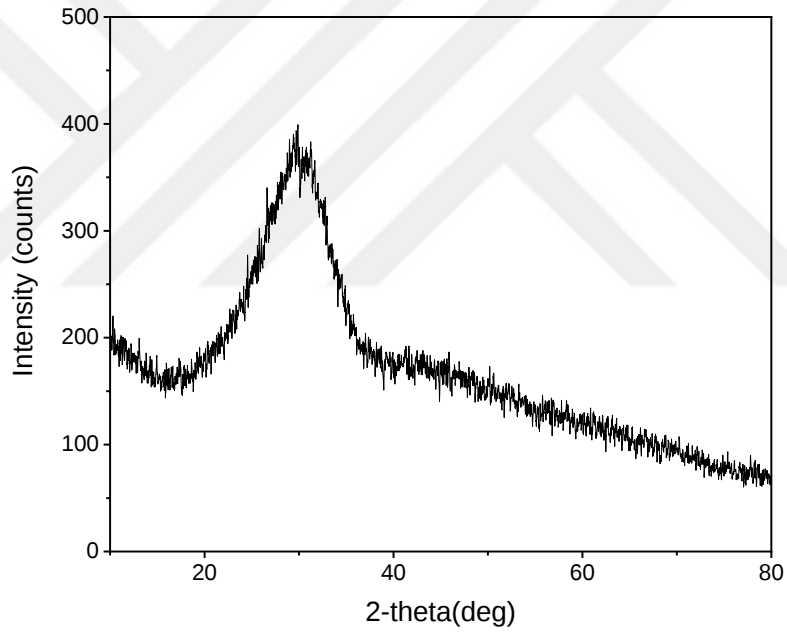
Şekil 4.1. YFC'nin tane dağılım eğrisi

Alüminosilikat esaslı malzeme olarak kullanılan YFC'nin kimyasal bileşimi Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. YFC'nin kimyasal bileşimi

Kimyasal bileşim	%
SiO ₂	40.52
Al ₂ O ₃	13.74
Fe ₂ O ₃	1.74
CaO	33.86
MgO	7.72
SO ₃	0.17
Na ₂ O	0.66
K ₂ O	0.81
Özgöl ağırlık	2.8

YFC'nin XRD analizi Şekil 4.2'de verilmiştir. XRD analizi, büyük miktarlarda camsı yapının oluştuğunu işaret eden yaklaşık 30°de amorf bir tümsek özelliği göstermiştir [141].



Şekil 4.2. YFC'nin XRD spektrumu

4.1.2. Portland Çimentosu

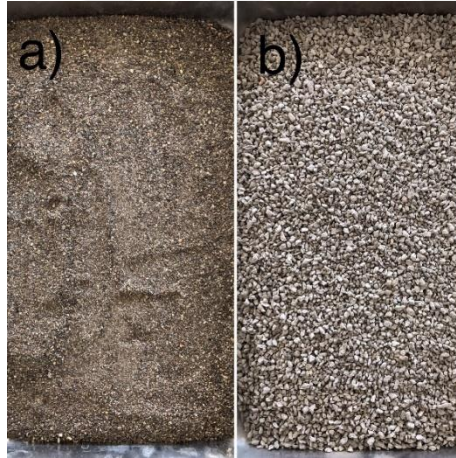
Tez çalışması kapsamında Çimentaş fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 R PÇ kullanılmıştır. PÇ'nin kimyasal bileşimi Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. PÇ'nin kimyasal bileşimi

Kimyasal bileşim	%
SiO ₂	18.48
Al ₂ O ₃	4.40
Fe ₂ O ₃	3.12
CaO	64.13
SO ₃	3.51
Na ₂ O	0.44
K ₂ O	0.78
Kızdırma kaybı	3.75
Özgöl ağırlık	3.1
Özgöl yüzey alanı(cm ² /g)	3490

4.1.3. Agrega

Alkali-aktif harç numuneleri üretmek için Şekil 4.3'te gösterilen 0-2 mm aralığında dere agregası ve 2-4 mm aralığında pomza agregası (PA) kullanılmıştır. Agregalar karışıma ilave edilmeden doymun kuru yüzey haline getirilmiştir. Agregaların doymun kuru yüzey özgül ağırlıkları kum ve pomza için sırasıyla 2.6 ve 1.12'dir.



Şekil 4.3. a) 0-2 mm kum b) 2-4 mm pomza

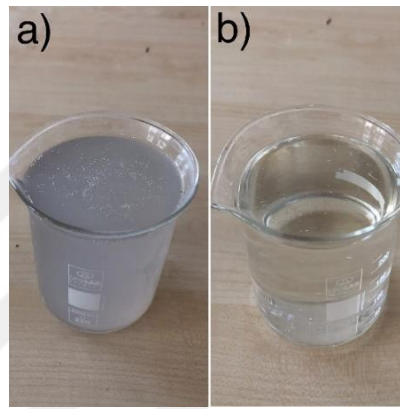
4.1.4. Aktivatör

Bu tez çalışmasında AAM üretiminde yaygın bir şekilde kullanılan Na₂SiO₃ ve NaOH çözeltileri alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Aktivatör olarak kullanılan Na₂SiO₃ ve NaOH çözeltilerinin özellikleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. NaOH ve Na₂SiO₃'ün özellikleri

Kimyasal formül	NaOH.XH ₂ O	Na ₂ OSiO ₂ .XH ₂ O
NaOH	Ağırlıkça %32-33	-
H ₂ O	Ağırlıkça %67-68	Ağırlıkça %61-64.5
SiO ₂	-	Ağırlıkça %27-29.5
Na ₂ O	-	Ağırlıkça %8.5-9.5
Görünüm	Renksiz	Açık gri, bulanık
Özgül ağırlık	1.35	1.37-1.428

Aktivatör olarak kullanılan Na₂SiO₃ ve NaOH çözeltileri Şekil 4.4'te sırasıyla gösterilmektedir. Na₂SiO₃ çözeltisinin silika modülü ($M_s = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) 3.1'dir.



Şekil 4.4. a) Na₂SiO₃ çözeltisi b) NaOH çözeltisi

4.1.5. Akışkanlaştırıcı ve Karışım Suyu

İstenilen işlenebilirliği elde etmek için kullanılan süper akışkanlaştırıcı (SA) Sika Viscocrete SF-18'dir. SA'nın özgül ağırlığı 1.1'dir. Karışım suyu, mümkün olabildiği kadar temiz olmalıdır ve içinde hamur veya betona zararlı etki gösterebilecek maddeler bulundurmamalıdır. Deneysel çalışmalarda TS EN 1008 [142] standardına uygun Bingöl ili şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

4.2. Yöntem

Deneysel çalışma üç aşamada ele alınmıştır. Birinci aşama alkali-aktif YFC/PÇ hamuru üzerinde yapılan ön deneyleri içermektedir. Yapılan bu deneyler sonucunda Na₂SiO₃/NaOH oranının, kür sıcaklığının ve PÇ ikamesinin AAC hamurunun basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. İkinci aşama ise harç üzerinde yapılan deneyleri içermektedir. Hafif agrega kullanılarak üretilen harçlar için farklı parametreler kullanılarak 48 adet karışım hazırlanmış mini çökme-yayılma, basınç dayanımı, özgül ağırlık ve su emme deneyleri yapılmıştır. Birim ağırlıkları da göz önüne alınarak basınç dayanımı ve yayılma çapı açısından en iyi sonuçları veren karışım serileri belirlenmiştir. Üçüncü aşamada ise üretilen harç numunelerinin yüksek sıcaklık ve sülfat saldırısına

karşı dirençleri tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklığın harç numuneleri üzerindeki etkisi basınç ve UPV deneylerinin yanısıra, taramalı elektron mikroskobu (SEM), fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) ve X-ışını difraktometresi (XRD) analizleri vasıtasıyla araştırılmıştır. Sülfat saldırısına karşı dayanıklılığını araştırmak için ise görsel muayenenin yanısıra basınç dayanımında ve ağırlıkta meydana gelen değişimler ölçülmüş ve FTIR analizi gerçekleştirilmiştir.

AEM olarak kullanılan YFC, Şekil 4.5a'da gösterilen etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar $105\pm5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta bekletildikten sonra Şekil 4.5b'deki halkalı öğütücüde öğütülmüştür. Dere kumu ve pomza agregası ise doymun kuru yüzey halinde kullanılmıştır.



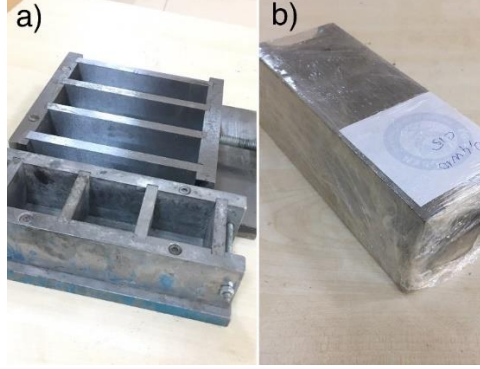
Şekil 4.5. a) Etüv b) Halkalı öğütücü

Hamur ve harç karışımları Şekil 4.6'da gösterilen mikser kullanılarak karıştırılmıştır. Kuru karışımlar mikserde bir müddet birlikte karılmıştır. Daha sonra bir beherde birarada karıştırılan Na_2SiO_3 ve NaOH çözeltileri karışıma ilave edilmiştir. Harç üretimi için bu işlemi takiben başka bir beherde birarada karıştırılan su ve SA karışıma eklenmiş ve homojen dağılım gerçekleşinceye kadar karıştırılmaya devam edilmiştir.



Şekil 4.6. Harç mikseri

Şekil 4.7a’da gösterilen $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ ve $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ ebatlarında çelik kalıplar kalıp yağı ile yağlanarak döküme hazır hale getirilmiştir.



Şekil 4.7. a) Prizmatik kalıplar b) Streç ile sarılı kalıp

Buharlaşmayı engellemek için kalıplar Şekil 4.7b’de gösterildiği şekilde jelatin film ile sarılmıştır. Numuneler belirlenen kür sıcaklıklarında deneylerin uygulanacağı güne kadar bekletilmiştir.

4.2.1. İşlenebilirlik Deneyleri

Harç karışımlarının işlenebilirliğini tespit etmek amacıyla taze harç üzerinde mini çökme-yayılma ve mini V-hunisi deneyleri yapılmıştır. Bunun yanı sıra YFC tabanlı alkali-aktif bağlayıcılar için priz süresi tayini deneyi yapılmıştır.

Mini Çökme-Yayılma Deneyi

Taze harcın işlenebilirliğini ölçmek için yapılan mini çökme-yayılma deneyi EFNARC standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir [143]. Çökme-yayılma deneyi için Şekil 4.8’de gösterilen alt çapı 100 mm, üst çapı 70 mm ve yüksekliği 60 mm olan mini koni düz bir yüzey üzerine yerleştirilmiş, harç koniye döküldükten sonra huni sabit ve dengeli bir şekilde yukarı kaldırılmıştır. Yayılan harcın en büyük çapı ve buna dik doğrultudaki yayılma çapı ölçülmüş ve ortalaması alınmıştır.



Şekil 4.8. Mini çökme-yayılma konisi

EFNARC [143] tarafından tavsiye edilen yayılma çapı 240-260 milimetre aralığındadır. Bunun yanı sıra Ghosh ve Ghosh alkali-aktif kendiliğinden yerleşen harçlar için Tablo 4.4'te belirtilen kriterleri sunmuştur.

Tablo 4.4. Alkali-aktif harç için yayılma kriteri [130]

250 mm'den büyük	Çok Akışkan
180-250 mm	Akışkan
150-180 mm	Orta akışkan
120-150 mm	Katı
120 mm'den düşük	Çok katı

Ghosh ve Ghosh yayılma çapı 180 ile 250 mm arasında olan harcı akışkan, 250 mm'den fazla yayılma çapına sahip harcı ise çok akışkan olarak nitelendirmiştir.

Mini V-Hunisi Deneyi

V hunisi deneyi, özel tasarlanmış bir huninin dar olan ağzından harcın kendi ağırlığı ile boşalma süresinin ölçülmesini içermektedir. Deney, kendiliğinden yerleşen harcın geçiş yeteneği ve viskozitesi hakkında fikir vermektedir. Hazırlanan harç karışımı mini V-hunisine doldurulduktan sonra huninin altındaki kapak açılır. Harcın huniden boşalma süresi ölçülür. EFNARC'a göre [143] bu değerin 7-11 sn arasında olması gerekmektedir. Mini V-hunisi deneyi için kullanılan aparat Şekil 4.9'da gösterilmektedir.



Şekil 4.9. Mini V-hunisi

V-hunisi deneyinin hazırlanan harç karışımları içerisinde en yüksek basınç dayanımını ve yayılma çapını veren karışımlar üzerinde yapılması planlanmıştır. Çökme-yayılma deneyi sonucunda 240 mm yayılma çapının elde edildiği bir karışım üzerinde yapılan V-hunisi deneyi Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.10. Mini V-hunisi deneyi

Hafif ağırlıklı pomza ile üretilen alkali-aktif YFC/PÇ harcında arzu edilen çökme yayılma değerine ulaşılsa da V-hunisi deneyinden sonuç alınamamıştır. Bu durum hafif ağırlıklı harç üretmek maksadıyla kullanılan pomza agregasından kaynaklanmaktadır. Çalışmada pomza agregası 2-4 mm, kum agregası ise 0-2 mm aralığında kullanılmıştır. Hafif ağırlıklı olan pomza agregasının V-hunisinin ağzında tıkanıklık yaparak akışı engellediği görülmüştür.

Priz Süresi Tayini

Şekil 4.11’de gösterilen vicat aletinin kullanıldığı priz süresi tayini deneyinde, vicat iğnesi taban plakasının üzerine indirilir ve gösterge sıfırlanır. Hazırlanan karışım vicat halkası içerisine yerleştirilir. Hamur yüzeyi düzgün hale getirilir. İğne, hamura hızlı bir şekilde batmasının önlenmesi amacıyla yavaşça indirildikten sonra serbest bırakılır ve belirli zaman aralıklarında ölçüm yapılır. Başlangıç zamanından vicat iğnesinin taban plakası ile arasındaki mesafe 4 ± 1 mm oluncaya kadar geçen süreye priz başlangıç süresi denilmektedir. Vicat iğnesinin 0.05 mm battığı veya hiç batmadığı an priz bitiş süresi olarak kaydedilir. Vicat aletinin iğnesi her batırma işlemi sonucunda silinip tekrar kullanılmıştır. Bu deney laboratuvar ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deney TS EN 196-3 [144]standardına göre gerçekleştirilmiştir [35].



Şekil 4.11. Vicat aleti

4.2.2. Yoğunluk ve Su Emme Tayini

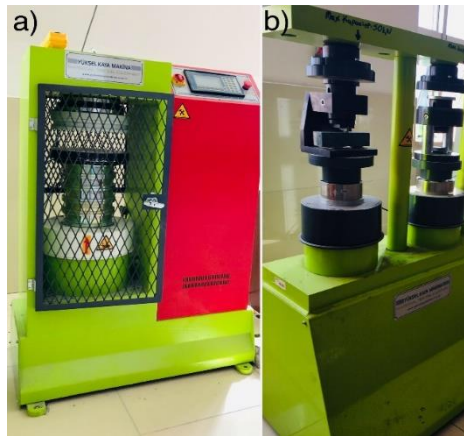
50 mm³ ebatında küp numuneler öncelikle su içerisinde bırakılmış ve değişmez ağırlığa ulaşınca kadar su içerisinde bekletilmiştir (24 saat). Su içerisindeki ve doymuş kuru yüzey ağırlıkları Arşimet prensibine göre tespit edildikten sonra 105°C±5 sıcaklıkta değişmez ağırlığa ulaşınca kadar etüvde bekletilmiştir. Su içerisindeki, doymuş kuru yüzey ve etüv kurusu ağırlıkları bulunduğundan sonra TS EN 12390-7 [145] standardında belirtilen denklemlere göre yoğunluk ve emme değerleri hesaplanmıştır. Yoğunluk deneyinde kullanılan Arşimet terazisi Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Arşimet terazisi

4.2.3. Basınç ve Eğilme Deneyleri

50×50×50 mm³ boyutlarındaki numunelerin basınç dayanımı tayini ASTM C109 [146] standardına göre yapılmıştır. Her bir seri için üç adet numune kırılmış ve bunların ortalamaları alınmıştır. Basınç deneyi için kullanılan beton presi Şekil 4.13a’da verilmiştir.



Şekil 4.13. a) Beton presi b) Eğilme cihazı

Eğilme deneyi için kullanılan cihaz Şekil 4.13b’de gösterilmiştir. Eğilme deneyi, 40x40x160 mm³ boyutlarındaki prizmatik numuneler üzerinde tek noktadan yük kontrollü yükleme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Eğilme deneyi üç numune üzerinde yapılmış ve ortalama değerleri alınmıştır. Eğilme dayanımı ASTM C348’de [147] belirtildiği şekilde hesaplanmıştır.

4.2.4. Ultra Ses Hızı Ölçüm Deneyi

Ultra ses ölçüm cihazı, betonun boşluk yapısının ve mukavemetinin tahribatsız bir şekilde tespit edilmesinde kullanılır. Ultra ses ölçüm cihazı kullanılarak numunenin bir yüzeyinden başka bir yüzeyine ses dalgaları gönderilir. Gönderici ve alıcı arasında ses dalgalarının geçme süresi ölçülerek dalga hızı hesaplanır. Hesaplanan ses üstü dalga hızı ile betonun basınç dayanımı ve diğer özellikleri arasındaki ilişki yaklaşık olarak elde edilmektedir. Deneyde kullanılan cihaz Proceq Pundit Lab markadır (Şekil 4.14). Sağlıklı bir ölçüm yapabilmek için numune yüzeyleri fırça ile temizlendikten sonra jel sürülmüştür. Dalga gönderici ve dalga alıcı başlık numuneye tamamen temas edecek şekilde bastırılmıştır. Ses üstü dalgaların, dalga gönderici ve dalga alıcı başlıklar arasındaki mesafeyi ne kadar zamanda geçtiği belirlenmiştir. UPV deneyi üç numune üzerinde yapılmış ve ortalama değerleri alınmıştır [35, 148].



Şekil 4.14. UPV cihazı

4.2.5. Yüksek Sıcaklık Deneyi

Yüksek sıcaklık etkisini incelemek amacıyla sertleşmiş harç numuneleri beş farklı yüksek sıcaklık değerinde bekletilmiştir. Bu sıcaklık değerleri 200, 400, 600, 800 ve 1000 °C’dir. Yüksek sıcaklık fırını (Şekil 4.15) dakikada 5 °C artışla hedef sıcaklık seviyesine getirilmiş, numuneler hedef sıcaklıkta 1 saat boyunca bekletilmiş daha sonra numunelerin doğal bir şekilde soğuması sağlanmıştır.



Şekil 4.15. Yüksek sıcaklık fırını

4.2.6. Sülfat Saldırısı Deneyi

Harç numuneleri %5 MgSO_4 ve %5 Na_2SO_4 konsantrasyonlu çözeltilere 6 ay süreyle maruz bırakılmıştır. Sülfat çözeltilerini hazırlamak için kullanılan sülfat tuzları Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Çözeltiyi hazırlamak için saf su kullanılmıştır. Suyun sıcaklığını sabit tutmak için dijital ayarlı termostat kullanılmıştır. Su buharlaşmasını engellemek için numunelerin konduğu kap çepeçevre sarılmıştır. Bir, üç ve altı ay sonunda numunelerin ağırlığındaki değişimler ile basınç dayanımları ölçülmüştür. Altı ayın sonunda numunelerden örnekler alınarak FTIR analizi yapılmıştır.



Şekil 4.16. Na_2SO_4 ve MgSO_4 tuzları

4.2.7. Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi

Numunelerin SEM-EDX analizi Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Şekil 4.17'deki JSM-6510 markalı SEM cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kırık numuneler sputter coater denilen kaplama cihazı ile altın kaplama ile

homojen bir şekilde kaplanarak incelenmiştir. Elektronları kullanarak numune yüzeyinden yüksek çözünürlüklü görüntü alma sistemi ile çalışan taramalı elektron mikroskobu, numune yüzeyinin üç boyutlu görüntülerinin elde edilmesinde kullanılır. Elektronlar numunedeki atomlarla etkileşerek numune yüzeyindeki topografi ve kompozisyon hakkında bilgiler içeren farklı sinyaller üretir. Elektron demeti ızgara tarama düzeni ile yüzeyi tarar ve demetin konumu, algılanan sinyalle eşleştirilerek görüntü oluşturulur. Taramalı elektron mikroskobu optik mikroskoplara göre çok daha iyi görüntüleme derinliği ve geniş bir büyütme alanına sahiptir. Düzgün yüzeyli olmayan numunelerde de kullanılabilir [35].



Şekil 4.17. SEM cihazı

4.2.8. X-Işını Difraktometresi Analizi

Numunelerin XRD analizi Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Şekil 4.18'deki Rigaku Ultima IV markalı cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. XRD analizi, özellikle kristal yapıdaki inorganik malzemelerin içerdikleri fazların belirlenmesinde kullanılmaktadır. Her bir kristal fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. Malzemeye X-ışını göndererek ışınların kırılma ve dağılma verilerinin toplanması esasına göre çalışır ve malzemenin kristal yapısına göre farklı açılarda ve şiddetlerdeki ışınlar ile hassas bir biçimde analizler gerçekleştirilebilir. Bu yöntem ile kristal malzemelerin, kayaçların ve polimerlerin nitel ve nicel incelemeleri yapılabilir [35].



Şekil 4.18. XRD cihazı

4.2.9. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Analizi

Üretilen malzemelerin bileşik yapılarını ortaya çıkarmak için Perkin Elmer Spectrum 100 FTIR cihazı kullanılmıştır. (Şekil 4.19). Bu analiz Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir. Numuneler analiz yapılmadan önce ince öğütülmüştür. Toz haline getirilen numuneler, Potasyum Bromür ile karıştırıldıktan sonra basınç altında 10 mm çapında 0.5 mm kalınlığında pellet haline getirilmiştir. Optik sistem sayesinde $450-4500\text{ cm}^{-1}$ aralığında veri elde edilir. IR Spektrometresi ile numunelerin molekül veya bileşik yapısında bulunan bağlar hakkında tanımlayıcı analizler yapılır. IR spektrumu, maddeyi oluşturan atomlar arasındaki bağların titreşimiyle oluşan frekanslarına karşılık gelen absorpsiyon pikleri ile örneğin parmak izini göstermektedir. Hangi kimyasal bağların hangi dalga sayısı değerlerinde gözleneceği korelasyon tablolarıyla düzenlenmiştir. IR spektrumlarında izlenen pikler molekülde bulunan çeşitli fonksiyonel gruplara ait piklerdir. Spektrumun bu bölgesinin değerlendirilmesiyle o molekülde hangi fonksiyonel grupların olup olmadığı anlaşılabilir [35].



Şekil 4.19. FTIR cihazı

4.3. Hazırlanan Karışımlar

Karışımlar üç aşamada ele alınmıştır. İlk aşamada hamur karışımları üretilerek SS/SH oranının, kür sıcaklığının ve PÇ ikame oranlarının hamur numunelerin basınç dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu araştırma sonucunda çalışmanın devamında kullanılacak SS/SH oranı, kür sıcaklığı ve PÇ ikame oranları belirlenmiştir. İkinci aşamada ise farklı parametreler ile toplamda 48 adet harç karışımı üretilmiştir. Üçüncü aşama karışımları ise ikinci aşama karışımlarının devamı niteliğindedir. Yüksek sıcaklık ve sülfat saldırısı deneyleri için 48 adet karışımdan basınç dayanımı ve yayılma çapı açısından en iyi sonuçları veren altı adet karışım seçilmiş ve yüksek sıcaklık ile sülfat dirençlerinin araştırılması için tekrar üretilmiştir.

4.3.1. Hamur Karışımları

Çalışmanın bu bölümünde YFC tabanlı alkali-aktif hamur karışımları hazırlanmış SS/SH oranının, kür sıcaklığının ve PÇ ikame oranlarının basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı ve PÇ ikame etkisi

SS/SH oranının ve PÇ ikamesinin alkali-aktif YFC/PÇ hamuru üzerindeki etkisini inceleyebilmek için 18 seri karışım hazırlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda üç farklı SS/SH oranı belirlenmiştir: 2, 2.5 ve 3. PÇ ise YFC ile ağırlıkça %0, 5, 10, 15, 20 ve 25 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Hazırlanan karışımlar Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5. Hamur karışım oranları-SS/SH ve PÇ etkisi

Karışımlar	SS/SH	YFC (%)	PÇ (%)	a/b
1	2	100	0	1/3
2		95	5	1/3
3		90	10	1/3
4		85	15	1/3
5		80	20	1/3
6		75	25	1/3
7	2.5	100	0	1/3
8		95	5	1/3
9		90	10	1/3
10		85	15	1/3
11		80	20	1/3
12		75	25	1/3
13	3	100	0	1/3
14		95	5	1/3
15		90	10	1/3
16		85	15	1/3
17		80	20	1/3
18		75	25	1/3

Yapılan ön çalışmada alkali aktivatör/bağlayıcı malzeme (a/b) oranı 1/3 olarak tespit edilmiştir. Çalışmanın devamında hamur karışımları için alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 1/3 olarak kullanılmıştır. Kuru karışım yarım dakika boyunca mikserde karıştırıldıktan sonra aktivatör ilave edilmiştir. Aktivatör eklendikten sonra bir dakika boyunca karıştırılmıştır. Mikserde karıştırılan YFC tabanlı alkali-aktif hamur karışımı Şekil 4.20’de gösterilmektedir. Hamur karışımı homojen hale getirildikten sonra 50*50*50 mm³ boyutundaki çelik kalıplara dökülmüş ve kalıp su buharlaşmasını engellemek amacıyla film ile çepeçevre sarılmıştır.



Şekil 4.20. Taze haldeki hamur

AAM üzerine yapılan çalışmalar başlangıçta sıcaklık kürü uygulandığında karışım numunelerinin 28 günlük dayanımının önemli bir kısmını ilk üç günde kazandığını göstermektedir [149–151]. Bakharev vd. [94] AAC betonunun yüksek sıcaklıkta kürlendiğinde (70 °C) oldukça hızlı bir şekilde mukavemet geliştirdiğini ifade etmiştir. Rovnanik, 80 °C kürleme sıcaklığının metakaolin tabanlı alkali-aktif çimentoların erken yaş basınç dayanımlarını artırdığını, hatta bir gün içinde bile hedef değerlerine ulaşabileceğini belirtmiştir [151].

Literatürde bulunan çalışmalar referans alınarak numunelerin üç gün boyunca seçilecek bir kür sıcaklığında kür edildikten sonra basınç deneyi uygulanması suretiyle SS/SH ve PÇ ikame oranlarının etkisinin araştırılmasına karar verilmiştir. Bir sonraki karışım serilerinde kür sıcaklığının etkisi araştırılacak olsa da ilk parti karışımları üretebilmek için literatür incelenerek bir kür sıcaklığı seçilmesi gerekmektedir. Erken yaş dayanımının yüksek olmasını sağlayacak kür sıcaklığı literatür araştırması sonucu 75 °C olarak belirlenmiştir [94, 98]. Hamur numuneleri 3 gün boyunca 75 °C sıcaklıkta kür edildikten sonra basınç deneyine tabi tutulmuş ve optimum SS/SH oranı ile PÇ ikamesinin basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Kür Sıcaklığı Etkisi

SS/SH oranı ve PÇ'nin hangi oranlarda kullanılacağı belirlendikten sonra kür sıcaklığını belirlemek amacıyla 16 seri karışım hazırlanmıştır. Ön karışımlar sonrasında karışımların a/b oranı 1/3 olarak belirlenmiştir. Uygulanacak kür sıcaklık değerleri 25, 50, 75 ve 100 °C'dir. Tablo 4.6'da karışım serileri verilmiştir. Hazırlanan numuneler 72 saat boyunca ilgili sıcaklıklarda bekletildikten sonra basınç deneyinin yapılacağı güne kadar oda sıcaklığında muhafaza edilmiştir.

Tablo 4.6. Hamur karışım oranları-kür sıcaklığı etkisi

Karışımlar	Kür sıcaklığı (°C)	Cüruf	PÇ	a/b
1	25	100	0	1/3
2		95	5	1/3
3		90	10	1/3
4		85	15	1/3
5	50	100	0	1/3
6		95	5	1/3
7		90	10	1/3
8		85	15	1/3
9	75	100	0	1/3
10		95	5	1/3
11		90	10	1/3
12		85	15	1/3
13	100	100	0	1/3
14		95	5	1/3
15		90	10	1/3
16		85	15	1/3

4.3.2. Harç Karışımları

Harç numunelerini üretmek için farklı parametreler kullanılarak 48 adet harç karışım serisi üretilmiştir. Bu karışımları üretmek için değiştirilen parametreler şunlardır: pomza agregasının toplam agregaya hacimce oranı, PÇ ikame oranı, a/b oranı ve su içeriği. Karışım oranları Tablo 4.7'de verilmiştir. Hamur numuneleri üzerinde yapılan deneylerden sonra aktivatör olarak kullanılan Na_2SiO_3 ve NaOH'un 3/1 oranında kullanılmasına karar verilmiştir. %15 PÇ ikamesinden sonra basınç dayanımının düşmeye başlaması ve numunelerde çatlaklar oluşması nedeniyle PÇ'nin %0, 5, 10 ve 15 oranlarında kullanılmasına karar verilmiştir. Ön karışımlar ve alkali-aktif kendiliğinden yerleşen kompozitler üzerine yapılan literatür araştırmalarından sonra süper akışkanlaştırıcı oranı %4 olarak belirlenmiştir [152, 153].

Tablo 4.7. Harç karışım oranları

Karışım kodları	Pomza agregası (%)	a/b	Su (%)	YFC (%)	PÇ (%)
8A0	80	0.35	8	100	0
8A5		0.35	8	95	5
8A10		0.35	8	90	10
8A15		0.35	8	85	15
8B0		0.35	10	100	0
8B5		0.35	10	95	5
8B10		0.35	10	90	10
8B15		0.35	10	85	15
8C0		0.4	8	100	0
8C5		0.4	8	95	5
8C10		0.4	8	90	10
8C15		0.4	8	85	15
8D0		0.4	10	100	0
8D5		0.4	10	95	5
8D10		0.4	10	90	10
8D15		0.4	10	85	15
7A0	70	0.35	8	100	0
7A5		0.35	8	95	5
7A10		0.35	8	90	10
7A15		0.35	8	85	15
7B0		0.35	10	100	0
7B5		0.35	10	95	5
7B10		0.35	10	90	10
7B15		0.35	10	85	15
7C0		0.4	8	100	0
7C5		0.4	8	95	5
7C10		0.4	8	90	10
7C15		0.4	8	85	15
7D0		0.4	10	100	0
7D5		0.4	10	95	5
7D10		0.4	10	90	10
7D15		0.4	10	85	15
6A0	60	0.35	8	100	0
6A5		0.35	8	95	5
6A10		0.35	8	90	10
6A15		0.35	8	85	15
6B0		0.35	10	100	0
6B5		0.35	10	95	5
6B10		0.35	10	90	10
6B15		0.35	10	85	15
6C0		0.4	8	100	0
6C5		0.4	8	95	5
6C10		0.4	8	90	10
6C15		0.4	8	85	15
6D0		0.4	10	100	0
6D5		0.4	10	95	5
6D10		0.4	10	90	10
6D15		0.4	10	85	15

Karıştırma prosedörü şu şekildedir: Öncelikle kuru bileşenler mikserde harmanlanmıştır. Daha sonra aynı kapta karıştırılan Na_2SiO_3 ve NaOH aktivatörleri ile su ve akışkanlaştırıcı karışıma ilave

edilmiş ve karışım homojen hale gelinceye kadar karıştırılmıştır. Mikserde karıştırılan harç karışımlarının bir örneği şekil 4.21’de sunulmuştur. Beton taze haldeyken mini çökme-yayılma deneyi yapılmıştır. Harç karışımları 50*50*50 mm³ boyutunda çelik kalıplara dökülmüş, buharlaşmayı önlemek amacıyla ince film ile çepeçevre sarılmıştır. Numuneler basınç dayanımı deneyi ve UPV ölçümleri ile yoğunluk ve su emme deneylerinin yapılması için 28 gün boyunca 25 °C sıcaklıkta bekletilmiştir.



Şekil 4.21. Taze haldeki harç

Harç numuneleri üç karakter kullanılarak adlandırılmıştır. İlk rakam (8: %80, 7: %70 ve 6: % 60) pomza agregasının toplam agreganın hacimce ne kadarını oluşturduğunu gösterir. A harfi; a/b oranı 0.35 ve su içeriği %8 olan karışımları, B harfi; a/b oranı 0.35 ve su içeriği %10 olan karışımları, C harfi; a/b oranı 0.4 ve su içeriği %8 olan karışımları ve son olarak da D harfi; a/b oranı 0.4 ve su içeriği %10 olan karışımları ifade etmektedir. Adlandırmadaki son karakter ise PÇ ikame oranını göstermektedir.

5. DENEY SONUÇLARI

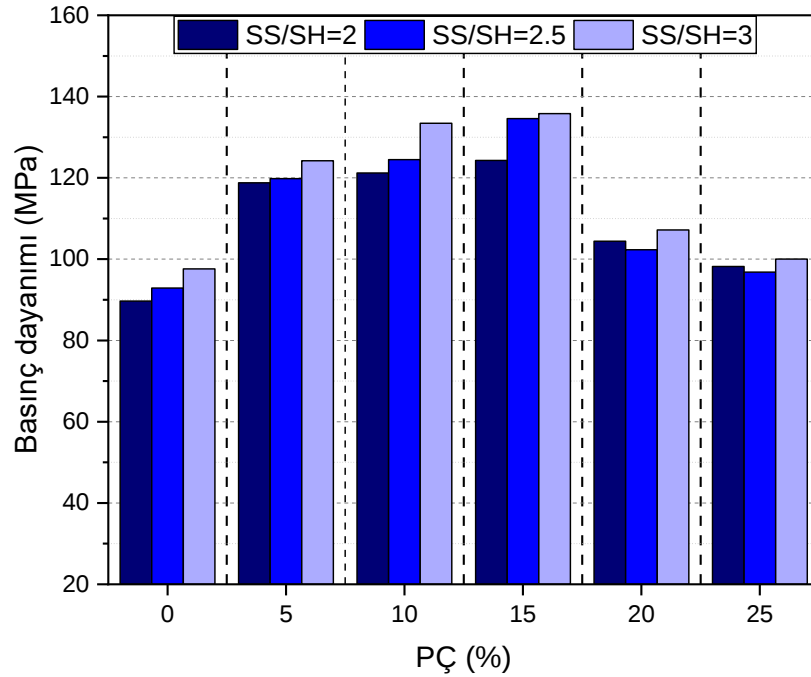
Bu bölümde 34 seri hamur karışımı ve 48 seri harç karışımı üzerinde yapılan deney sonuçları sunulmaktadır. Bunun yanı sıra 48 adet harç karışımı arasından belirlenen PÇ ikamesiz ve %15 PÇ ikameli numunelerin yüksek sıcaklık ve sülfat saldırısına karşı gösterdiği dirençleri incelemek amacıyla uygulanan çeşitli deneylerin sonuçları yer almaktadır.

5.1. Hamur Karışımları Deney Sonuçları

Hamur karışımları deney sonuçları PÇ ikamesinin, SS/SH oranlarının ve kür sıcaklığının YFC tabanlı alkali-aktif hamur numunelerinin basınç dayanımı üzerindeki etkisini içermektedir. Her bir parametrenin etkisi alt başlıklarda grafikler vasıtasıyla sunulmuştur.

5.1.1. PÇ İkamesinin Etkisi

PÇ ikamesinin YFC tabanlı alkali-aktif numuneler üzerinde etkisini incelemek için 18 adet karışım hazırlanmıştır. PÇ, YFC ile ağırlıkça %0, 5, 10, 15, 20 ve 25 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Bu belirlenen PÇ ikame oranlarında hamur numuneleri 2, 2.5 ve 3 SS/SH oranları için ayrı ayrı üretilmiştir. PÇ ikame oranlarının basınç dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 5.1'deki grafik vasıtasıyla sunulmuştur.



Şekil 5.1. PÇ ikamesinin basınç dayanımına etkisi

Üç farklı SS/SH oranında da en yüksek basınç dayanımları PÇ'nin YFC ile %15 oranında yer değiştirildiği numunelerde elde edilmiştir. %15'in üstündeki PÇ ikame oranlarında basınç dayanımı üç farklı SS/SH oranında da azalmaya başlamıştır. YFC'nin farklı oranlarda PÇ ile ikame edildiği bir çalışmada PÇ ikame oranı %20 olduğunda %15 PÇ ikame oranına kıyasla basınç dayanımında önemli azalmalar meydana geldiği belirtilmiştir [98]. SS/SH oranı 2 iken PÇ oranı %0'dan %5'e çıkarıldığında basınç dayanımı %32.4 artarken SS/SH oranı 2.5 ve 3 için bu artış oranları sırasıyla %29 ve %27.3 olmuştur. Yadollahi ve Dener [98] %5 PÇ ikamesinde dahi basınç dayanımında yüksek oranda bir artış meydana geldiğini belirtmiştir. Üç farklı SS/SH oranında %10 ve %15 PÇ ikame oranlarında basınç dayanımı PÇ ikamesiz emsallerine kıyasla artmaya devam etmiştir fakat bu artış oranı PÇ oranı %0'dan %5'e çıkarıldığında kaydedilen artış oranından daha düşük olmuştur. SS/SH oranı 2, 2.5 ve 3 olan harç numunelerinden elde edilen maksimum basınç dayanımı PÇ içermeyen emsallerinden sırasıyla %38.6, 44.9 ve 39.1 daha yüksek olmuştur.

Üç farklı SS/SH oranında üretilen numunelerin basınç dayanımının %15 PÇ ikamesinden sonra azaldığı görülmektedir. SS/SH oranı 2 iken PÇ ikame oranı %15'ten %20'ye çıkarıldığında basınç dayanımında meydana gelen azalma %16, SS/SH oranı 2.5 ve 3 olan numunelerin basınç dayanımındaki azalma oranları sırasıyla %24 ve %21.1 olmuştur. SS/SH oranı 2 iken PÇ ikame oranı %15'ten %25'e çıkarıldığında basınç dayanımında meydana gelen azalma %21 olmuştur. PÇ ikame oranı %15'ten %25'e çıkarıldığında SS/SH oranı 2.5 ve 3 olan numunelerin basınç dayanımındaki azalma oranları sırasıyla %28.4 ve %26.4 olarak ölçülmüştür. PÇ, %20 ve %25 oranlarında kullanıldığında üç farklı SS/SH oranında üretilen hamur numunelerinde ince çatlaklar meydana gelmiştir. Şekil 5.2 SS/SH oranı 2 olan %20 PÇ ikameli hamur numunesini göstermektedir.



Şekil 5.2. SS/SH oranı 2 olan %20 PÇ ikameli numune

Şekil 5.3 SS/SH oranı 2.5 olan %20 PÇ ikameli hamur numunesini, Şekil 5.4 ise SS/SH oranı 3 olan %20 PÇ ikameli hamur numunesini göstermektedir. Şekillerden görüleceği üzere %20 PÇ ikameli üç farklı SS/SH oranında üretilen numunelerde ince çatlaklar meydana gelmiştir. Bu durum %25 PÇ ikameli numunelerde de meydana gelmiştir. YFC'nin farklı oranlarda PÇ ile ikame edildiği bir çalışmada PÇ ikame oranı %20 ve %30 olan numunelerde ince çatlaklar meydana geldiği belirtilmiştir [98]. Amer vd. [154] PÇ ikamesiyle çatlakların seviyesinin arttığını belirtmiş, %30 PÇ ikameli numunelerde çatlakların belirginleştiğini ifade etmiştir.



Şekil 5.3. SS/SH oranı 2.5 olan %20 PÇ ikameli numune

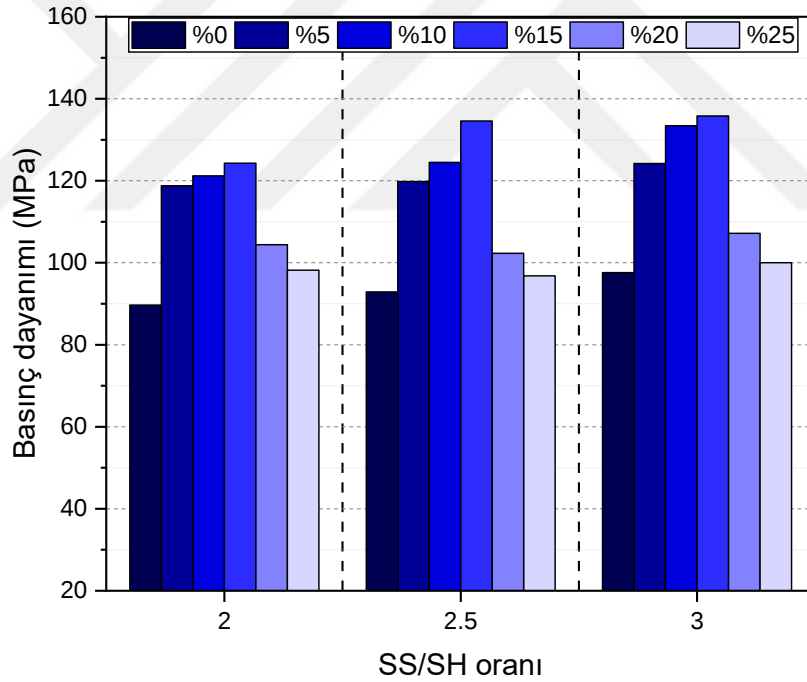


Şekil 5.4. SS/SH oranı 3 olan %20 PÇ ikameli numune

Üç farklı SS/SH oranında üretilen numunelerin yüzeyinde görülen ince çatlaklar, PÇ ikame oranı %15'ten %20'ye çıkarıldığında SS/SH oranı 2, 2.5 ve 3 olan numunelerin basınç dayanımlarında meydana gelen sırasıyla %19.9, 24 ve 21.1 azalmayı anlamlandırmıştır.

5.1.2. Na₂SiO₃/NaOH Oranının Etkisi

SS/SH oranının basınç dayanımı üzerindeki etkisi SS/SH oranları x-ekseninde verilmek suretiyle görselleştirilmiş ve Şekil 5.5'te sunulmuştur. SS/SH oranının basınç dayanımına etkisi incelendiğinde SS/SH oranının artmasıyla basınç dayanımının genel olarak arttığı görülmektedir. %20 ve %25 PÇ ikame oranlarında SS/SH oranı 2'den 2.5 çıkarıldığında dayanımın hafifçe düşmesi yukarıda belirtilen yargının istisnai durumları olarak göze çarpmaktadır. Basınç dayanımı açısından en iyi SS/SH oranının 3 olduğu görülmüştür. Benzer şekilde Shariati vd. [89] SS/SH oranı arttıkça AAC numunelerinin dayanımının arttığını belirtmiştir. Bir başka çalışmada da SS/SH oranı 3 olan numunelerin en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu ifade edilmiştir [98]. SS/SH oranı 2 olan PÇ ikamesiz hamur numunesinin basınç dayanımı 89.7 MPa iken SS/SH oranı 2.5 ve 3 olan hamur numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla 92.9 ve 97.6 MPa olmuştur. En yüksek basınç dayanımlarının elde edildiği %15 PÇ ikamesinde ise SS/SH oranı 2, 2.5 ve 3 olan numunelerin basınç dayanımları sırasıyla 124.3, 134.6 ve 135.8 MPa olmuştur.



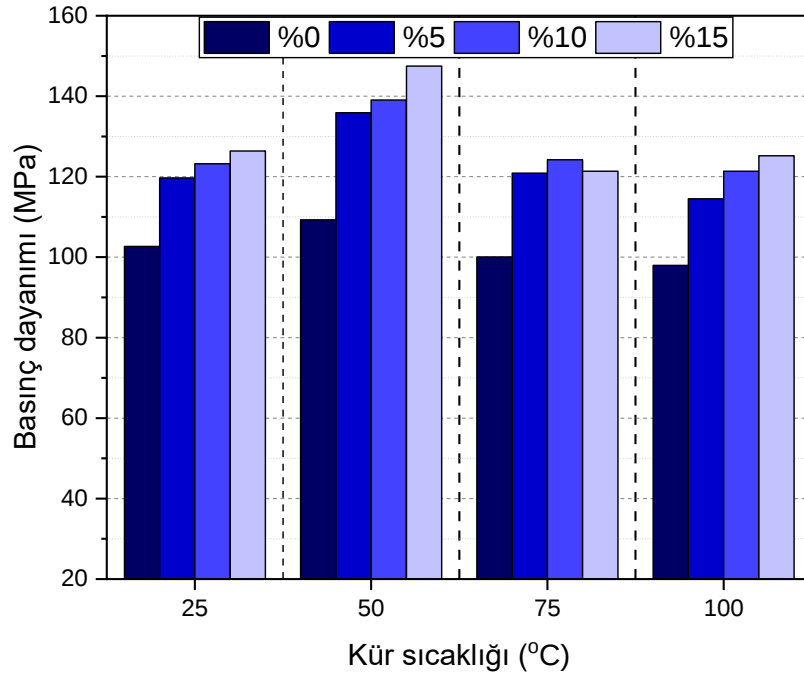
Şekil 5.5. SS/SH oranının basınç dayanımına etkisi

PÇ içermeyen numuneler arasında SS/SH oranı 2 olan hamur numunesine kıyasla SS/SH oranı 2.5 ve 3 olan numunelerin dayanımı sırasıyla %3.6 ve 8.8 artmıştır. En yüksek basınç dayanımlarının elde edildiği %15 PÇ ikameli numunelerde ise SS/SH oranı sırası ile 2.5 ve 3'e çıkarıldığında kaydedilen artış değerleri sırasıyla %8.3 ve %9.3 olmuştur. SS/SH oranı 2'den 3'e çıkarıldığında basınç dayanımında gözlenen artış oranı %20 ve %25 PÇ ikameli numunelere kıyasla %0, 5, 10 ve 15 PÇ ikameli numunelerde daha belirgindir. %20 ve %25 PÇ ikamelerinde SS/SH oranı 2'den 3'e

çıkarıldığında basınç dayanımları sırasıyla %2.7 ve %1.8 artarken, %0, 5, 10, 15 PÇ ikamelerinde SS/SH oranı 2’den 3’e çıkarıldığında basınç dayanımlarında kaydedilen artış oranları sırasıyla %8.8, 4.5, 10.1 ve 9.3 olmuştur.

5.1.3. Kür Sıcaklığı Etkisi

Kür sıcaklıklarının basınç dayanımına etkisini incelemek için numuneler 25, 50, 75 ve 100 °C olmak üzere dört farklı kür sıcaklığına maruz bırakılmış ve 28 günün sonunda basınç deneyine tabi tutulmuştur. 28 günün sonunda ölçülen basınç dayanımları Şekil 5.6’da gösterilmektedir. %15 PÇ ikamesinden sonra basınç dayanımları düşmeye başladığı için kür sıcaklığı etkisi PÇ ikame oranı %0, 5, 10 ve 15 olan numuneler üzerinde incelenmiştir. Şekilden de görüleceği üzere hem PÇ ikamesiz hem de farklı PÇ ikame oranlarında en yüksek basınç dayanımı numuneler 50 °C sıcaklıkta kür edildiğinde elde edilmiştir. 25 °C kür sıcaklığına kıyasla %0, 5, 10 ve 15 PÇ ikameli numuneler 50 °C sıcaklıkta kür edildiğinde basınç dayanımında meydana gelen artışlar sırasıyla %6.5, 13.5, 12.9 ve 16.4 olmuştur. PÇ içermeyen numunelerin basınç dayanımının kür sıcaklık değeri değişiminden nispeten az etkilendiği görülmektedir. 25 °C sıcaklık değerine kıyasla 75 °C sıcaklıkta kür edildiğinde ise basınç dayanımında meydana gelen değişim sırasıyla %-2.56, 1, 0.8 ve 2.02 olmuştur. Tüm PÇ ikame oranlarında en düşük basınç dayanım değerleri ise 100 °C sıcaklıkta kür edildiğinde elde edilmiştir.



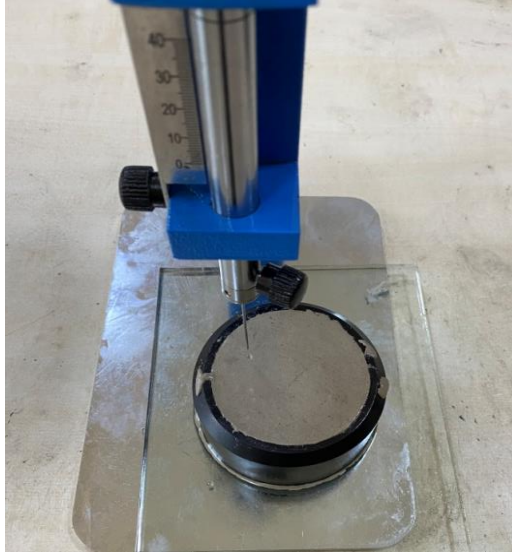
Şekil 5.6. Kür sıcaklığının basınç dayanımına etkisi

En yüksek basınç dayanımı 50 °C sıcaklık değerinde elde edilse de 25, 50 ve 75 °C sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları arasındaki farkın çok fazla olmadığı anlaşılmaktadır. Benzer şekilde Chi [93] 23, 65 ve 85 °C sıcaklık değerlerinde kür uyguladığı AAC numunelerinin 28 günlük basınç dayanımlarının birbirine yakın olduğunu belirtmiştir. Şekil 5.6'da verilen basınç dayanımları, 75 °C sıcaklıkta 3 günlük basınç dayanım sonuçlarının verildiği Şekil 5.5'teki grafik ile irdelendiğinde önemli bir sonuç göze çarpmaktadır. Görüldüğü üzere 75 °C sıcaklıkta kür edilen numunelerin 28 gün sonunda basınç dayanım değerleri genel olarak düşmeye başlamıştır. Bu sonuç Bakharev vd.'nin [94] 25 °C kürleme sıcaklıklarında kür edilen AAC'nin erken yaş dayanımının daha yüksek olduğunu fakat ilerleyen dönemlerde dayanımda düşüş meydana geldiğini tespit ettiği çalışmayla örtüşmektedir. Yüksek kür sıcaklıklarında yaş aldıkça numunenin basınç dayanımının azaldığını belirten başka araştırmacılar da mevcuttur. 56 günlük kür süresinde 65 °C kürlenmiş AAC harçlarının basınç dayanımının 85 °C kürlenmiş numunelerden daha yüksek olduğu belirtilmiştir [155].

Çalışmanın sonraki kısımlarında uygulanacak kür sıcaklığının tespit edilmesi maksadıyla hamur numuneleri üzerinde gerçekleştirilen deneyler 25 ve 50 °C kür sıcaklıklarının daha uygun olduğunu göstermiştir. YFC tabanlı alkali-aktif bağlayıcılar üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde kür sıcaklıkları olarak 25 °C [19, 89, 154] ve 50-60 °C [94, 156] civarındaki sıcaklık değerlerinin daha yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. 28 günlük basınç dayanım sonuçları 50 °C kür edilen harç numunelerinin basınç dayanımının daha yüksek olduğunu göstermiştir. Fakat yüksek sıcaklık kürü için gerekli olan enerjiden tasarruf amacıyla ve ülkemizde inşaat sezonunun en aktif olduğu yaz aylarında ortalama sıcaklık değerinin 25.1 °C [157] olduğu gerçeğinden hareketle 25 °C sıcaklık değeri çalışmanın sonraki kısımlarında kullanılacak kür sıcaklığı olarak seçilmiştir.

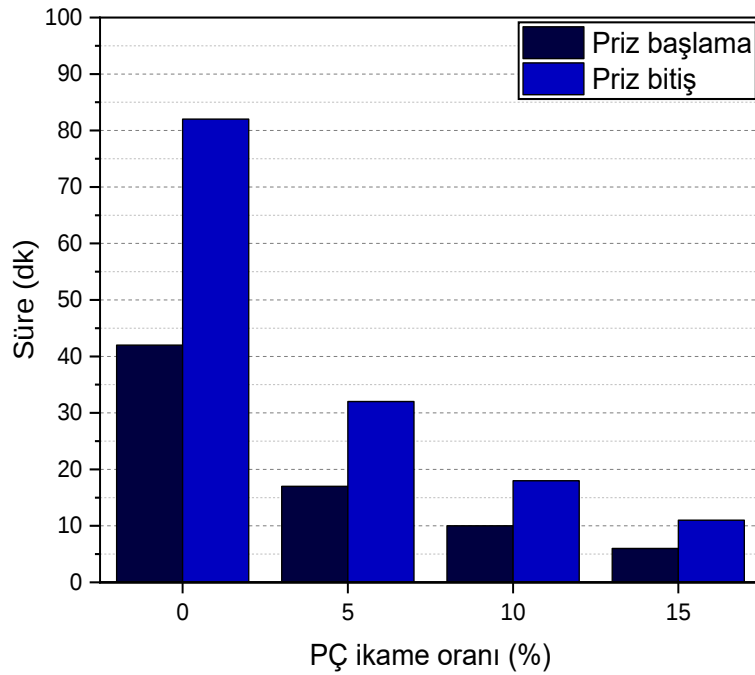
5.1.4. Priz Süresi Deneyi Sonuçları

Hamur numuneleri üzerinde yapılan ön deneyler sonucunda SS/SH oranı 3/1, uygulanacak kür sıcaklığı ise 25 °C olarak tespit edilmiştir. Bununla beraber basınç dayanımının %15 PÇ ikamesinden sonra azalmaya başladığı görülmüştür. Bu sebepten ötürü priz süresi deneyi için PÇ %0, 5, 10 ve 15 oranlarında kullanılmıştır. Priz süresi deneyine tabi tutulmak suretiyle hazırlanan karışım Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7. Priz süresi tayini deneyi

Priz deneyi sonucunda ölçülen priz başlama ve priz bitiş süreleri ise Şekil 5.8’de verilmiştir. PÇ ikamesi içermeyen karışımın priz başlaması süresi 42 dakika, prizini bitiş süresi ise 82 dakikadır. PÇ’nin yüksek oranda CaO ihtiva etmesinden ötürü PÇ ikamesi ile hem priz başlama hem de priz bitiş süreleri ciddi bir şekilde azalmaya başlamıştır. %5 PÇ içeren karışımın priz başlama süresi 17 dakika, priz bitiş süresi ise 32 dakikadır. %10 PÇ ikamesiyle priz başlama süresi 10 dakikaya düşmüştür.



Şekil 5.8. Priz süresi deneyi sonuçları

Zhang [97] tarafından alkali-aktif YFC/PÇ üzerine yapılan çalışmada aktivatör olarak silika modülü 2.4 olan Na_2SiO_3 ile beraber NaOH kullanılmış ve tamamen YFC'den oluşan karışımın priz bitiş süresinin 100 dakika olduğu belirtilmiştir. Benzer şekilde PÇ ikamesi ile priz süresinin düştüğü belirtilmiştir. Bahsedilen çalışmada YFC'nin %10'u PÇ ile ikame edildiğinde priz bitiş süresi 70 dakika düşmüştür. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan Na_2SiO_3 'ün silika modülü 3.1'dir. Zhang vd. [97]'nin çalışması ile kıyas edildiğinde karışım parametreleri ayarlanarak priz süresinin arttırılabileceği anlaşılmaktadır. Bununla beraber silika modülünün artmasıyla basınç dayanımının arttığı ifade edilmektedir [89, 98]. Karışım tasarlanırken amacın net bir şekilde ortaya konulması önem arz etmektedir. Sıcaklık düştükçe bağlayıcıların priz süresinin önemli ölçüde uzadığı bilinmektedir [97, 148, 158, 159]. Kış şartlarında inşa edilecek yapılarda alkali-aktif YFC/PÇ'nin priz süresinin ideal olabileceği anlaşılmaktadır. Alkali-aktif YFC/PÇ'nin(%90/%10) -5 derecede priz bitiş süresinin 6 saat 20 dakika olduğu Zhang vd. [97] tarafından belirtilmiştir.

5.2. Harç Karışımları Deney Sonuçları

Bu başlık altında farklı parametreler ile üretilen 48 adet harç karışımına ait basınç deneyi, yoğunluk ve su emme deneyleri ile mini çökme-yayılma deneyi sonuçları yer almaktadır. Bunun yanı sıra yüksek sıcaklık ve sülfat saldırısı için seçilen altı adet karışıma ait eğilme deneyi sonuçları verilmiştir.

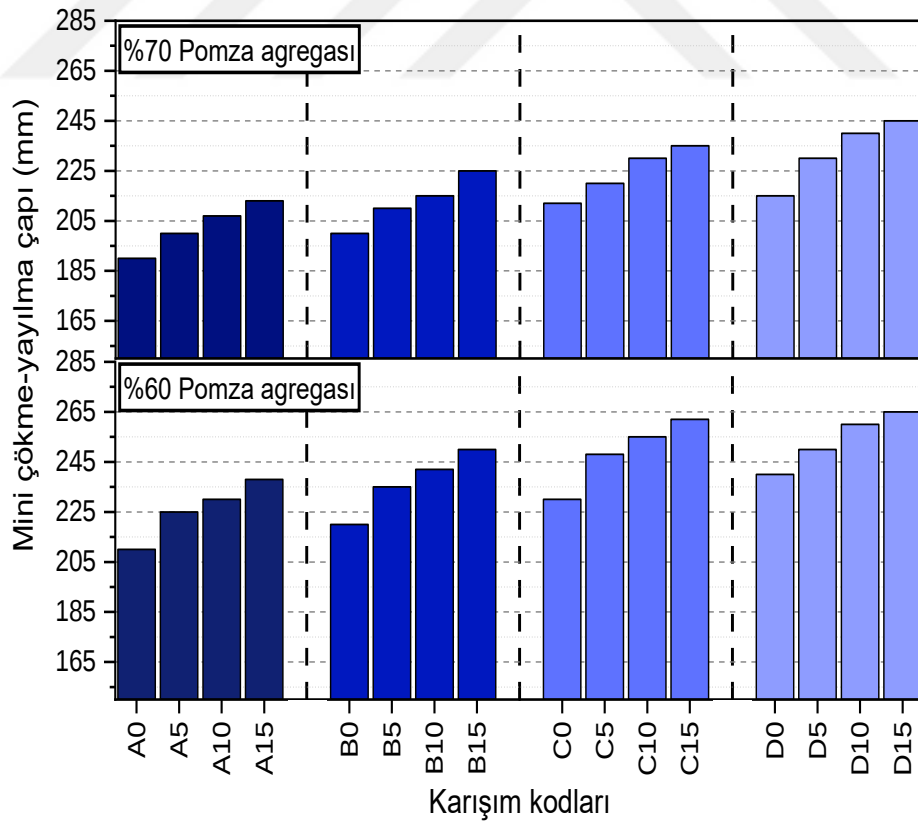
5.2.1. Slump Deneyi Sonuçları

Farklı parametreler ile üretilen 48 adet karışım üzerinde mini çökme-yayılma deneyi yapılmıştır. Şekil 5.9'da iki farklı karışıma ait (sırasıyla 6C15 ve 6A5) yayılma çapları gösterilmektedir.



Şekil 5.9. Mini çökme-yayılma deneyi

%60 ve %70 PA içeriğine sahip karışımların yayılma çapları Şekil 5.10'daki grafikte gösterilmiştir. %60 PA içeriğinde 210 mm ile 265 mm arasında değişen yayılma çapları elde edilmiştir. %70 PA içeriğinde yayılma çapları 190 mm ile 245 mm arasında değişen değerlerde ölçülmüştür. %80 PA içeriğinde istenilen işlenebilirlik ve stabilite sağlanamamıştır. Bu nedenden ötürü %80 PA içeriğinde üretilen karışımların çökme-yayılma çapları belirtilmemiştir. Karışımdaki PA oranının artmasıyla yayılma çapının azaldığı görülmektedir. D15 kodlu karışımın yayılma çapı %60 PA içeriğinde 265 mm iken, %70 PA içeriğinde yayılma çapı 245 mm olmuştur. D15 kodlu karışımın PA içeriği %60'tan %70'e çıkarıldığında yayılma çapındaki azalma %7.5 olmuştur. Her iki PA oranında da en düşük yayılma çaplarının elde edildiği A0 kodlu karışımlarda PA oranı %60'tan %70'e çıkarıldığında yayılma çapındaki azalma %9.5 olmuştur. Karışımların yayılma çapları, karışımdaki PÇ oranının artmasıyla artmıştır. 6A0 kodlu karışımın yayılma çapı 210 mm olarak ölçülmüştür. %5, 10 ve 15 oranlarında PÇ ikamesi ile yayılma çaplarında ölçülen artışlar sırasıyla % 7.1, 9.5 ve 13.3 olmuştur. En yüksek yayılma çaplarına sahip olan karışımlar, hem %60 hem de % 70 PA oranında a/b oranı 0.4, su içeriği %10 ve PÇ ikamesi %15 olan D15 kodlu karışımlardır. Manjunath vd. [153] cüruf kullanılarak kendiliğinden yerleşen alkali-aktif kompozitlerin üretiminin mümkün olduğunu belirtmiştir.



Şekil 5.10. Mini çökme-yayılma deneyi sonuçları

Aktivatör olarak kullanılan NaOH çözeltisinin %67'si ve Na₂SiO₃ çözeltisinin %63'ü sudan oluşmaktadır. Bu nedenle a/b oranı arttıkça toplam sıvı/katı oranı da artmaktadır. Sabit su içeriğinde, a/b oranı 0.4'ten 0.35'e düşürüldüğünde, yayılma çapında meydana gelen azalma, her iki pomza agregası içeriğinde ortalama %9 olmuştur. Çökme-yayılma deneyi, toplam sıvı/katı oranının artırılmasının, karışımın kohezyonunu azalttığını ve bunun da daha büyük bir çökme-yayılma çapı ile sonuçlandığını göstermiştir. Ayrıca, daha yüksek sıvı/katı oranında üretilen karışımlar daha akıcı bir bağlayıcı macuna sahiptir. Bu da karışımın akma eğilimini artırmaktadır [160]. Alkali aktivatör/bağlayıcı malzeme parametresi değişken tutulup diğer parametreler sabit tutulduğunda tek başına a/b oranının yayılma çapı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Sayısal olarak ifade edilirse, a/b oranı 0.35 ve su içeriği %10 olan karışımın yayılma çapı 220 mm iken a/b oranı 0.4 ve %10 su içeriğine sahip karışımın yayılma çapı 240 mm olarak ölçülmüştür. 240 mm üzerinde çökme-yayılma çapına sahip karışımlar %70 PA oranına sahip D10 ve D15 karışımları ile %60 pomza agregası oranına sahip B10, B15, C5, C10, C15, D0, D5, D10 ve D15 karışımlarıdır.

5.2.2. Basınç Deneyi Sonuçları

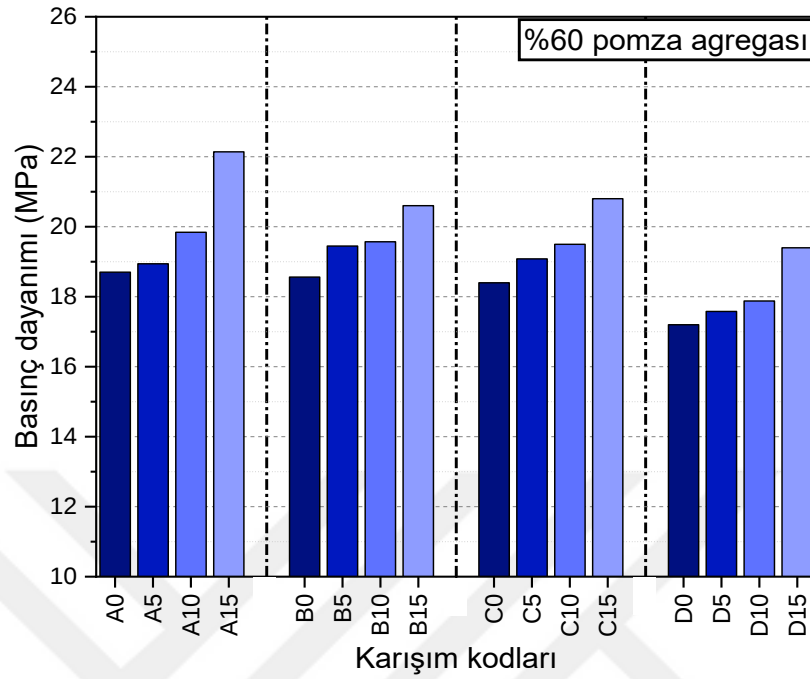
Toplam agrega hacminin %60, 70 ve 80 oranında PA kullanılarak 48 adet karışım serisi hazırlanmıştır. İlk partide üretilen harç numuneleri Şekil 5.11'de görülmektedir.



Şekil 5.11. Üretilen harç numuneleri

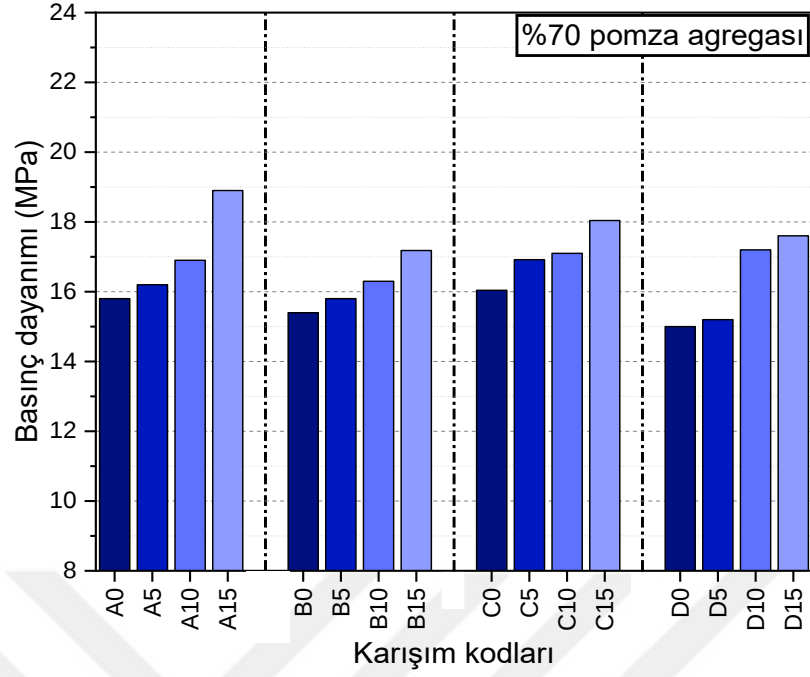
Harç karışımında toplam agreganın hacimce %60, 70 ve 80 oranlarında PA kullanılarak üretilen numunelerin 28 günün sonunda basınç dayanımları ölçülmüştür. PA oranının artmasıyla tüm numunelerin basınç dayanımlarında azalmalar meydana gelmiştir. Şekil 5.12 %60 oranında PA kullanılan harç numunelerinin basınç dayanımlarını göstermektedir. %60 oranında PA

kullanıldığında en yüksek basınç dayanımı 22.14 MPa ile A15 kodlu harç numunesinden elde edilmiştir.

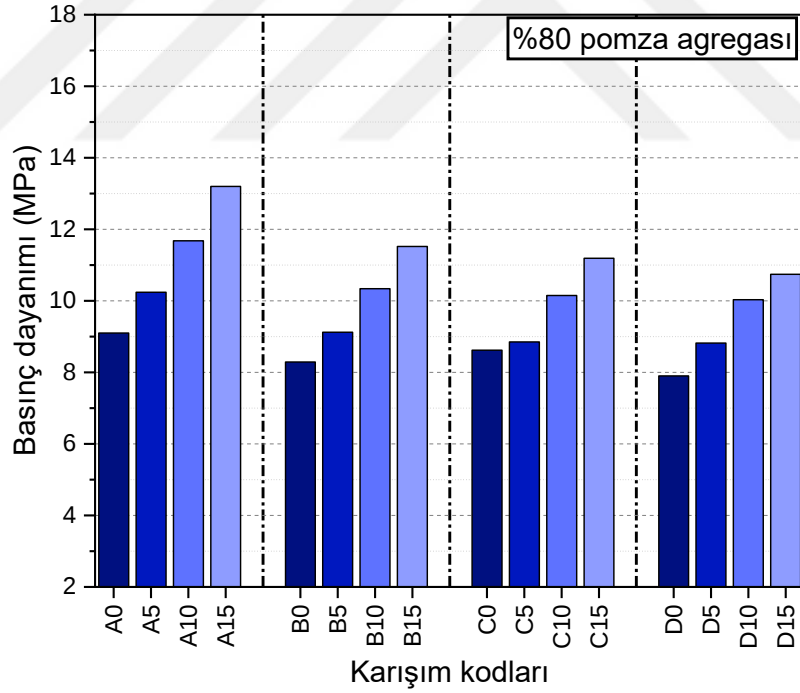


Şekil 5.12. Basınç deneyi sonuçları - %60 PA

Şekil 5.13 ve 5.14 ise sırasıyla %70 ve 80 oranlarında PA kullanılarak üretilen harç numunelerinin basınç dayanımlarını göstermektedir. Üç farklı PA oranında da en düşük basınç dayanımı D0 kodlu harç numunelerinden elde edilmiştir. Bu basınç dayanım değerleri %60, 70 ve 80 PA içeriğinde sırasıyla 17.2, 15 and 7.9 MPa olmuştur.



Şekil 5.13. Basınç deneyi sonuçları - %70 PA



Şekil 5.14. Basınç deneyi sonuçları - %80 PA

PA içeriği %70'ten %80'e çıkarıldığında basınç dayanımında meydana gelen azalma daha belirgindir. PA oranı %60'tan %70'e çıkarıldığında basınç dayanımındaki en yüksek azalma %18.8 ile B5 kodlu harç numunesinde gözlenmiştir. PA oranı %70'ten %80'e çıkarıldığında basınç dayanımında en yüksek azalma %47.7 ile C5 kodlu harç numunesinde gözlenmiştir. Benzer şekilde

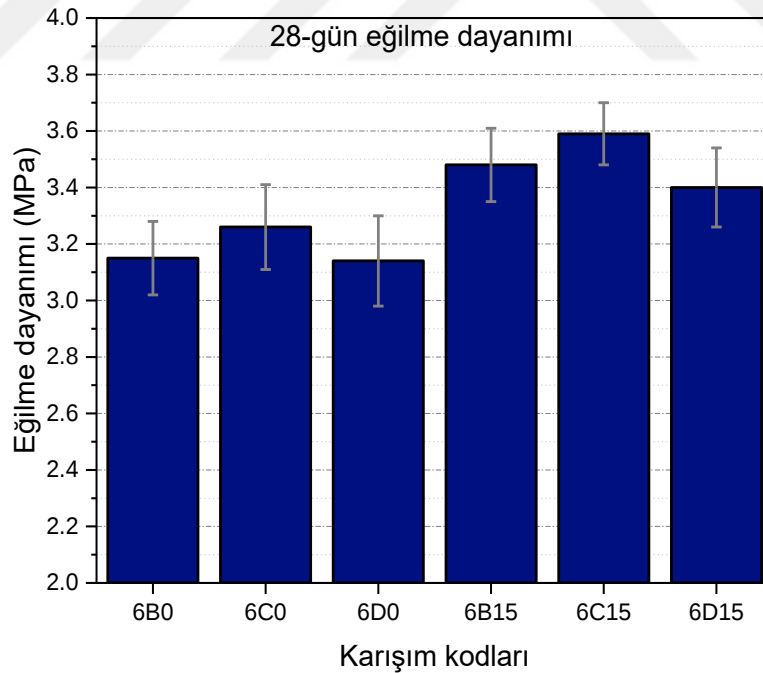
PA oranı %70'ten %80'e çıkarıldığında basınç dayanımındaki en düşük azalma ise %30.2 olarak ölçülmüştür. PA kullanılarak üretilen YFC tabanlı alkali-aktif harçlarda PA kullanımının basınç dayanımı açısından eşik değerin %70 olduğu sonucuna varılmaktadır. Top vd. [161] tarafından hafif ağırlıklı alkali-aktif kompozitler üzerine yapılan çalışmada PA oranı %40'tan %50'ye çıkarıldığında basınç dayanımında yaklaşık olarak %24 düşüş meydana geldiği belirtilmiştir.

PÇ ikame oranının basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde, üç farklı PA içeriğinde de PÇ ikame oranı arttıkça basınç dayanımının arttığı görülmektedir. %15 PÇ ikamesinde PÇ içermeyen emsallerine kıyasla tüm numunelerin basınç dayanımında önemli artışlar meydana gelmiştir. %80 oranında PA içeren harç serilerinde %5 PÇ ikamesi ile basınç dayanımında meydana gelen artış, %70 ve %60 oranlarında PA içeren numunelerin basınç dayanımında meydana gelen artışa göre daha belirgindir. Bu %80 PA ile üretilen harç numunelerinin dayanımının daha düşük olmasından ötürü PÇ ikamesiyle basınç dayanımında meydana gelen artışın yüzdesel olarak daha büyük etkiye sahip olmasıyla açıklanabilir. %80 oranında PA içeren serilerde, %5 PÇ ikamesi ile basınç dayanımında ölçülen en yüksek artış %12.5 olmuştur. %70 ve %60 PA içeren numunelerde %5 PÇ ikamesi ile basınç dayanımında kaydedilen en yüksek artış ise sırasıyla %2.6 ve %4.8 olmuştur.

En yüksek basınç dayanımlarının elde edildiği %60 PA içerikli seriler arasında en düşük basınç dayanımı 17.2 MPa ile PÇ içermeyen 6D0 kodlu numuneden elde edilmiştir. %70 ve 80 oranlarında PA kullanılan serilerde en düşük basınç dayanımı 15.2 ve 7.9 MPa ile benzer şekilde PÇ içermeyen D0 kodlu numunelerden elde edilmiştir. En düşük basınç dayanımlarının kaydedildiği %80 PA içeriğinde YFC'nin %15'i PÇ ile ikame edildiğinde, basınç dayanımında kaydedilen en yüksek artış %45.1 ile A15 kodlu harç numunesinde meydana gelmiştir. %15 PÇ ikamesiyle %60 ve 70 oranlarında PA kullanılarak üretilen numunelerin basınç dayanımında meydana gelen en yüksek artış oranları sırası ile %19.6 ve %18.4 olmuştur. Genel olarak, sabit su içeriğinde, a/b oranı arttıkça basınç dayanımının azaldığı görülmektedir. Aktivatör olarak kullanılan NaOH çözeltisinin %67'si ve Na_2SiO_3 çözeltisinin %63'ü sudan oluşmaktadır. Bu nedenle a/b oranı arttıkça toplam sıvı/katı oranı da artmaktadır. %60 PA içeren harç serilerinde %10 su içeriği ve 0.35 a/b oranında PÇ içermeyen B0 harcının basınç dayanımı 18.56 MPa iken, a/b oranı 0.4'e çıkarıldığında basınç dayanımı 17.2 MPa'ya düşmüştür. Benzer şekilde, sabit bir a/b oranında su içeriği arttıkça basınç dayanımında düşüş meydana gelmiştir. %60, 70 ve 80 PA içeriklerinde en yüksek basınç dayanımı en düşük a/b ve su içeriği kombinasyonlarında elde edilmiştir. Alkali aktivatör/bağlayıcı malzeme oranlarının ve su içeriklerinin çapraz kombinasyonları incelendiğinde; B (a/b: 0.35 ve su: % 10) ve C (a/b: 0.4 ve su % 8) kodlu numunelerin basınç dayanımları arasında çok önemli farklar olmadığı görülmektedir.

5.2.3. Eğilme Deneyi Sonuçları

48 adet harç serisine uygulanan deneyler sonucunda basınç dayanımı ve yayılma çapı açısından optimum değerleri veren altı adet karışım tespit edilmiştir. Bu karışımlardan üçü PÇ içermeyen alkali-aktif harç numuneleri iken üçü de %15 oranında PÇ ikamesi içeren alkali-aktif harç numuneleridir. Bu karışımlar ayrıca yüksek sıcaklık ve sülfat saldırısı deneyleri için seçilen karışımlardır. Bu altı adet karışımın 28 günlük kür süresi sonunda eğilme dayanımları ölçülmüş ve sonuçlar Şekil 5.15'teki grafikte verilmiştir. Eğilme dayanımları sonuçları beklendiği üzere basınç dayanımı sonuçlarına paralel doğrultuda olmuştur. PÇ içermeyen numuneler arasında en yüksek eğilme dayanımı 3.26 MPa ile a/b oranının 0.4, su içeriğinin %8 olduğu 6C0 kodlu harç numunesinden elde edilmiştir. %15 PÇ ikameli numuneler arasında en yüksek eğilme dayanımı 3.59 MPa ile 6C15 kodlu numuneden elde edilmiştir. PÇ içermeyen 6B0, 6C0 ve 6D0 kodlu numunelerin eğilme dayanımları sırasıyla 3.15, 3.26 ve 3.14 MPa olarak ölçülmüştür. %15 PÇ ikameli 6B15, 6C15 ve 6D15 kodlu numunelerin ise eğilme dayanımları sırasıyla 3.48, 3.59 ve 3.4 MPa olmuştur. %15 PÇ (6B15) ikamesinde 6B0 kodlu numunenin eğilme dayanımında %10.5'lik bir artış meydana gelmişken, PÇ ikamesiz emsallerine göre 6C15 ve 6D15 kodlu numunelerin eğilme dayanımlarında sırasıyla %10.1 ve %8.3'lük bir dayanım artışı meydana gelmiştir.



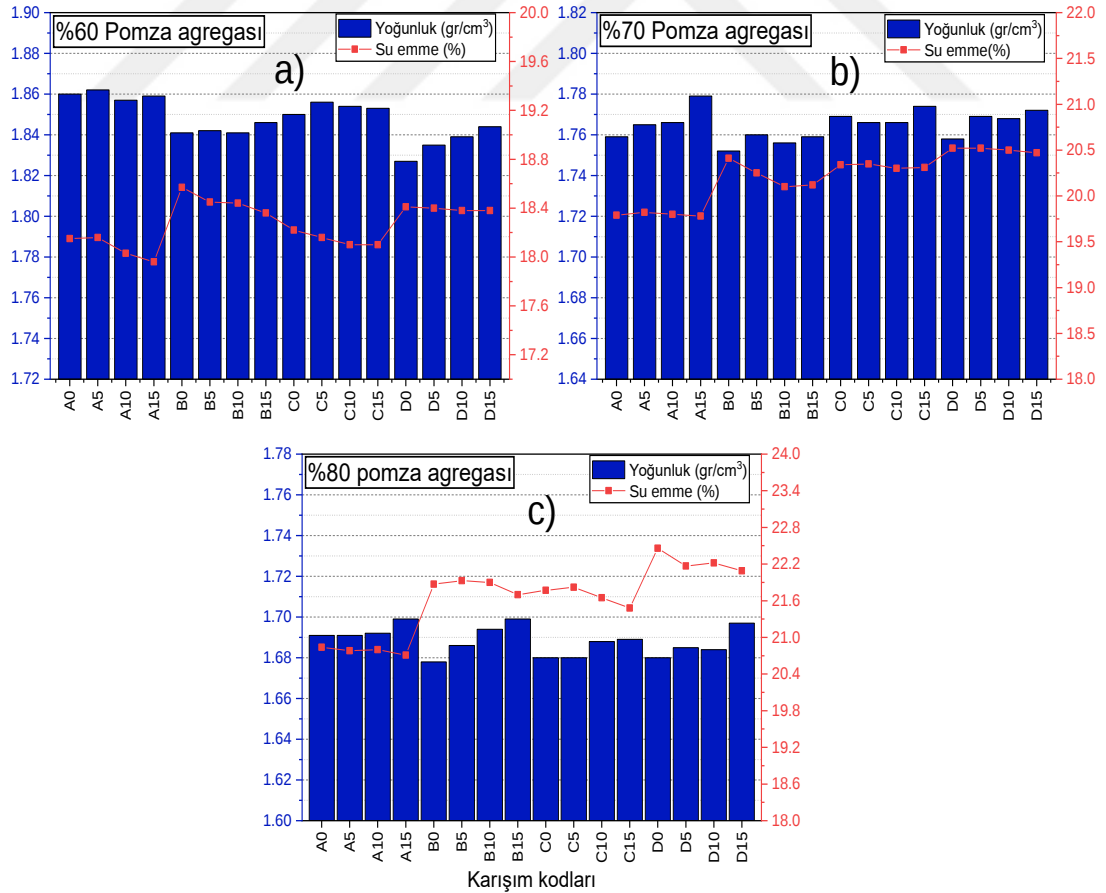
Şekil 5.15. 28 günlük eğilme dayanımları

6B0 kodlu numunenin basınç dayanımının eğilme dayanımına oranı 5.89 iken 6C0, 6D0, 6B15, 6C15 ve 6D15 kodlu numunelerin basınç dayanımının eğilme dayanımına oranları sırasıyla 5.64, 5.47, 5.91, 5.79 ve 5.7 olmuştur. Zuda vd. [162] cüruf tabanlı alkali-aktif hafif ağırlıklı harçların

mekanik özellikleri üzerine yaptıkları çalışmada 25 °C kür sıcaklığında beklettikleri numunenin basınç dayanımının eğilme dayanımına oranının 6.84 olduğunu belirtmiştir.

5.2.4. Su Emme ve Yoğunluk Deney Sonuçları

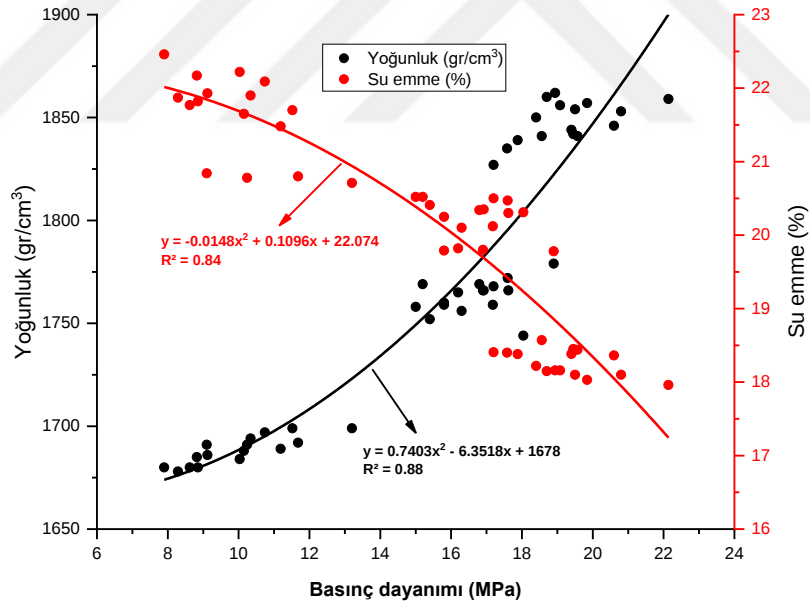
Şekil 5.16, %60, 70 ve 80 oranlarında PA içeren harç numunelerinin doygun kuru yüzey yoğunluklarını ve su emme değerlerini göstermektedir. Grafiklerde özellikle hafif ağırlıklı PA oranının bir fonksiyonu olarak yoğunluk ve su emme değerinin değişimi göze çarpmaktadır. Beklendiği gibi, en düşük yoğunluk ve en yüksek su emme değerleri %80 PA oranına sahip harç numunelerinden elde edilmiştir. %60, 70 ve 80 oranlarında PA içeren harç numunelerinin maksimum yoğunlukları sırasıyla 1.86, 1.78 ve 1.70 gr/cm³ olarak ölçülmüştür. A0 kodlu harç numunesinin %60 PA içeriğindeki yoğunluğu %70 ve %80 PA içeriğindeki yoğunluklarına kıyasla sırasıyla %4.49 ve %9.4 armıştır. %60, 70 ve 80 oranında PA içeren harç numunelerinde kaydedilen en düşük yoğunluk değerleri sırasıyla 1.83, 1.75 ve 1.68 gr/cm³ olmuştur. %60 oranında PA içeren harçların yoğunlukları kendi arasında kıyas edildiğinde maksimum yoğunluğun minimum yoğunluktan sadece % 1.92 yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 5.16. Yoğunluk ve su emme değerleri a) %60 PA b) %70 PA c) %80 PA

Alkali aktivatör/bağlayıcı malzeme oranı, su içeriği ve PÇ ikame oranı parametrelerinin yoğunluk üzerindeki tekil etkisinin PA oranının etkisinden çok daha düşük olduğu görülmektedir. Farklı oranlarda PA içeren harç numuneleri incelendiğinde PA oranı arttıkça su emme değerlerinin arttığı görülmektedir. %60 oranında PA içeren harç numunelerinin su emme değerleri %17.96 ile 18.57 arasında değişmektedir. %70 oranında PA kullanıldığında ise su emme değerleri %19.78 ile %20.52 arasında değişmektedir. PA oranı %80'e çıkarıldığında su emme değerleri artmaya devam etmiştir. %80 oranında PA kullanıldığında su emme değerlerinin %20.71 ile 22.46 arasında değiştiği görülmektedir. %60 PA içerikli A0 kodlu harç numunesiyle kıyas edildiğinde %70 PA içerikli A0 ve %80 PA içerikli A0 kodlu harç numunelerinin su emme değerleri sırasıyla %9 ve %14.8 artmıştır.

48 adet harç numunesinin yoğunluğu ve basınç dayanımı ile su emme değeri ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiler Şekil 5.17'de gösterilmektedir. Yoğunluk ile basınç dayanımı ve su emme değeri ile basınç dayanımı arasında parabolik ilişki kurulmuştur. Yoğunluk ve basınç dayanımı arasındaki determinasyon katsayısının (R^2) 0.88 olduğu görülmüştür. Su emme ve basınç dayanımı arasındaki bu katsayı 0.84 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.17. Yoğunluk ve su emme değerleri arasındaki ilişki

Determinasyon katsayıları aracılığıyla farklı özellikler arasında kurulan bu ilişkilerden basınç dayanımının, numunelerin yoğunluğu ve su emme değerlerinden yola çıkarak yüksek oranda tahmin edilebileceği görülmüştür. Basınç dayanımı arttıkça su emme değerinin azaldığı ve yoğunluğun arttığı görülmektedir. Daha yüksek yoğunluğa sahip numunelerin basınç dayanımının daha yüksek olmasının nedeni, kimyasal bağlar yardımıyla daha yoğun yapı oluşturan reaksiyona

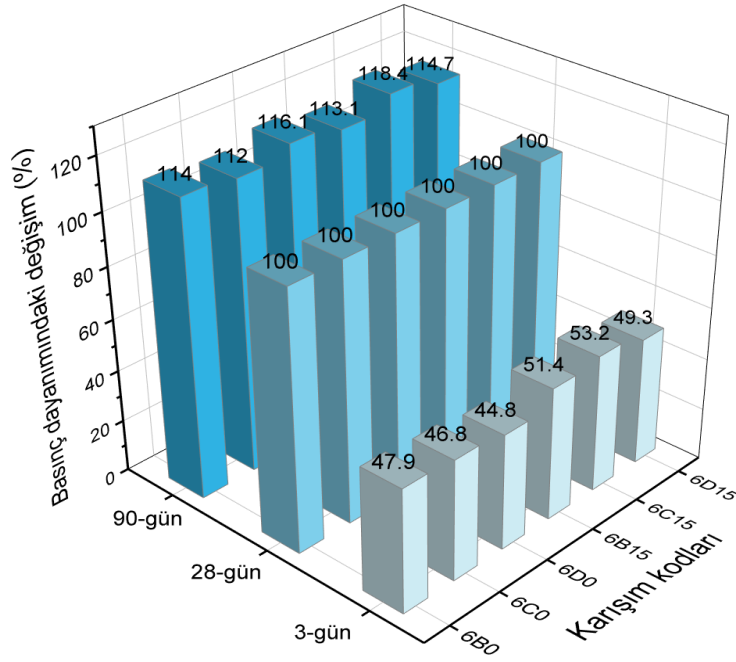
girmemiş partiküllerle açıklanabilir. Bu nedenle, numunelerdeki boşluk miktarını azaltan bu yoğun iç yapı nedeniyle su emme değeri azalmaktadır [163].

5.3. Yüksek Sıcaklık Deneyi Sonuçları

YFC/PÇ alkali-aktif harç numunelerinin yüksek sıcaklık direncini araştırmak için PÇ içermeyen ve %15 PÇ içeren altı adet karışımdan numuneler üretilmiştir. Numuneler yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra basınç deneyi ve UPV ölçümü ile SEM, FTIR ve XRD analizleri yapılmak suretiyle yüksek sıcaklık direnci araştırılmıştır.

5.3.1. Basınç Deneyi Sonuçları

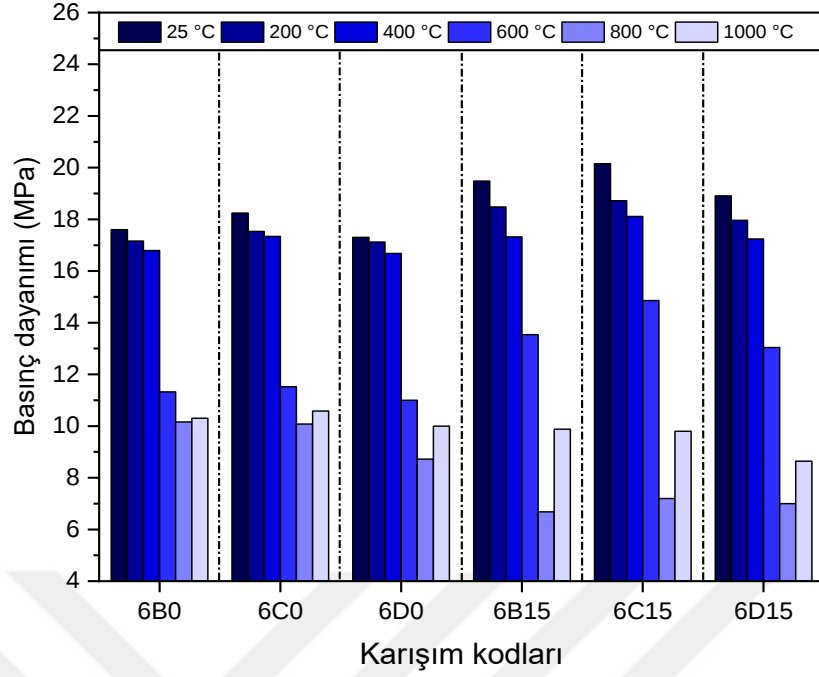
PA oranı, a/b oranı, su içeriği ve PÇ ikame oranı parametreleri kullanılarak üretilen 48 adet karışım arasından yüksek sıcaklık deneyi için 6 adet karışım seçilmiştir. 48 karışım arasında en yüksek basınç dayanımı ve yayılma çaplarının elde edildiği karışımlar %60 oranında PA içerenler olmuştur. Bu nedenle yüksek sıcaklık deneyi için %60 oranında PA içeren karışımlar seçilmiştir. PÇ ikamesi ile basınç dayanımı ve yayılma değerleri artmıştır. En yüksek basınç dayanımı ve yayılma çapı %15 PÇ ikamesinde elde edilmiştir. PÇ ikamesinin harçların yüksek sıcaklık direncine etkisinin anlaşılabilmesi için PÇ ikamesiz ve %15 PÇ ikameli karışımlar seçilmiştir. 6A0 karışımı 210 mm yayılma çapı ile %60 PA içeren karışımlar arasında en düşük değere sahip olan karışım olmuştur. Bunun yanısıra 6A15 karışımının yayılma değeri de EFNARC tarafından önerilen 240-260 mm aralığında değildir. Bu nedenle 6A0 ve 6A15 karışımları yüksek sıcaklık deneyine tabi tutulmamıştır. Yüksek sıcaklık deneyi için belirlenen karışımlar 6B0, 6B15, 6C0, 6C15, 6D0 ve 6D15 karışımları olmuştur. PÇ ikamesinin yüksek sıcaklık direnci üzerindeki etkisini araştırmak için PÇ ikamesiz ve %15 PÇ ikameli karışımlar seçilmiş ve bu karışımlar tekrar üretilmiştir. Bunun yanısıra seçilen bu karışımlardan üretilen numunelerin 3 ve 90 günlük basınç dayanımları, 28 günlük basınç dayanımlarıyla kıyas edilmiş sonuçlar Şekil 5.18'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5.18. 3 ve 90 günlük görel basınç dayanımları

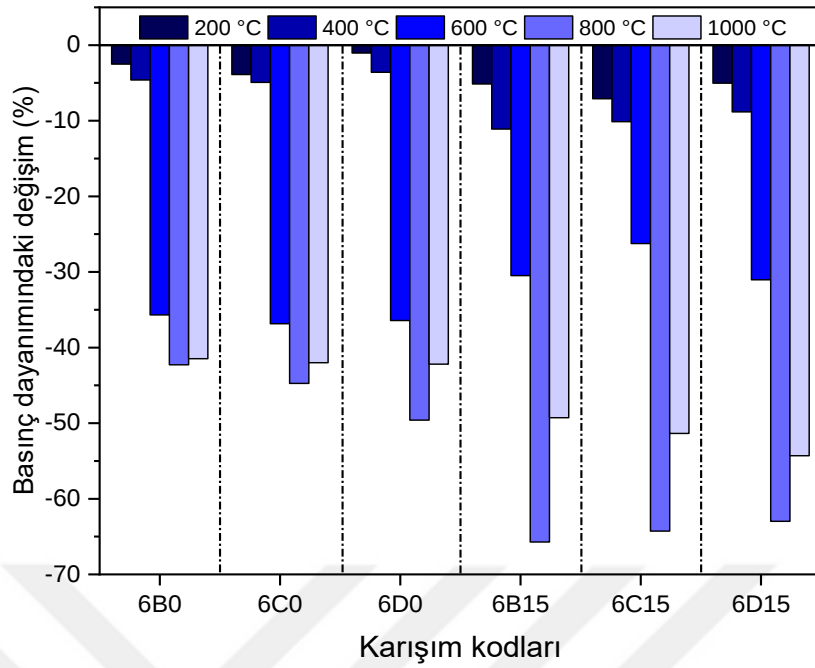
PÇ içermeyen 6B0, 6C0 ve 6D0 kodlu numunelerin 3 günlük basınç dayanımları 28 günlük basınç dayanımlarının sırasıyla %47.9, 46.8 ve 44.8'i olmuştur. PÇ ikameli harç numunelerinin 3 günlük basınç dayanımları 28 günlük basınç dayanımlarının %49.3 ile %53.2 aralığında olmuştur. PÇ içermeyen numunelerin 3 günlük basınç dayanımı 28 günlük basınç dayanımının ortalama olarak %46.5'i iken, PÇ ikameli numunelerde bu değer %51.3 olmuştur. Palomo vd. [18] %80 oranında YFC, %20 oranında PÇ kullanarak ürettiği alkali-aktif çimentoların 2 günlük basınç dayanımlarının 28 günlük basınç dayanımlarının %33'ü olduğunu belirtmiştir. Escalante-Garcia vd. [164] tarafından yapılan çalışmada alkali-aktif YFC/PÇ (70/30) numunesinin 3 günlük dayanımının 28 günlük dayanımının yaklaşık olarak %46'sı olduğunu belirtilmiştir. Angulo-Angulo-Ramirez vd. [19] tarafından yapılan çalışmadan alınan netice belirtilen bu sonuçları destekler nitelikte olmuştur. 6B0, 6C0 ve 6D0 kodlu numunelerin 90 günün sonunda ölçülen basınç dayanımları 28 günlük basınç dayanımlarından sırasıyla %14, 12 ve %16.1 daha fazla olmuştur. %15 PÇ ikameli 6B15, 6C15 ve 6D15 kodlu numuneler için bu değerler sırasıyla %13.1, 18.5 ve 14.7 olmuştur. 28 günlük dayanıma kıyasla 90 günün sonunda PÇ ikamesiz numunelerin dayanımında meydana gelen ortalama artış oranı %14.03 iken %15 PÇ ikameli numuneler için bu ortalama artış oranı %15.4 olmuştur. PÇ ikameli ve PÇ ikamesiz numunelerin ortalama artış oranları arasında belirgin bir fark yoktur.

Harç numunelerinin yüksek sıcaklıktaki davranışını araştırmak için numuneler 200, 400, 600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklara tabi tutulmuştur. Yüksek sıcaklıklardan sonra ölçülen basınç dayanımları Şekil 5.19'da gösterilmektedir.



Şekil 5.19. Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları

Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmayan 6B0, 6C0, 6D0, 6B15, 6C15 ve 6D15 numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla 17.6, 18.24, 17.3, 19.48, 20.15 and 18.91 MPa olmuştur. Farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarla tutarlı olarak numunelerin basınç dayanımı yüksek sıcaklığa maruz kalmaya başlamasıyla beraber azalmıştır [113, 165–167]. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılmayan referans numunelere kıyasla yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımlarındaki değişim ise Şekil 5.20’de gösterilmektedir. Zuda vd. [162] tarafından yapılan çalışmayla tutarlı olarak numuneler 200 °C sıcaklığa maruz bırakıldığında basınç dayanımında düşük bir değişiklik meydana gelmiştir. Bununla beraber basınç dayanımındaki bu değişimin PÇ ikameli numunelerde daha belirgin olduğu görülmektedir. 400 °C sıcaklığa maruz bırakıldığında 200 °C sıcaklıktan sonra ölçülen basınç dayanımına kıyasla dayanımda bir miktar azalma meydana gelmiştir. PÇ içermeyen 6B0, 6C0 ve 6D0 kodlu numunelerde ölçülen bu azalma oranları sırasıyla %2.16, 1.08 ve 2.57’dir. %15 PÇ ikameli numunelerde meydana gelen azalma oranları ise sırasıyla %6.27, 3.25 ve 4.01’dir. Kürklü [115] 400 °C sıcaklığa maruz kaldığında AAC harcının basınç dayanımındaki düşüşün 200 °C’ye kıyasla % 8.68 olduğunu belirtmiştir.



Şekil 5.20. Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımlarındaki değişim

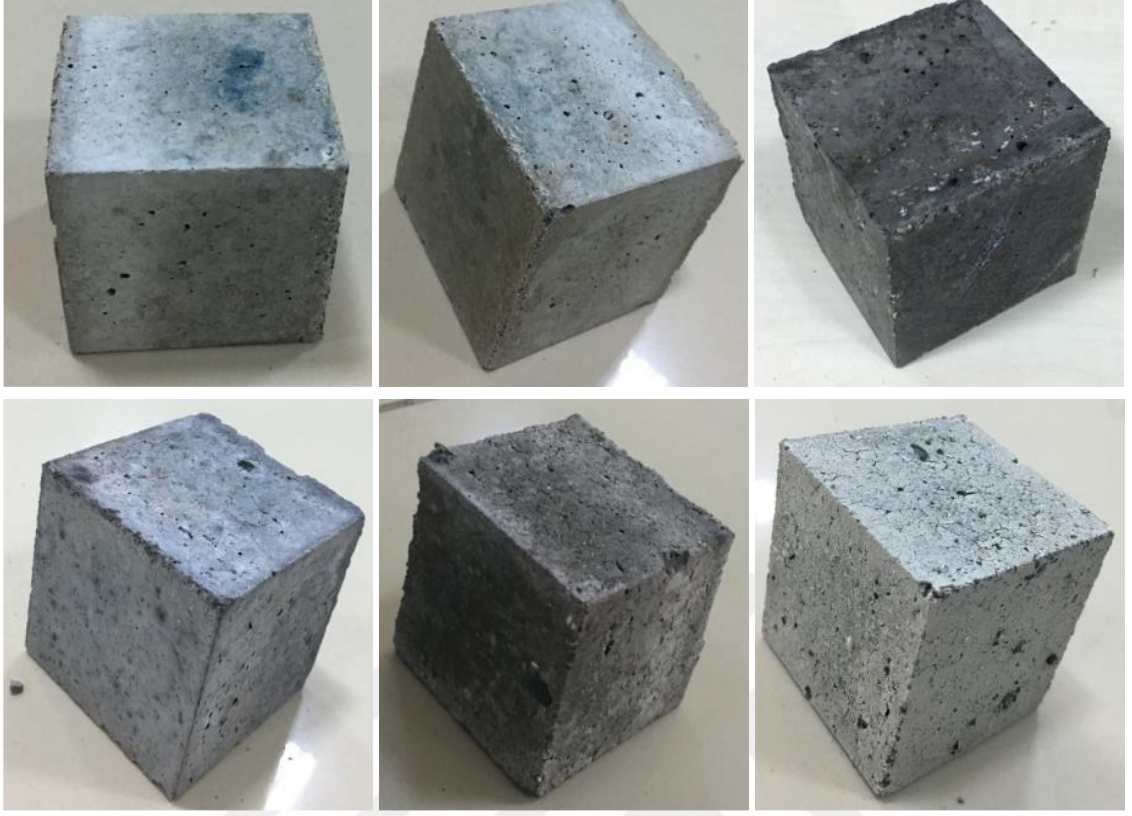
PÇ içermeyen harç numunelerinin bir önceki yüksek sıcaklık değerine kıyasla basınç dayanımındaki yüzdesel olarak en büyük düşüş numuneler 600 °C sıcaklığa maruz bırakıldığında meydana gelmiştir. Bu sonuç Türker vd.'nin [141] çalışmasıyla örtüşmektedir. PÇ ikamesi içermeyen bu numuneler 600 °C sıcaklıktan sonra referans dayanımının (yüksek sıcaklığa maruz bırakılmayan / 25 ° C) yaklaşık olarak %36'sını kaybetmiştir. %15 PÇ ikamesi içeren 6B15, 6C15 ve 6D15 kodlu numuneler ise 600 °C sıcaklık değerinden sonra dayanımlarının sırasıyla %30.5, 26.3 ve 31.1'ini kaybetmiştir. 800 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra PÇ içermeyen harç numunelerinin referans dayanıma kıyasla basınç dayanımlarında meydana gelen kayıp %42.3 ile %49.6 arasındadır. %15 oranında PÇ içeren harç numunelerinin bir önceki yüksek sıcaklık değerine kıyasla basınç dayanımındaki yüzdesel olarak en büyük düşüş 800 °C sıcaklığa maruz bırakıldığında meydana gelmiştir. 800 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra %15 PÇ içeren harç numunelerinin referans dayanıma kıyasla basınç dayanımlarında meydana gelen kayıp ise %62.98 ile %65.71 arasındadır.

Farklı yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra tüm harç numuneleri için en düşük basınç dayanımları numuneler 800 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra ölçülmüştür. 800 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra 6B0, 6C0, 6D0, 6B15, 6C15 ve 6D15 numunelerinin basınç dayanımları referans dayanımının sırasıyla %57.7, 55.3, 50.4, 34.3, 35.7 ve 37'si olmuştur. 1000 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra 6B0, 6C0, 6D0, 6B15, 6C15 ve 6D15 numunelerinin basınç dayanımları referans dayanımının sırasıyla % 58.5, 58.0, 57.8, 50.7, 48.6, 45.7 si olmuştur. 1000 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra elde edilen basınç dayanımının 800 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan

sonra elde edilen basınç dayanımından yüksek olduğu görülmektedir. 800 °C sıcaklıktan sonra basınç dayanımında meydana gelen bu artış, Rovnanik vd. [113] tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarıyla örtüşmektedir. Rovnanik vd. 800 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra, kristalleşmenin daha büyük bir hızda devam ettiği ve yeni küçük kristal fazların meydana geldiği belirtmiştir. Bu duruma rağmen, testler basınç dayanımının arttığını göstermiştir. Bu tutarsızlık, daha güçlü bir seramik bağın oluşmasıyla açıklanmış ve bu seramik bağın oluşumu da kristalleşme işlemi sırasında sistemden iç enerjinin salınmasının sonucunda olduğu belirtilmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce, %15 PÇ ikameli numunelerin basınç dayanımı PÇ içermeyen numunelerin dayanımından daha yüksektir. 1000 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra, bağlayıcı olarak tamamen YFC'den oluşan numunelerin basınç dayanımları, daha düşük başlangıç mukavemetine sahip olmalarına rağmen %15 PÇ içeren numunelerden daha yüksek olmuştur.

5.3.2. Görsel İnceleme

PÇ ikamesiz ve %15 PÇ ikameli numunelerin farklı yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki fiziksel görünüşleri arasında bir fark meydana gelmemiştir. Bu nedenden ötürü fiziksel görünüm sunulurken 6C15 numunesi diğer harç numunelerini de temsil etmek suretiyle seçilmiştir. 6C15 kodlu numunenin yüksek sıcaklıklara maruz kalmadan önce ve farklı yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki fiziksel görünüşleri Şekil 5.21'de verilmiştir. Birinci satır soldan sağa yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamış numune ile 200 ve 400 °C sıcaklıklara maruz bırakılan numuneleri gösterirken, ikinci satır soldan sağa 600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakılan numuneleri göstermektedir.

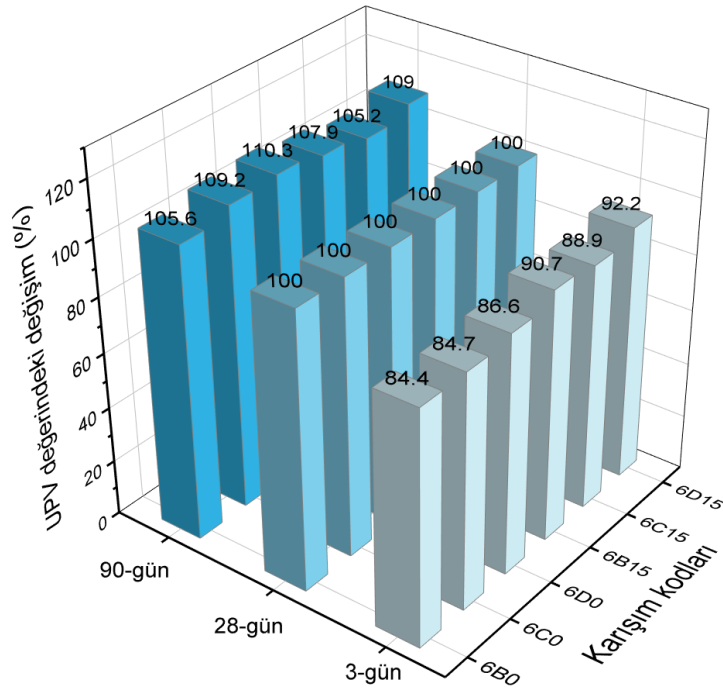


Şekil 5.21. Yüksek sıcaklıklar sonrası numunelerin fiziksel görünümü

Geleneksel betonda bozulma, beton 800 °C sıcaklığa maruz kaldığında kristal hidratlardan nem kaybının bir sonucu olarak gerçekleşmektedir. Bu durum betonun dökülmesine neden olmaktadır [103]. Hafif agregaların buharlaşabilir su için su rezervuarı görevi görmesi nedeniyle, geleneksel bağlayıcı ile üretilen hafif ağırlıklı betonların yüksek sıcaklıklarda dökülme direnci, genellikle normal ağırlıklı betona göre daha kötü olmaktadır [21, 168]. Bu çalışmada ise numuneler hafif ağırlıklı PA ile üretilmesine rağmen 1000 °C sıcaklıktan sonra bile herhangi bir dökülme meydana gelmemiştir. Yüzey çatlakları yaklaşık 600 °C sıcaklıkta ortaya çıkmaya başlamış, daha yüksek sıcaklıklarda büyümeye devam etmiştir. 1000 °C sıcaklıkta yüzey çatlakları daha belirgin hale gelmiştir. AAC'deki nanogözenekler sayesinde nem, betonu aşırı sıcaklıklarda terk etmenin bir yolunu bulur, bu nedenle alüminosilikat ağında herhangi bir hasar meydana gelmez [103].

5.3.3. Ultra Ses Hızı Ölçüm Deneyi Sonuçları

PÇ ikamesiz ve %15 PÇ ikameli altı adet harç karışımından üretilen numunelerin 3 ve 90 günün sonunda ölçülen UPV değerleri, 28 günün sonunda ölçülen UPV değerleriyle kıyas edilmiş, sonuçlar Şekil 5.22'deki grafikte gösterilmiştir.

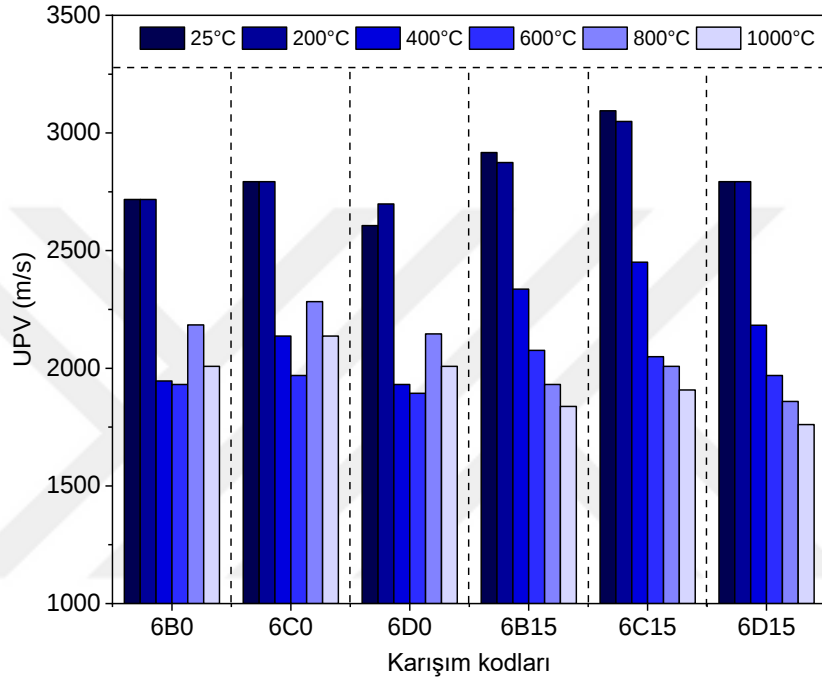


Şekil 5.22. 3 ve 90 günlük görel UPV değerleri

28 günlük UPV değerleriyle kıyas edildiğinde PÇ ikamesiz numunelerin üç günün sonunda ölçülen UPV değerleri 6B0, 6C0 ve 6D0 kodlu numuneler için sırasıyla %15.6, 15.3 ve %13.4 daha düşük olmuştur. %15 PÇ ikameli harç numuneleri için ise bu oranlar sırasıyla %9.3, 11.1 ve 7.8 olmuştur. Basınç deneyi sonuçlarında olduğu gibi PÇ ikameli numunelerin üç günün sonunda ölçülen UPV değerlerinin 28 günün sonunda ölçülen UPV değerlerine oranı PÇ ikamesiz numunelerden daha yüksek olmuştur. 28 günlük UPV değerleri ile kıyas edildiğinde altı adet numuneye ait üç günlük ortalama UPV değeri ortalama %87.9 iken, basınç dayanımında ölçülen bu değer %48.9 olmuştur. 90 günün sonunda ölçülen UPV değerleri basınç dayanımında olduğu gibi artmıştır. Fakat bu artış oranları basınç dayanımlarında ölçülen artış oranlarından daha düşük olmuştur. 28 günlük UPV değeri ile kıyas edildiğinde PÇ içermeyen numunelerin 90 günlük UPV değerleri 6B0, 6C0 ve 6D0 kodlu numuneler için sırasıyla %5.6, 9.2 ve 10.3 artmışken, %15 PÇ ikameli 6B15, 6C15 ve 6D15 kodlu numuneler için sırasıyla %7.9, 5.2 ve 9 artmıştır.

Şekil 5.23, 28 gün sonunda yüksek sıcaklığa maruz bırakılmayan referans numuneler ile 200, 400, 600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklardan sonraki numunelerin UPV değerlerini göstermektedir. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmayan 6B0, 6C0, 6D0, 6B15, 6C15 ve 6D15 numunelerinin UPV değerleri sırasıyla 2717, 2793, 2606, 2917, 3094 ve 2793 m/s olarak kaydedilmiştir. 200 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra 6B0, 6C0, 6D0, 6B15, 6C15 ve 6D15 numunelerinin UPV değerleri sırasıyla 2717, 2793, 2698, 2874, 3049 ve 2793 m/s olarak ölçülmüştür. 200 °C sıcaklıktan sonra PÇ içermeyen 6D0 kodlu harç numunesinin UPV değeri %3.5 artarken, %15 PÇ

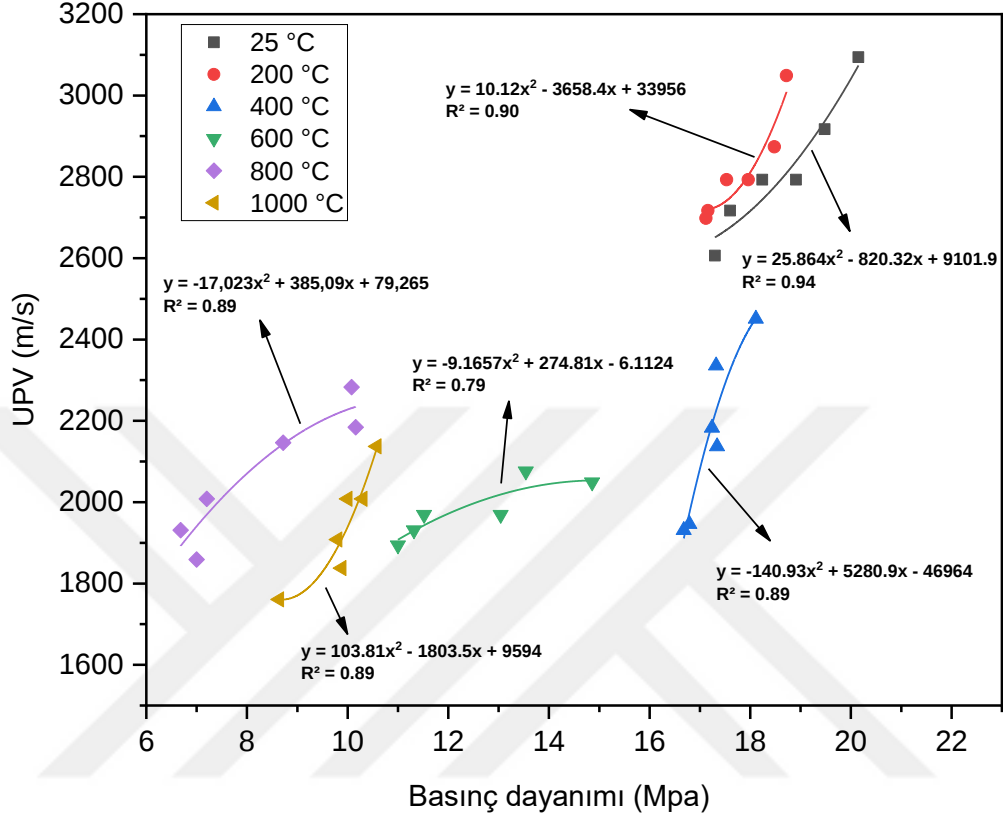
ikameli 6B15 karışımın UPV değeri %1.47 azalmıştır. 400 °C, tüm numunelerin UPV değerlerinin önemli ölçüde düştüğü sıcaklık değeri olmuştur. Bu sıcaklık değerinde basınç dayanımında gözlenen en büyük düşüş %11.1 olurken, UPV değerlerinde ölçülen en büyük düşüş %28.4 olmuştur. 600 °C sıcaklıkta UPV değerinde düşüşler devam etmiştir. 600 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra 6B0, 6C0, 6D0, 6B15, 6C15 ve 6D15 karışımlarının UPV değerlerindeki düşüş sırasıyla %28.9, 29.5, 27.3, 28.8, 33.8 ve 29.5 olarak kaydedilmiştir.



Şekil 5.23. Yüksek sıcaklık sonrası UPV değerleri

800 °C sıcaklıkta çarpıcı bir sonuç kaydedilmiştir. PÇ içermeyen 6B0, 6C0 ve 6D0 numunelerinin UPV değerleri 600 °C sıcaklık değerinde kaydedilen UPV değerine kıyasla sırasıyla %13.1, 15.9 ve 13.3 artmıştır. % 15 PÇ ikameli numunelerin UPV değerleri ise düşmeye devam etmiştir. 1000 °C sıcaklık değerinde ise PÇ ikamesinden bağımsız olarak tüm numunelerin UPV değerleri düşmüştür. 1000 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra PÇ içermeyen 6B0, 6C0 ve 6D0 kodlu numunelerin UPV değerleri sırasıyla 2008, 2137 ve 2008 m/s olarak ölçülmüştür. %15 PÇ ikameli numunelerin ise UPV değerleri sırasıyla 1838, 1908 ve 1761 m/sn olarak ölçülmüştür. Yüksek sıcaklık deneyinden önce %15 PÇ ikameli numunelerin UPV değerleri PÇ ikamesiz numunelerin UPV değerlerinden yüksektir. 1000 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra en yüksek UPV değerleri, başlangıç UPV değerleri daha düşük olmasına rağmen PÇ içermeyen numunelerden elde edilmiştir. Bu durum basınç deneyi sonuçlarıyla örtüşmektedir. PÇ ikamesiz numunelerin hem basınç dayanımları hem de UPV değerleri yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce PÇ ikameli numunelerden daha düşükken 1000 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra daha yüksek olmuştur. Şekil

5.24, yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra numunelerin UPV değerleri ile basınç dayanımı arasındaki korelasyonu göstermektedir.



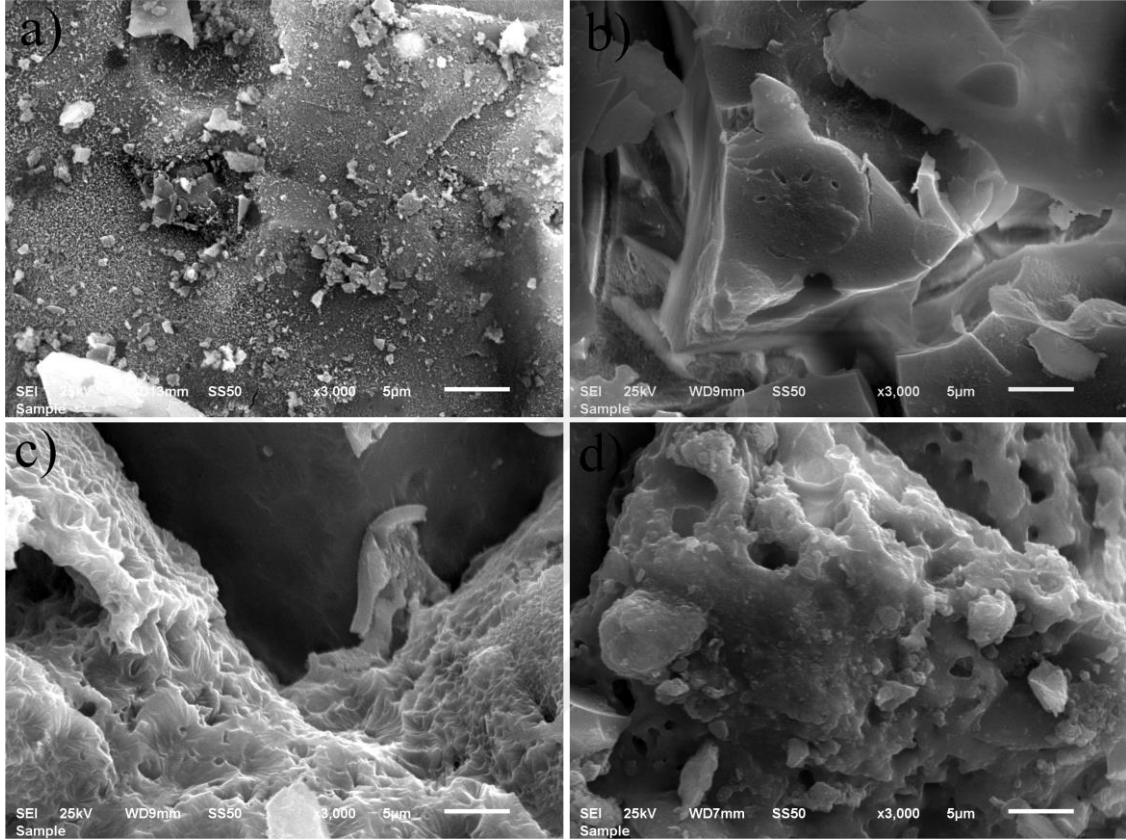
Şekil 5.24. UPV değerleri ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

Şekil ayrıca yüksek sıcaklığa maruz kalmayan numunelerin basınç dayanımı ile UPV değeri arasındaki korelasyonu da göstermektedir. Yüksek sıcaklığa maruz kalmayan numunelerin UPV değeri ile basınç dayanımı arasında R^2 katsayısı 0.94 olarak hesaplanmıştır. Bu değer yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce UPV değeri ile basınç dayanımı arasında yüksek bir korelasyon olduğunu göstermektedir. 200 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra UPV değeri ile basınç dayanımı arasındaki R^2 katsayısı 0.902 olarak hesaplanmıştır. 200 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra UPV değeri ile basınç dayanımı arasında hesaplanan R^2 katsayısı 0.9'un altında olmuştur. UPV değeri ile basınç dayanımı arasında en düşük korelasyon katsayısı 400 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra hesaplanmıştır.

5.3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu Analiz Sonuçları

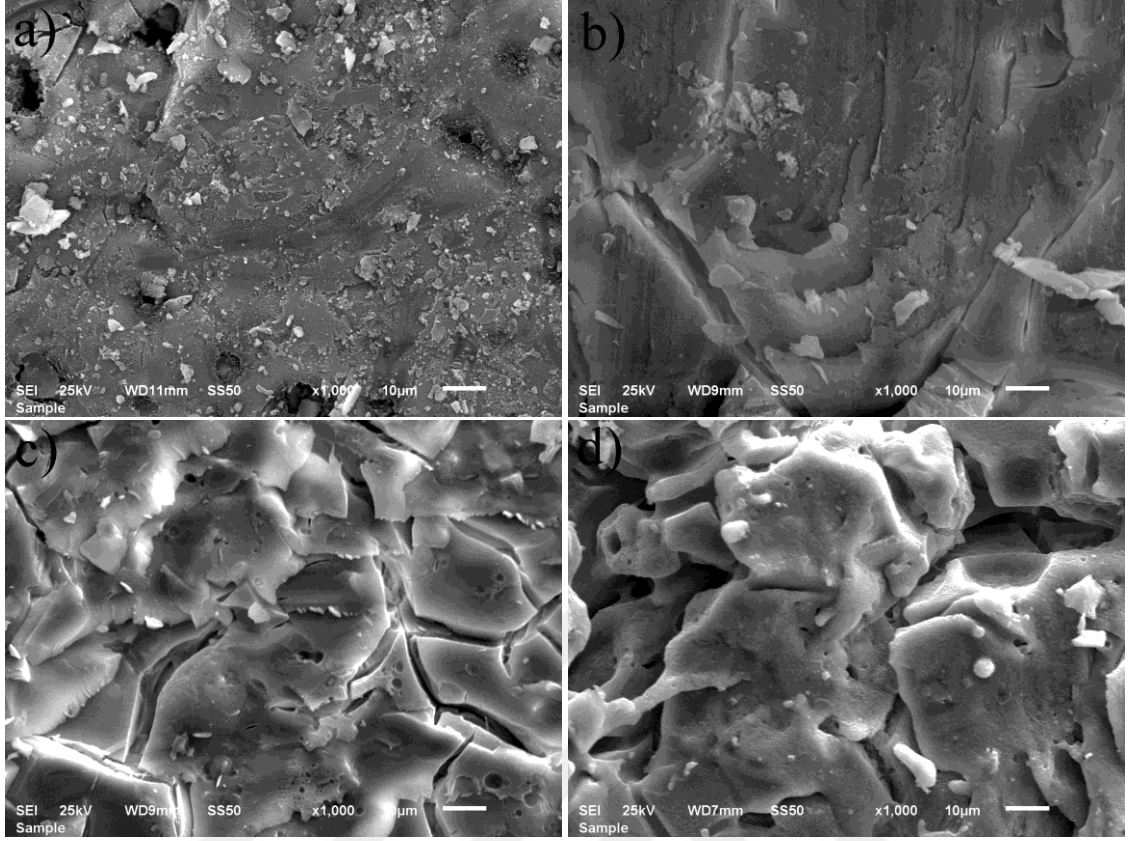
Alkali-aktif YFC/PÇ harç numunelerinin mikro yapı analizi için taramalı elektron mikroskobu ile iç yapı analizleri yapılmıştır. SEM analizi için 28 günün sonunda yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan numuneler ile yüksek sıcaklığa maruz bırakılmayan referans numuneleri kullanılmıştır.

Şekil 5.25a, b, c ve d sırası ile PÇ içermeyen (6C0) alkali-aktif harç numunesinin oda sıcaklığındaki SEM görüntüsü ile 600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki SEM görüntülerini göstermektedir.



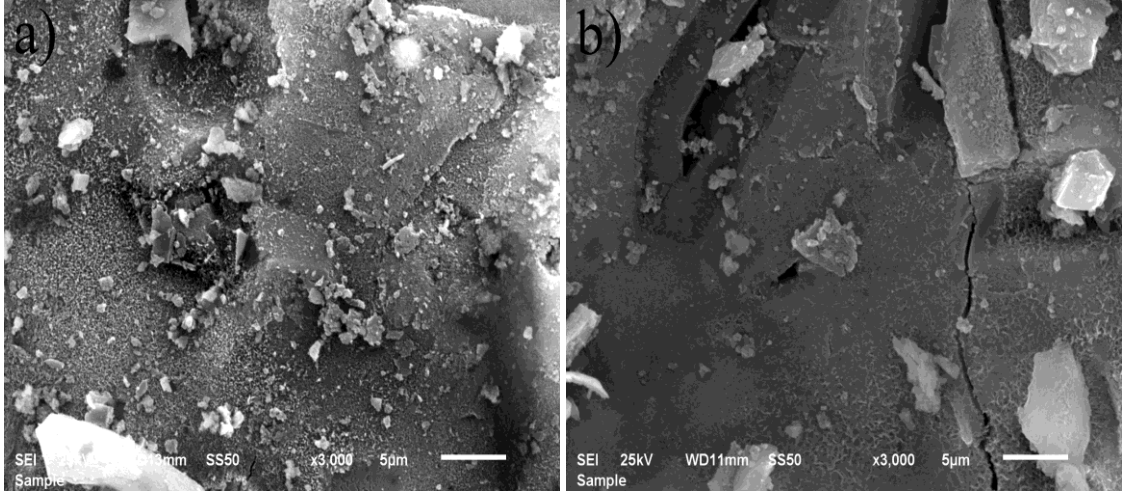
Şekil 5.25. PÇ içermeyen numunelerin yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası SEM görüntüleri

Bu sıcaklıklar, numunelerin morfolojisindeki değişiklikleri anlamak açısından en önemlileridir [113]. AAC'lerde kuruma büzülmesine bağlı olarak oluştuğu belirtilen mikro çatlaklar 600°C derece sıcaklıktan sonra iyice belirginleşmiştir [113]. Türker vd. bu mikroçatlakların yüksek sıcaklık ile kür edilen AAC'lerde net bir şekilde oluştuğunu, ortam koşullarında kür edilen AAC'lerde ise daha belirsiz olduğunu belirtmiştir [141]. Harç numunesinin morfolojisi, 800 °C sıcaklığa maruz kaldığında hızla değişir. 800 ve 1000 °C sıcaklıklarda, bağlayıcının ayrışması ve daha fazla büzülmesi nedeniyle gözeneklilik artar [113]. 1000 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra oluşan boşluklar şekilde net bir şekilde görülmektedir. 800 ve 1000 °C sıcaklıklardan sonra artan bu gözeneklilik basınç dayanımında meydana gelen önemli bir düşüşle ilişkilidir. Şekil 5.26a, b, c ve d sırası ile %15 PÇ içeren (6C15) alkali-aktif harç numunesinin oda sıcaklığındaki SEM görüntüsü ile 600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki SEM görüntülerini göstermektedir.



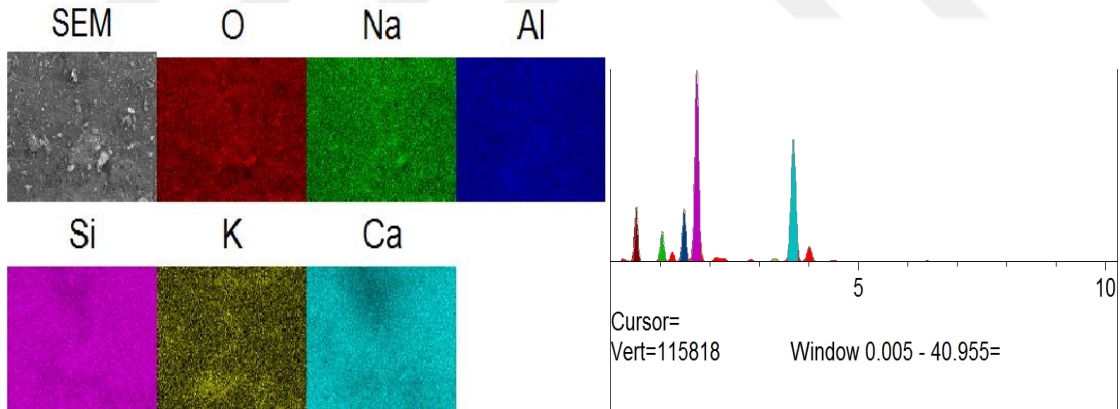
Şekil 5.26. % 15 PÇ ikameli numunelerin yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası SEM görüntüleri

Bir önceki sıcaklık değerine kıyasla PÇ ikamesiz numunelerin basınç dayanımında en büyük düşüş 600 °C sıcaklıkta meydana gelmişken, %15 PÇ ikameli numunelerin basınç dayanımındaki en büyük düşüş 800 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra gerçekleşmiştir. Bu sonucun SEM görüntüleri ile tutarlı olduğu görülmektedir. PÇ içermeyen numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde 600°C sıcaklıktan sonra boşlukların belirgin olduğu görülmektedir. %15 PÇ ikameli numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde boşlukların/çatlakların 800 °C'den sonra iyice belirginleşmeye başladığı görülmektedir. Şekil 5.27'de sırasıyla PÇ içermeyen ve %15 PÇ ikameli harç numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. PÇ ikamesiyle beraber mikroçatlakların seviyesinin arttığı görülmektedir. Bu durum PÇ ikamesiyle hidrasyon ısısında meydana gelen artış ile açıklanmaktadır [19]. Amer vd. [154] aktivatör olarak Na_2SiO_3 ve NaOH kullandıkları çalışmada YFC tabanlı alkali-aktif kompozitlerde PÇ ikamesinin atmasıyla, çatlağın hem yayılması ve hem de genişlemesi suretiyle mikro ölçekte çatlama seviyesinin arttığını belirtmiştir. YFC'nin %20 oranında PÇ ile ikame edildiği bir başka çalışmada maruz kalınan yüksek kuruma büzülmesinden dolayı küçük çatlaklar gözlemlendiği belirtilmiştir [19]. PÇ ikameli harç numunesinde gözlenen parçacıklar bazı araştırmacılar tarafından gehlenit hidrat (C_2ASH_8) olarak tanımlanmıştır [169].

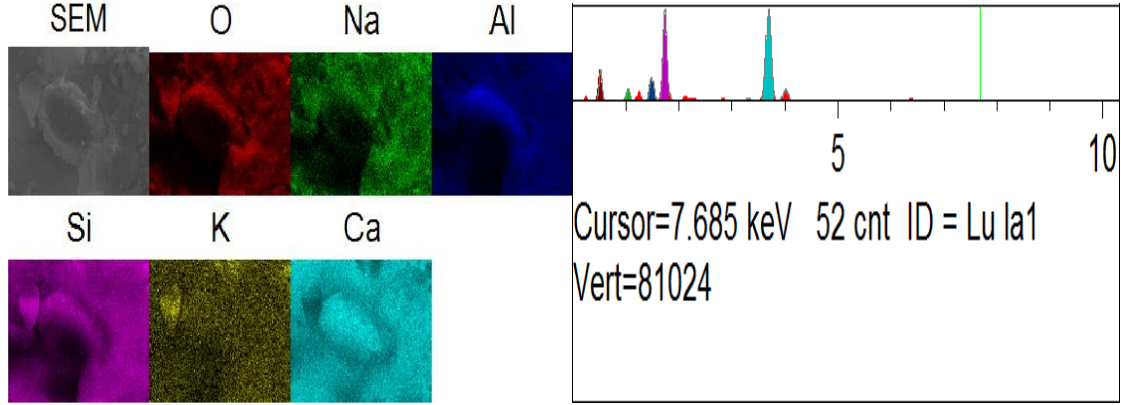


Şekil 5.27. PÇ içermeyen ve %15 PÇ ikameli numunelerin SEM görüntülerinin kıyaslanması

Şekil 5.28, PÇ içermeyen 28 günlük harç numunesinin (6C0) SEM/EDX elemental haritalamasını gösterirken Şekil 5.29, %15 PÇ ikameli 28 günlük harç numunesinin (61C5) SEM/EDX elemental haritalamasını göstermektedir. Elemental haritalarda, O kırmızı, Na yeşil, Al lacivert, Si mor, K sarı ve Ca turkuaz renklerinde gösterilmektedir. SEM/EDX haritalama analizi elementlerin harç numuneleri içerisinde homojen dağıldığını göstermektedir.



Şekil 5.28. PÇ içermeyen numunenin elemental haritalandırılması



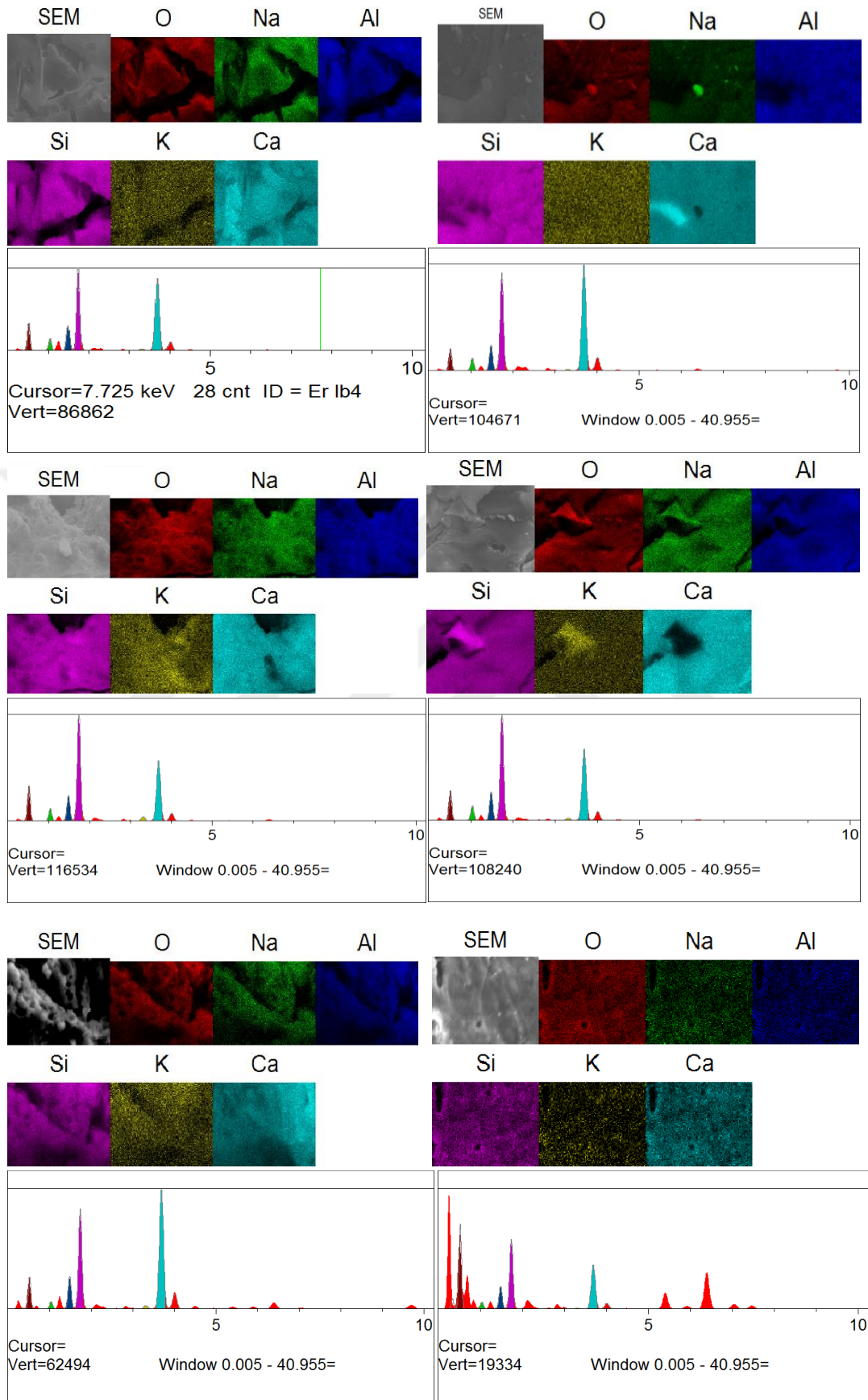
Şekil 5.29. %15 PÇ ikameli numunenin elemental haritalandırılması

Tablo 5.1’de PÇ içermeyen ve %15 PÇ ikameli harç numunelerinin SEM/EDX analiz sonucu verilmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamış PÇ ikamesi içermeyen harç numunesinde Ca/Si’nin ağırlıkça oranı 0.67 iken %15 PÇ ikamesinde Ca/Si’nin ağırlıkça oranı 1.07’dir. Amer vd. [154] benzer oranlarda Ca/Si oranı elde ettiği PÇ ikameli alkali-aktif YFC numuneleri üzerine yaptıkları çalışmada, Ca/Si oranlarını baz alarak, bağlayıcı fazının oluşumunda rol oynayan YFC tanelerinin kısmi çözünmesini doğruladığını belirtmiştir.

Tablo 5.1. PÇ içermeyen ve % 15 PÇ ikameli numunelerin SEM/EDX analiz sonucu

	PÇ içermeyen numune		%15 PÇ ikameli numune	
	Ağırlıkça (%)	Atomik (%)	Ağırlıkça (%)	Atomik (%)
O	42.51	59.64	46.11	62.44
Na	7.11	6.48	5.46	5.15
Al	7	5.44	5.78	4.64
Si	25.65	19.15	20.33	15.68
K	0.481	0.26	0.51	0.28
Ca	17.24	9.03	21.81	11.81

PÇ içermeyen numunenin Si, Ca, Al, Na elementleri ağırlıkça %25.65, 17.24, 7, 7.11 oranlarındadır. PÇ içermeyen numunenin atomik Si/Al, Ca/Si ve Al/Ca oranları sırasıyla 3.52, 0.47 ve 0.60’tır. Element analizi sonucunda %15 PÇ içeren harç numunesinin atomik Si/Al, Ca/Si ve Al/Ca oranları sırasıyla 3.38, 0.75 ve 0.39 olarak tespit edilmiştir. Numunelerin 600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonraki SEM/EDX elemental haritalandırılması Şekil 5.30’da gösterilmektedir. 1. Sütun yukarıdan aşağıya PÇ içermeyen numunelerin 600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklardan sonra SEM/EDX elemental haritalandırılmasını gösterirken, 2. Sütun yukarıdan aşağıya %15 PÇ içeren numunelerin 600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklardan sonra SEM/EDX elemental haritasını göstermektedir. Maruz kalınan yüksek sıcaklıklardan sonra elementlerin numune üzerinde homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir.



Şekil 5.30. Yüksek sıcaklıklardan sonra numunelerin elemental haritalandırılması

600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakılan harç numunelerine ait SEM/EDX sonuçları ise Tablo 5.2’de verilmiştir.

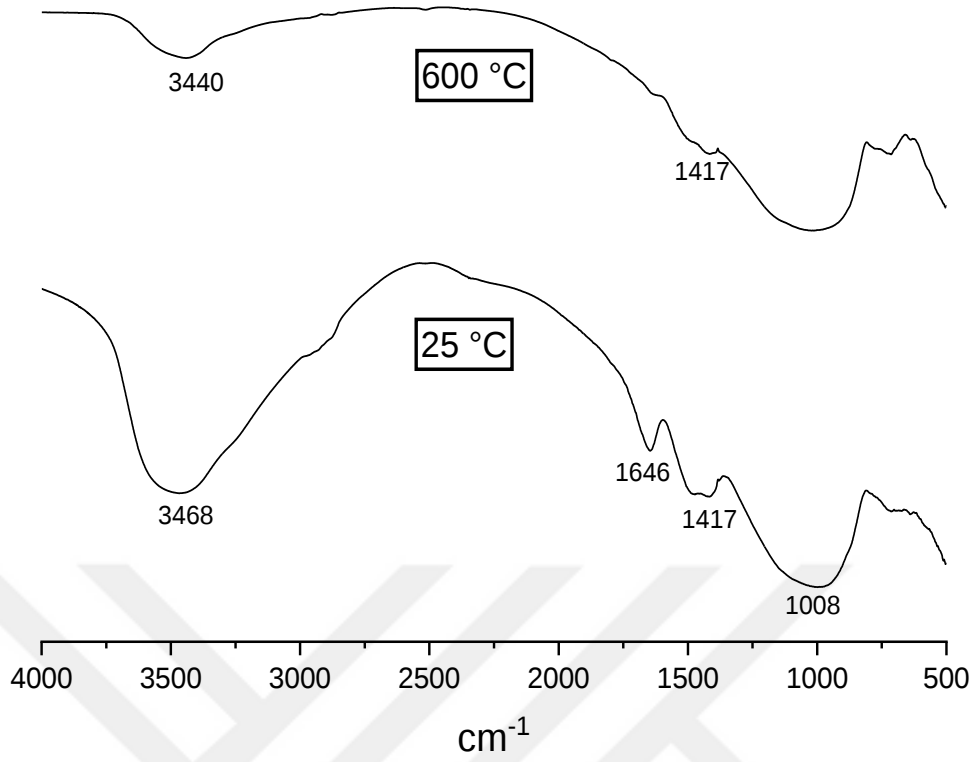
Tablo 5.2. Yüksek sıcaklıklardan sonra numunelerin SEM/EDX analiz sonucu

Element	6C0-600	6C15-600	6C0-800	6C15-800	6C0-1000	6C15-1000
	Ağırlık (%)	Ağırlık (%)	Ağırlık (%)	Ağırlık (%)	Ağırlık (%)	Ağırlık (%)
O	45.27	39.10	46.48	43.01	45.47	66.49
Na	5.81	5.64	5.50	6.27	2.88	3.21
Al	6.82	6.18	6.22	6.84	6.60	5.25
Si	21.52	22.27	25.23	25.16	19.16	14.90
K	0.45	0.33	1.01	0.59	0.65	0.18
Ca	20.14	26.48	15.55	18.14	25.25	9.97

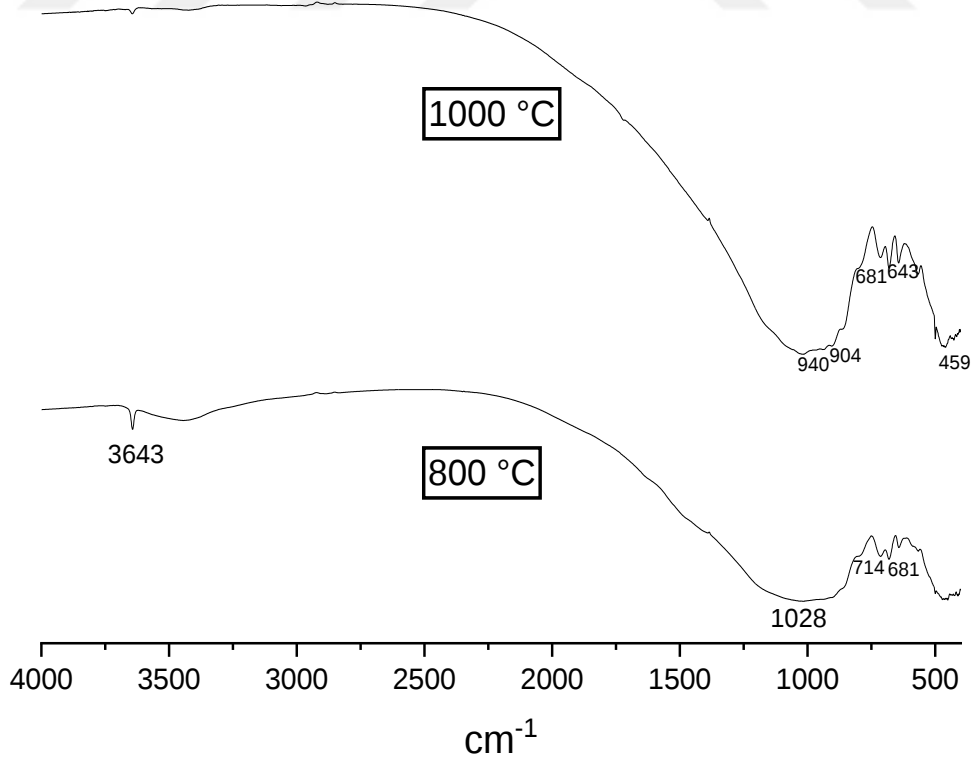
Puertas vd. [170] kullanılan alkali aktivatörün AAC üzerinde etkisi olduğunu ifade etmiş, Na_2SiO_3 kullanıldığında Ca/Si oranının NaOH kullanıldığında elde edilen Ca/Si oranına kıyasla daha düşük olduğunu belirtmiştir. Aktivatör olarak Na_2SiO_3 kullanıldığında silika modülünün, Si elementinin oranını etkilediği görülmüştür. Türker vd. [141] Si/Al, Ca/Si, Na/Si ve Al/Ca'nın atomik oranlarının, maruz kalınan yüksek sıcaklık seviyesine bağlı olarak önemli ölçüde değişmediğini belirtmiştir. PÇ içermeyen harç numuneleri 600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklara maruz kaldığında Ca elementinin ağırlıkça oranı sırasıyla %20.14, 15.55 ve 25.25 olmuştur. Si elementinin ağırlıkça oranı ise sırasıyla %21.52, 25.23 ve 19.16'dır. %15 PÇ içeren harç numuneleri 600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklara maruz kaldığında Si elementinin ağırlıkça oranı sırasıyla %22.27, 25.26 ve 14.9 olmuştur.

5.3.5. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Analizi Sonuçları

Şekil 5.31 ve Şekil 5.32 PÇ içermeyen yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamış numunenin FTIR spektrumu ile 600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklardan sonraki FTIR spektrumlarını göstermektedir.

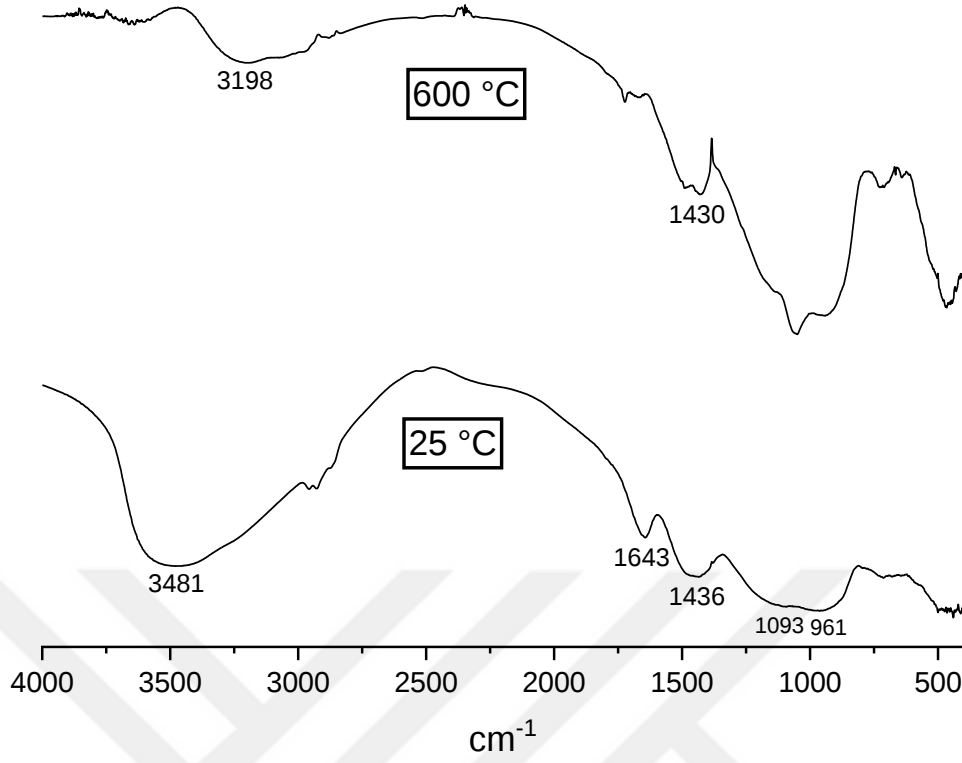


Şekil 5.31. PÇ içermeyen numunelerin 25 °C'deki ve 600 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki FTIR spektrumları

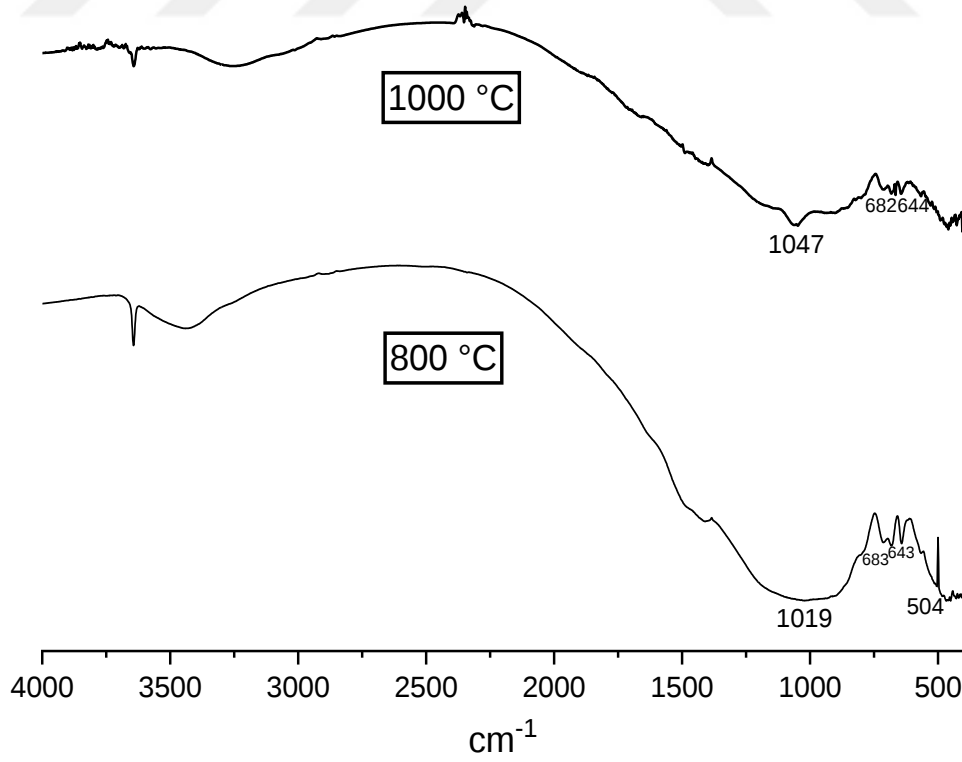


Şekil 5.32. PÇ içermeyen numunelerin 800 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki FTIR spektrumları

Şekil 5.33 ve Şekil 5.34 ise %15 oranında PÇ içeren yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamış numunelerin FTIR spektrumu ile 600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklardan sonraki FTIR spektrumlarını göstermektedir. Yüksek sıcaklığa maruz kalmayan PÇ ikamesiz ve %15 PÇ ikameli numunelerde H-O-H gruplarının germe titreşim modlarına tanımlanan yüksek yoğunluklu geniş bir bant (3400-3500 cm^{-1} aralığında) görülmektedir[171]. Bu bant değeri PÇ içermeyen harç numunesinin spektrumunda 3468 cm^{-1} 'de, %15 PÇ ikameli harç numunesinin spektrumunda ise 3481 cm^{-1} 'de oluşmuştur. Şekil 5.31 ve Şekil 5.33'deki yüksek sıcaklığa maruz kalmamış numunelerin spektrumlarında yaklaşık 1640 cm^{-1} 'de gözlenen küçük bir titreşim bandı H-O-H bağlarının bükülme titreşim modlarına karşılık gelmektedir [171]. Oluşan C-S-H veya C-A-S-H jeline Si-O bağının en güçlü (daha uzun zincirler) titreşimine karşılık gelen bant spektrumda gözlemlenebilir. Bu alkali-aktif çimentoların karakteristiğidir ve 960 ile 980 cm^{-1} arasındaki dalga sayılarında meydana gelir, ancak kullanılan alüminosilikat esaslı malzemeye bağlı olarak daha yüksek dalga sayılarında (1050 cm^{-1}) bulunabilir [19]. 950-1250 cm^{-1} arasındaki bantın Si-O-Si veya Si-O-Al bağının asimetrik germe titreşim modu ile ilişkili olduğu ifade edilmiştir [171–173]. Zhang vd. [97] 1417-1471 cm^{-1} 'de gözlenen titreşimlerin C-O bağı ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. Bu, PÇ'ye CaCO_3 eklenmesi nedeniyle PÇ harman fraksiyonundaki CO_3^{2-} 'ye atfedilebilen CaCO_3 karakteristiğine karşılık gelir. Bu bağın (1417 cm^{-1}) PÇ içermeyen numunede gözlemlenmesi atmosferik karbonatlaşma ile ilişkilidir [174]. 600 ile 750 cm^{-1} arasındaki küçük bantlar SiO_4 ve MgO_4 gruplarının hem simetrik esneme hem de bükme modları ile ilişkilidir. Sıcaklık arttıkça CO_3^{2-} 'nin karakteristik soğurma bantları kaybolur ve bu da ayrışma ve CO_2 salınımını gösterir [35, 113].



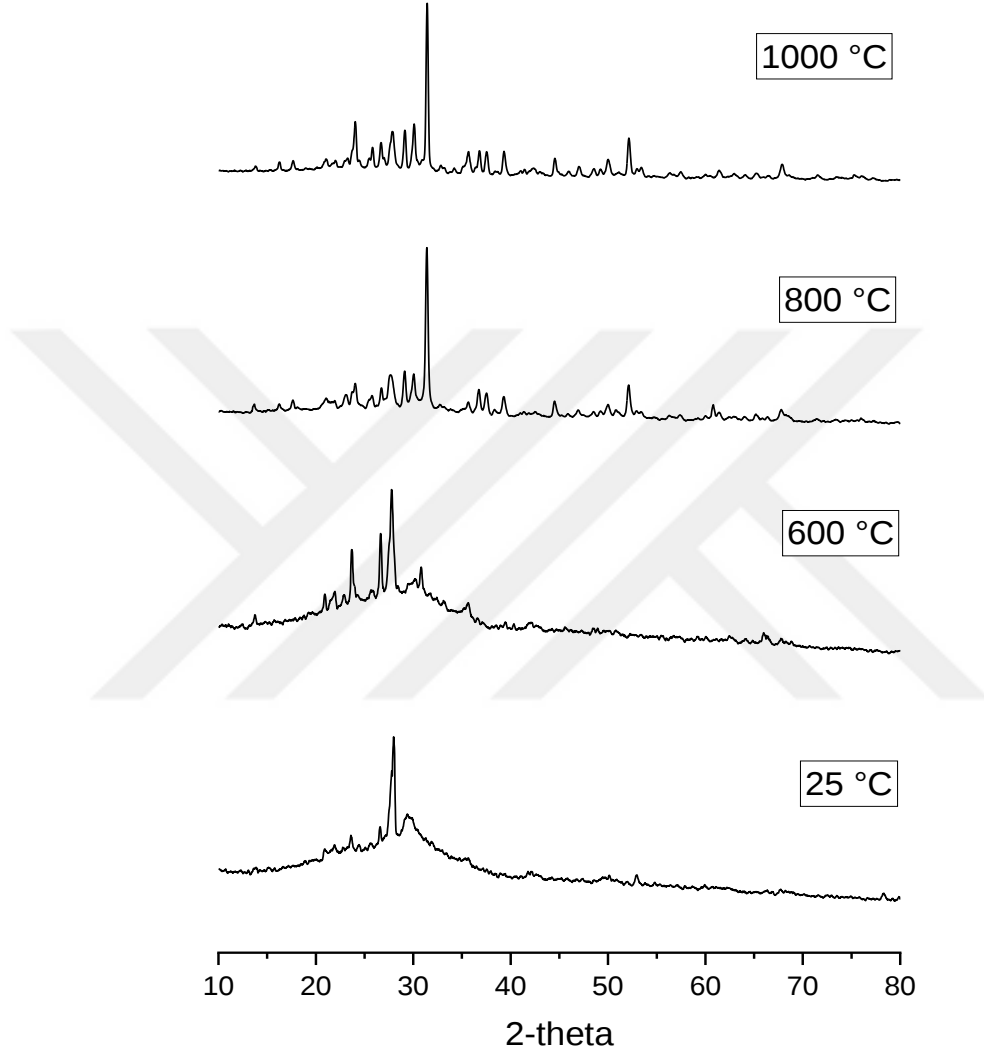
Şekil 5.33. %15 PÇ ikameli numunelerin 25 °C'deki ve 600 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki FTIR spektrumları



Şekil 5.34. %15 PÇ ikameli numunelerin 800 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki FTIR spektrumları

5.3.6. X-Işını Difraktometresi Analizi Sonuçları

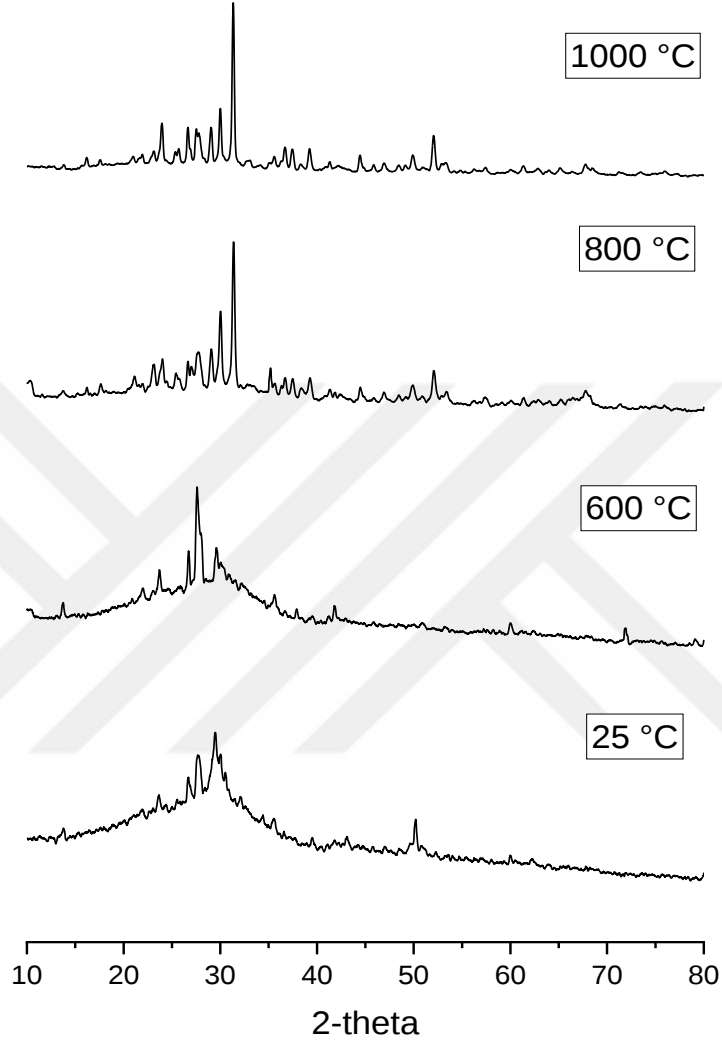
Şekil 5.35, 28 gün sonunda PÇ içermeyen harç numunesinin XRD spektrumu ile 600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonraki XRD spektrumlarını göstermektedir.



Şekil 5.35. PÇ içermeyen numunelerin 25 °C ile 600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki XRD spektrumları

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamış alkali-aktif harç numunesi amorf bir fazdan oluşmaktadır [113]. Angulo-ramirez %80 oranında YFC, %20 oranında PÇ içeren alkali-aktif YFC/PÇ bağlayıcının XRD analizinde Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) karşılık gelen piklerin meydana gelmediğini belirtmiştir. Bu durum diğer çalışmalarda [20, 175, 176] elde edilen sonuçlara benzerdir ve karışımdaki daha düşük PÇ miktarına ve karışımdaki yüksek pH'ın bir sonucu olarak PÇ'de hidratasyon reaksiyonunun gecikmesine veya inhibisyonuna atfedilmektedir. Şekil 5.36 ise 28 gün

sonunda %15 PÇ ikameli harç numunesinin XRD spektrumu ile 600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonraki XRD spektrumlarını göstermektedir.



Şekil 5.36. %15 PÇ ikameli numunelerin 25 °C ile 600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki XRD spektrumları

Türker vd. 28 gün boyunca 25 °C kür edilen AAC harç numunelerinin XRD analizinde quartz, nepheline, albite tespit edildiğini belirtmiştir [141]. Ye vd. [108] AAC numunesi için belirtilen bu kristal fazların alümino-silikat mineraller olduğunu belirtmekle beraber yük dengesi iyonlarının ise Na^+ gibi alkali metal iyonlar olduğunu ifade etmiştir. Türker vd. kristal fazların YFC'nin önemli bir bileşeni olan CaO 'nun reaksiyona katılmasının bir sonucu olarak Na^+ 'ya ek olarak Ca^{2+} içeren alüminosilikat mineraller olduğunu belirtmiştir. Dayanımdaki azalmanın sıkışan jeller ve genişleyen kuvars kumu arasındaki termal uyumsuzluğun etkilerine ek olarak bileşimdeki bu değişiklikle de ilişkili olduğu bilinmektedir [141]. Bu nedenle, jel ayrışması, kristalleşme ve termal

uyumsuzluğun hep birlikte çok yüksek sıcaklıklara maruz kalan harçların dayanımında net bir azalmaya neden olduğu sonucuna varılabilir [141].

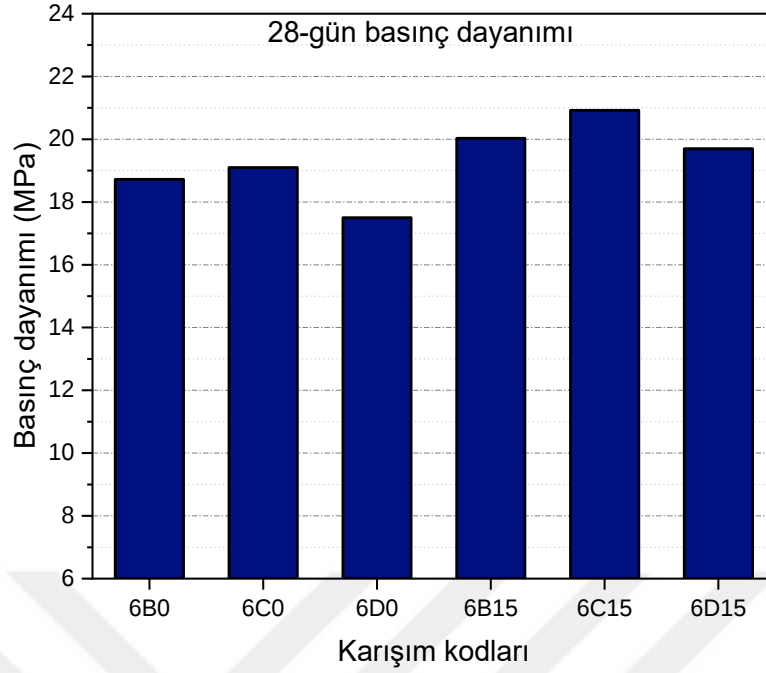
Hem PÇ içermeyen hem de %15 PÇ ikameli harç numunelerinde yüksek sıcaklığa maruz kalmanın yapısal değişim üzerine etkisi olmuştur [165]. Rovnanik vd.'nin elde ettiği sonuçlarla tutarlı olarak 600 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra amorf faz alkali-aktif YFC/PÇ harcının yapısında hala ana faz olarak görülmektedir [113]. 800 ve 1000 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra hem PÇ ikamesiz he de PÇ ikameli harç numunelerinin XRD spektrumlarında yeni pikler oluşmuştur. Bu durum 800 °C sıcaklıktan sonra amorf fazın kristal faza dönüşmeye başladığını göstermektedir [177].

5.4. Sülfat Saldırısı Deneyi Sonuçları

PÇ ikamesiz ve %15 PÇ ikameli alkali-aktif harç numuneleri altı ay boyunca %5 konsantrasyonlu Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerinde bekletildikten sonra basınç deneyi yapılmış ve ağırlıkta meydana gelen değişimler hesaplanmıştır. Numunelerin görsel incelenmesinin yanı sıra FTIR analizi gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları alt başlıklarda sunulmuştur.

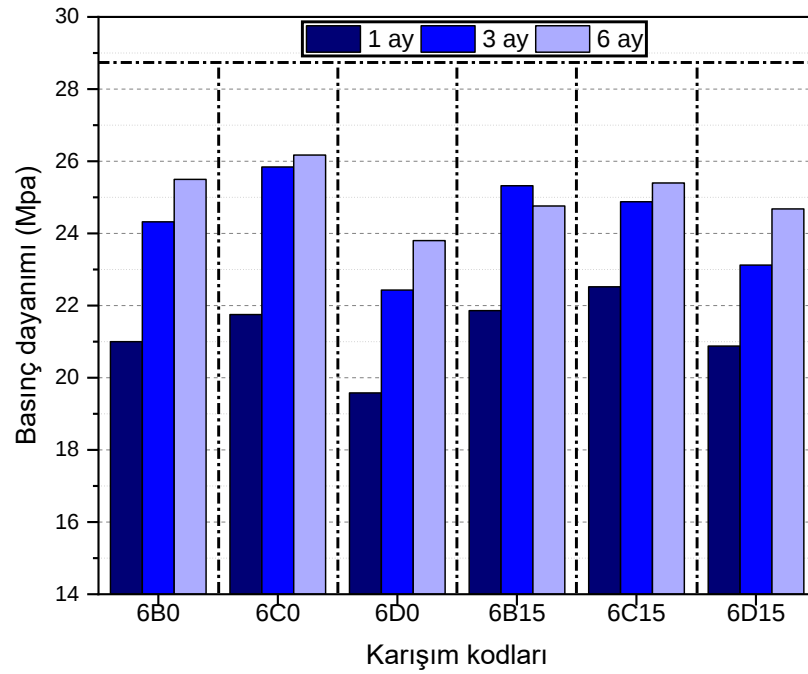
5.4.1. Basınç Deneyi Sonuçları

Yüksek sıcaklık deneyinde olduğu gibi sülfat saldırısı deneyi için önceden üretilen 48 adet karışım arasından basınç dayanımı ve işlenebilirlik açısından en ideal sonuçları veren karışımlar tekrardan üretilmiştir. Bu karışımların nasıl seçildiği önceki bölümlerde ifade edilmiştir. 6B0, 6C0, 6D0, 6B15, 6C150 ve 6D15 numuneleri sülfat direncinin incelenmesi için tekrar üretilmiştir. Şekil 5.37 6B0, 6C0, 6D0, 6B15, 6C15 ve 6D15 kodlu harç numunelerinin 28 günlük kür süresinden sonra ölçülen basınç dayanımlarını göstermektedir. En düşük basınç dayanımı 17.5 MPa ile 6D0 kodlu harç numunesinden elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı ise 20.92 MPa ile %15 PÇ içeren 6C15 kodlu numuneden elde edilmiştir. %15 PÇ ikamesiyle 6B0, 6C0 ve 6D0 karışımlarının basınç dayanımları sırasıyla %7, 9.5 ve 12.6 artmıştır. 0.4 a/b oranında, su içeriği %8'den %10'a çıkarıldığında basınç dayanımlarında düşüşler meydana gelmiştir. 6C0 kodlu numunenin su içeriği artırıldığında basınç dayanımındaki azalma %8.4 iken 6C15 kodlu numune için bu azalma oranı %5.8 olmuştur. Alkali aktivatör olarak kullanılan Na_2SiO_3 çözeltisinin %63'ü, NaOH çözeltisinin ise %67'si sudan oluşmaktadır. Bu da a/b oranı arttıkça toplam sıvı/katı oranının arttığı anlamına gelmektedir. Hem PÇ ikameli hem de PÇ içermeyen numunelerin %10 su içeriğinde a/b oranı 0.35'ten 0.4'e arttırıldığında basınç dayanımlarında düşüşler meydana gelmiştir.



Şekil 5.37. 28 günlük basınç dayanımları

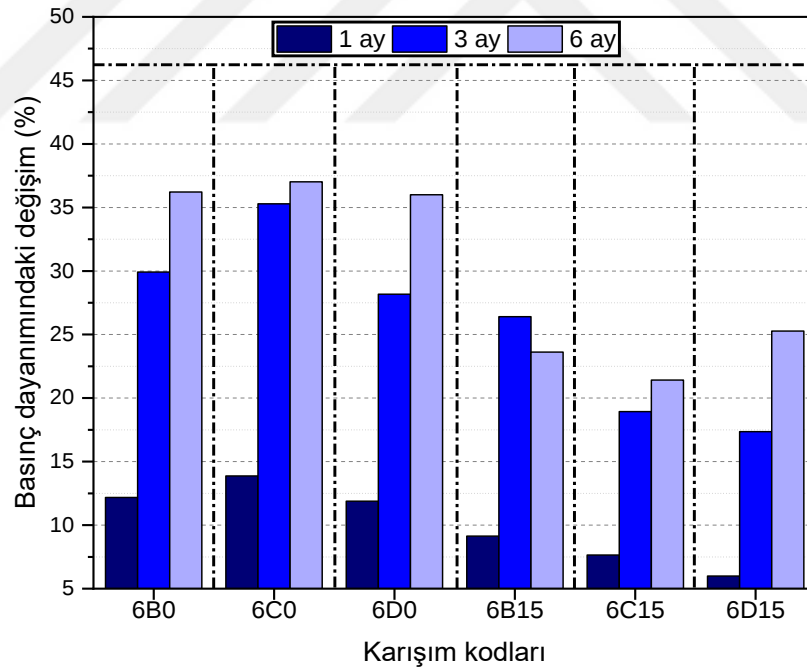
Harç numunelerinin %5 konsantrasyonlu Na_2SO_4 çözeltisinde bir, üç ve altı ay boyunca bekletildikten sonraki basınç dayanımları Şekil 5.38’de verilmiştir.



Şekil 5.38. Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımları

Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilmeyen referans numunelere kıyasla basınç dayanımında meydana gelen değişimler ise Şekil 5.39'da gösterilmektedir. Şekil 5.39'dan görüleceği üzere PÇ ikamesine bakılmaksızın tüm numunelerin basınç dayanımı Na₂SO₄ çözeltisinde bekletildikten sonra artmıştır. Fernandez-Jimenez vd. [178] 28 gün boyunca 25 °C sıcaklıkta kür edilmiş numuneleri altı ay boyunca Na₂SO₄ çözeltisine maruz bıraktığında hem PÇ içeren hem de PÇ içermeyen numunelerin basınç dayanımının arttığını belirtmiştir. Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilmeyen referans numunelerin basınç dayanımı ile kıyas edildiğinde bir, üç ve altı ay boyunca Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen PÇ içermeyen numunelerin basınç dayanımındaki yüzdesel artış, PÇ ikameli harç numunelerin dayanımında meydana gelen yüzdesel artıştan daha büyük olmuştur.

Numuneler bir ay boyunca Na₂SO₄ çözeltisinde bekletildikten sonra PÇ içermeyen harç numuneleri arasında basınç dayanımında en yüksek artış % 13.9 ile 6C0 kodlu numuneden elde edilmiştir. %15 PÇ ikameli harç numuneleri için ise bu artış % 9.1 ile 6B15 kodlu harç numunesinden elde edilmiştir. Na₂SO₄ çözeltisinde üç ay bekletildikten sonra 6B0, 6C0 ve 6D0 kodlu numunelerin basınç dayanımları sırasıyla %29.9, 35.3 ve 28.2 artmıştır. 6B15, 6C15 ve 6D15 kodlu numuneler için kaydedilen bu artış oranları sırasıyla %26.4, 18.9 ve 17.4 olmuştur.

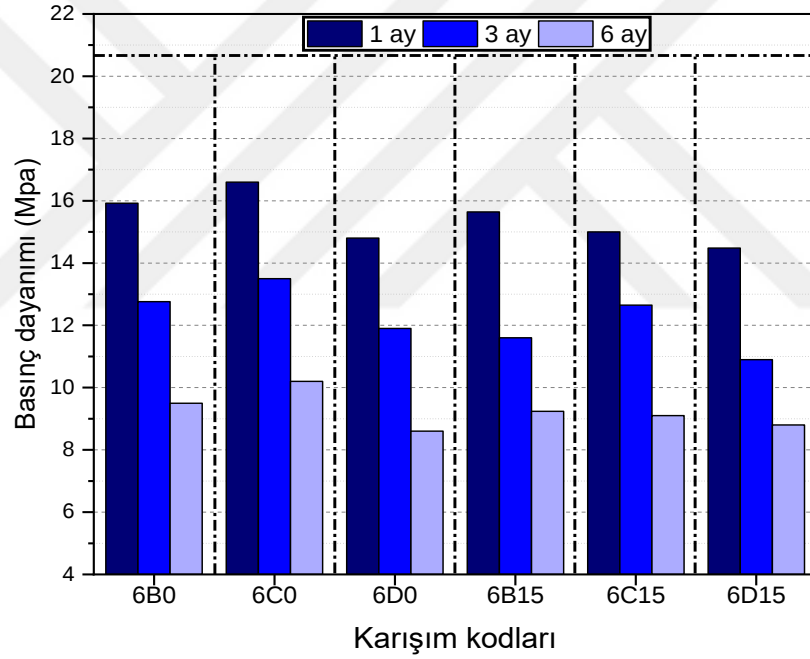


Şekil 5.39. Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımlarındaki değişim

Na₂SO₄ çözeltisinde altı ay bekletildikten sonra PÇ içermeyen numunelerin basınç dayanımında meydana gelen artış %35'in üzerinde iken PÇ içeren harç numunelerinde meydana gelen artış % 20-25 aralığında olmuştur. Harç numuneleri Na₂SO₄ çözeltisine maruz bırakılmadan önce en büyük basınç dayanımı 20.92 ile %15 PÇ ikameli 6C15 kodlu harç numunesinden elde edilmiştir. Altı ay

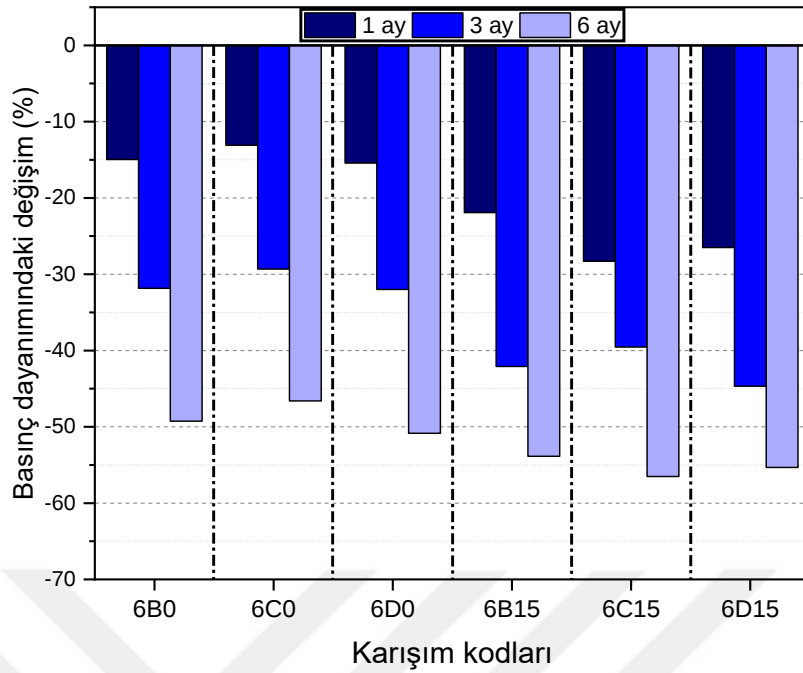
boyunca Na_2SO_4 çözeltisine maruz kaldıktan sonra en büyük basınç dayanımı 26.17 Mpa ile PÇ içermeyen 6C0 kodlu harç numunesinden elde edilmiştir. Kwang vd. [109] cüruf tabanlı alkali-aktif numuneyi altı ay boyunca %10 konsantrasyonlu Na_2SO_4 çözeltisine maruz bıraktığında basınç dayanımında %52.72 artış meydana geldiğini bildirmiştir. Beltrame vd. [179] tarafından yapılan çalışmada Na_2SO_4 çözeltisine maruz bırakıldıktan sonra basınç dayanımında meydana gelen artışın cüruf tabanlı alkali-aktif numunenin Na_2SO_4 'e maruz kaldığında genleşme ve bariz bozulma meydana gelmemesiyle desteklendiğini belirtmiştir. Bakharev vd. [104] basınç dayanımındaki bu artışı Na_2SO_4 çözeltisinde Na iyonları tarafından tutulan alkali-aktif cürufun devam eden hidratasyonuna bağlamıştır.

Harç numunelerinin %5 konsantrasyonlu MgSO_4 çözeltisinde bir, üç ve altı ay süreyle bekletildikten sonraki basınç dayanımları Şekil 5.40'ta verilmiştir.



Şekil 5.40. MgSO_4 çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımları

MgSO_4 çözeltisinde bekletilmeyen referans numunelere göre basınç dayanımında meydana gelen değişimler ise Şekil 5.41'de gösterilmektedir. Şekil 5.41'den görüleceği üzere PÇ ikamesine bakılmaksızın tüm numunelerin basınç dayanımı MgSO_4 çözeltisine maruz kaldıktan sonra azalmıştır. MgSO_4 çözeltisine maruz bırakılmayan referans numunelerin basınç dayanımı ile kıyas edildiğinde bir, üç ve altı ay boyunca MgSO_4 çözeltisinde bekletilen PÇ ikameli numunelerin basınç dayanımındaki yüzdesel azalma, PÇ içermeyen harç numunelerin dayanımında meydana gelen yüzdesel azalmadan daha büyük olmuştur.



Şekil 5.41. $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımlarındaki değişim

Birinci aydan itibaren numunelerin basınç dayanımında önemli düşüşler meydana gelmiştir. PÇ içermeyen harç numunelerinin basınç dayanımındaki azalma yaklaşık olarak %15 iken PÇ ikameli harç numunelerinin dayanımında meydana gelen azalma % 21.9-28.3 aralığında olmuştur. Üç ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisinde bekletildikten sonra 6B0, 6C0 ve 6D0 kodlu numunelerin basınç dayanımında meydana gelen azalma oranları sırasıyla % 31.8, 29.3 ve 32 olmuştur. Aynı süre boyunca $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen %15 PÇ ikameli 6B15, 6C15 ve 6D15 kodlu numunelerin basınç dayanımındaki azalma oranları sırasıyla %42.1, 39.5 ve 44.7 olmuştur.

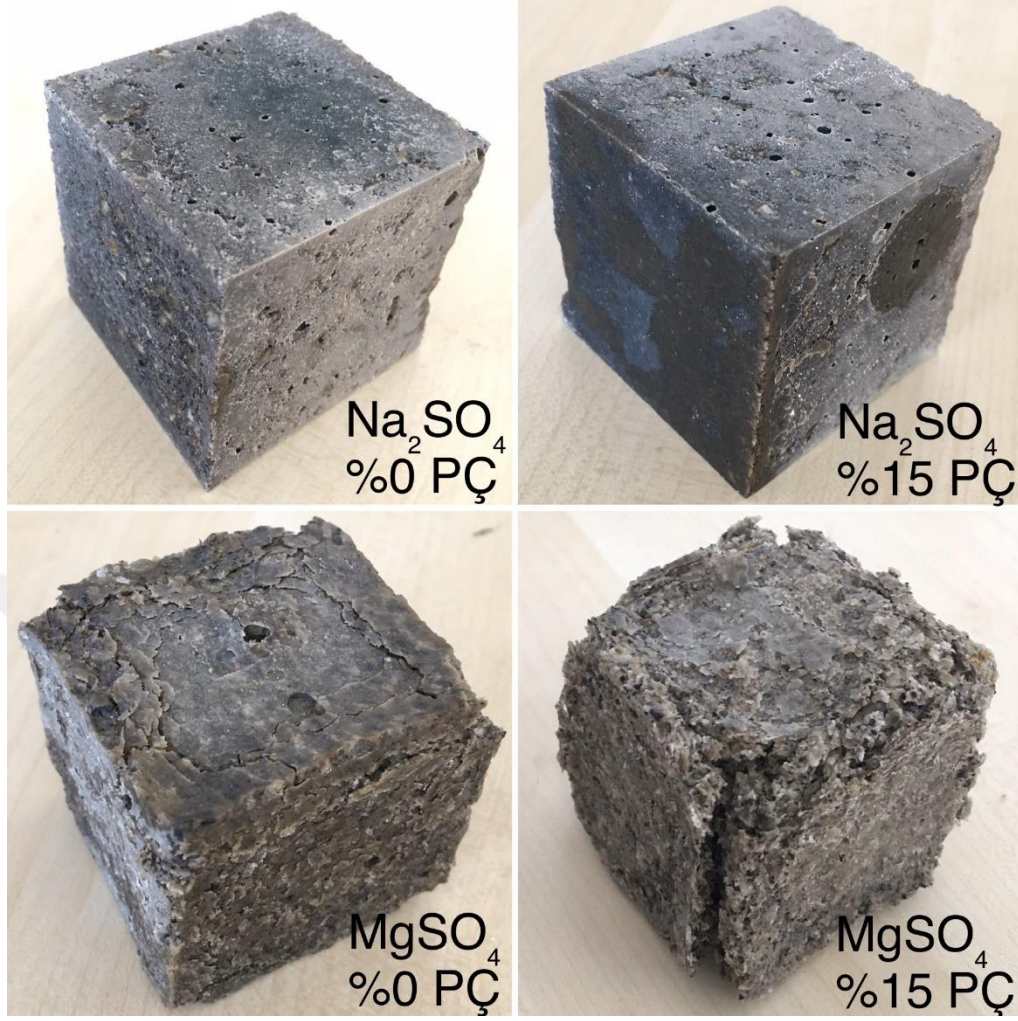
Bir çalışmada [109] AAC numunesi dört ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisinde bekletildikten sonra basınç dayanımında meydana gelen azalmanın yaklaşık olarak %30 olduğu bildirilmiştir. Beltrame vd. [179] ise AAC numunesini $MgSO_4$ çözeltisinde bekletmiş ve üç ayın sonunda basınç dayanımında meydana gelen azalmanın %65 olduğunu belirtmiştir. Altı ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisinde bekletildikten sonra PÇ içermeyen karışımlar arasında basınç dayanımında en yüksek düşüş % 50.9 ile 6D0 kodlu harç numunesinden elde edilmiştir. Aynı süre sonunda PÇ ikameli karışımlar için kaydedilen en büyük düşüş %56.5 ile 6C15 kodlu harç numunesinden elde edilmiştir.

Bir çalışmada [109] altı ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen numunelerin dayanımının %48.9 oranında azaldığı belirtilmiştir. PÇ ikameli ve PÇ içermeyen harç numunelerinin basınç dayanımındaki yüzdesel düşüşler arasındaki fark $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilme süresinin ilerlemesiyle azalmaktadır. $MgSO_4$ çözeltisinde bir ay bekletildikten sonra PÇ ikameli harç numunelerindeki ortalama yüzdesel düşüşün PÇ içermeyen harç numunelerindeki ortalama

yüzdesel azalmaya oranı 1.76'dır. Üç ve altı ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisinde bekletildikten sonra bu oranlar sırasıyla 1.36 ve 1.13'e düşmüştür.

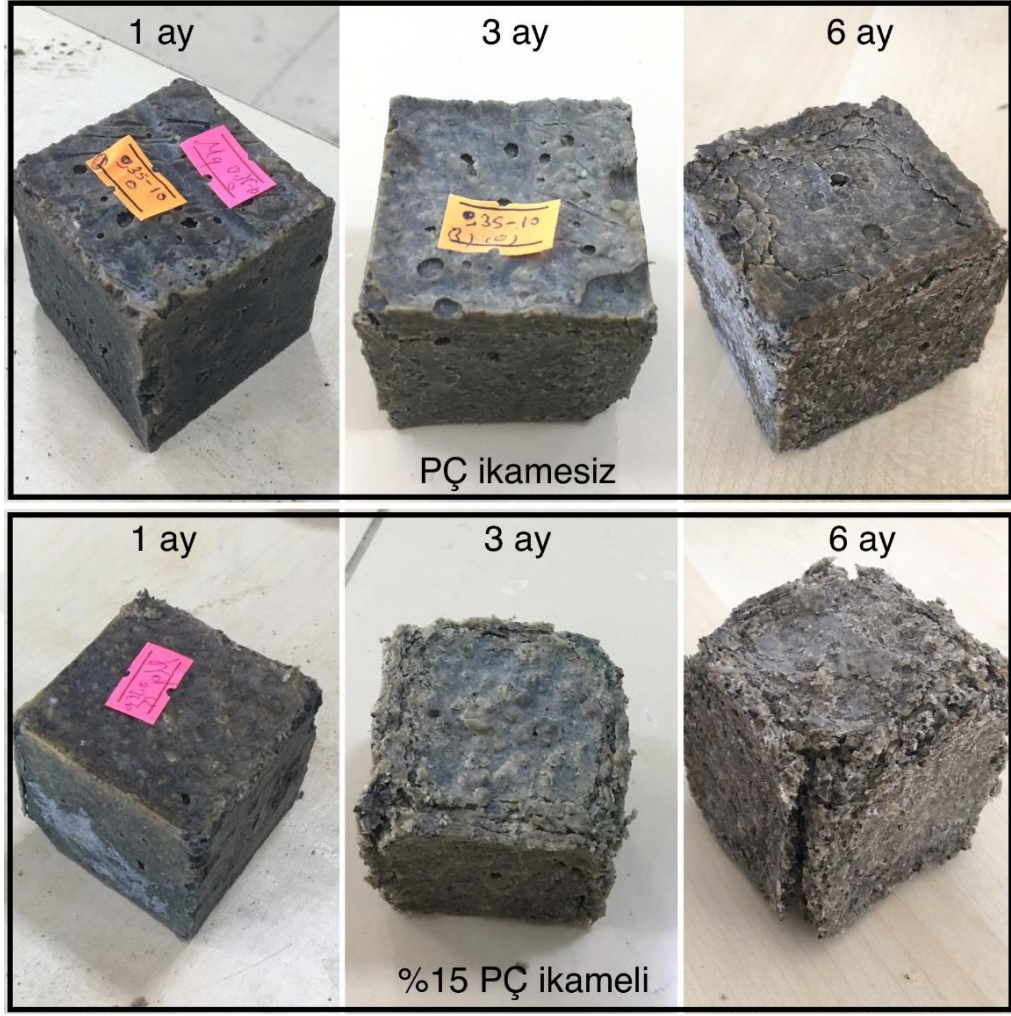
5.4.2. Görsel İnceleme

Şekil 5.42 PÇ içermeyen ve %15 PÇ içeren numunelerin altı ay boyunca %5 konsantrasyonlu Na_2SO_4 ve $MgSO_4$ çözeltisinde bekletildikten sonraki fiziksel görünümünü göstermektedir. İlk satırda soldan sağa PÇ ikamesiz ve %15 PÇ ikameli harç numunelerinin 6 ay boyunca Na_2SO_4 çözeltisine maruz bırakıldıktan sonraki fiziksel görünümü verilirken, ikinci satırda soldan sağa PÇ ikamesiz ve %15 PÇ ikameli karışım numunelerinin altı ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz bırakıldıktan sonraki fiziksel görünümü verilmektedir. Farklı araştırmacılar [104, 109, 179] tarafından yapılan çalışmalarla tutarlı olarak Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen harç numunelerinin dış görünümünde PÇ ikamesinden bağımsız olarak hiçbir belirgin değişiklik meydana gelmemiştir. İsmail vd. [111] Na_2SO_4 çözeltisindeki nispeten yüksek pH ve Na içeriğinin harçların homojenliği için gerekli olan gözenekli çözelti kimyasının korunmasına yardımcı olduğunu belirtmiştir. Farklı çalışmalarla [111, 179] tutarlı olarak harç numuneleri $MgSO_4$ çözeltisinde bekletildiğinde numunelerde ileri derecede fiziksel bozulma gözlenmiştir. %15 PÇ ikameli numunelerde meydana gelen fiziksel bozulma PÇ içermeyen emsallerinde meydana gelen bozulmadan daha belirgin olmuştur. Harç numunelerinin Na_2SO_4 ve $MgSO_4$ saldırısı karşısında gösterdiği dirençler tamamen farklı olmuştur. Bu nedenle alkali-aktif harç numunesi $MgSO_4$ 'e maruz kaldığında bozunmanın ana nedeninin yalnızca C-A-S-H fazında 'sülfat saldırısı' olmaktan ziyade sülfatta bulunan Mg^{+2} iyonu olduğunu göstermektedir [111]. $MgSO_4$ saldırısı, Na_2SO_4 saldırısının aksine YFC tabanlı alkali-aktif malzemelerde önemli hasara neden olmaktadır. $MgSO_4$ saldırısının bir sonucu olarak C-A-S-H jelinde yoğun dekalsifikasyon ve silikat polimerizasyonu meydana gelmektedir. Bu işlem sonucunda C-A-S-H'nin M-A-S-H ve/veya silika jellere dönüştürülmüş olabileceği öne sürülmektedir. $MgSO_4$ 'ün aksine Na_2SO_4 'e maruz kaldığında AAC'nin jel yapısı zararlı etrenjit ve alçıtaşının küçük miktarda çökmesi ile büyük ölçüde bozulmadan kalmaktadır [108]. Gong ve White [107] Na_2SO_4 ve $MgSO_4$ saldırısına gösterilen direnç arasındaki bu farkın sülfat tuzlarındaki katyon tiplerinin AAC kompozit gözenek çözeltisinin pH değerini değiştirme kabiliyetiyle ilişkili olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 5.42. Altı ay boyunca Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerinde bekletilen numunelerin fiziksel görünüşleri

Şekil 5.43 PÇ içermeyen numune ile %15 PÇ ikameli numunenin MgSO_4 çözeltisinde bekletildikten sonra fiziksel görünümünde meydana gelen değişiklikleri göstermektedir. İlk satırda soldan sağa PÇ içermeyen numunenin bir, üç ve altı ay boyunca MgSO_4 çözeltisinde bekletildikten sonraki görünüşleri verilirken, ikinci satırda soldan sağa %15 PÇ ikameli numunenin bir, üç ve altı ay boyunca MgSO_4 çözeltisinde bekletildikten sonraki görünüşleri verilmektedir. Bir ay boyunca MgSO_4 çözeltisinde bekletildiğinde numunelerin dış görünümünde önemli değişiklikler meydana gelmemiştir. Üç ay boyunca MgSO_4 çözeltisinde bekletildikten sonra sonra numunelerin dış görünümünde önemli bozulmalar meydana gelmeye başlamıştır.



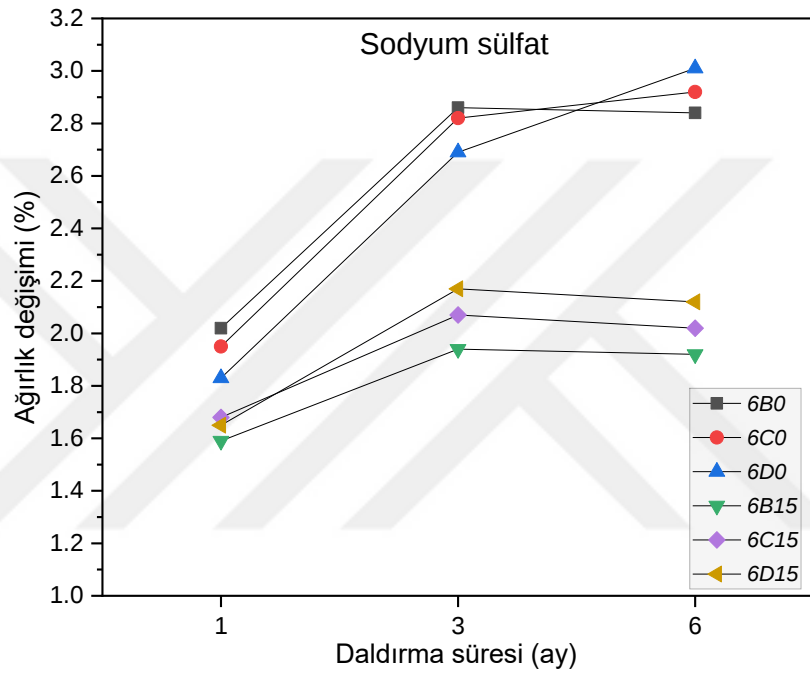
Şekil 5.43. Bir, üç ve altı ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen PÇ içermeyen ve %15 PÇ ikameli numunelerin fiziksel görünüşleri

Şekilden de görüleceği üzere PÇ içeren harç numunesinde meydana gelen bozulma net bir şekilde daha belirgindir. Altı ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisinde bekletildikten sonra genişleme ve çatlama seviyesi iyice artmaya devam etmiştir. Altı ayın sonunda PÇ içeren numuneler PÇ içermeyen numunelere kıyasla $MgSO_4$ saldırısından çok daha olumsuz etkilenmiştir. Altı aylık $MgSO_4$ 'te bekletilme süresinden sonra PÇ ikamesiz numunelerde gözlemlenen bozulma, üç aylık bekletilme süresinin sonunda PÇ ikameli numunelerde gözlemlenen bozulmaya yakın olmuştur. PÇ'nin yüksek C_3A içeriği nedeniyle %15 PÇ ikameli karışımlar $MgSO_4$ saldırısından PÇ içermeyen karışımlara göre daha fazla etkilenmiştir [22].

5.4.3. Ağırlık Değişimi

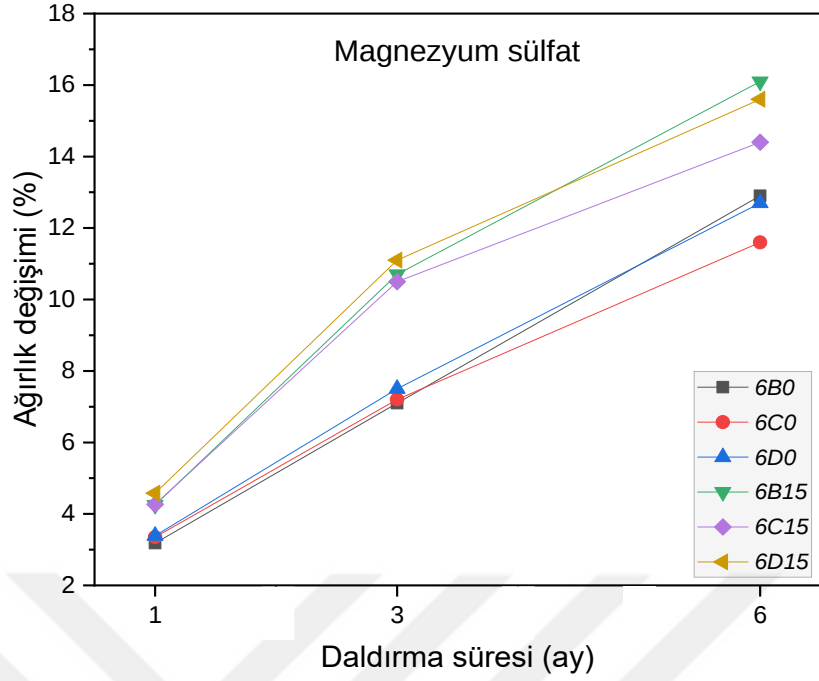
Şekil 5.44, %5 konsantrasyonlu Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen numunelerin ağırlığında meydana gelen değişimleri göstermektedir. Sülfat çözeltisinin tipi harç numunelerinin ağırlığında meydana gelen değişimlerde oldukça önemlidir. Numuneler altı ay boyunca Na_2SO_4 çözeltisinde

bekletildikten sonra PÇ içermeyen harçların ağırlığında meydana gelen değişimler % 15 PÇ içeren numunelerin ağırlığında meydana gelen değişimlerden daha yüksek olmuştur. Altı ay boyunca Na_2SO_4 çözeltisinde bekletildiğinde 6B0, 6C0 ve 6D0 kodlu numunelerin ağırlığında meydana gelen değişimler sırasıyla %2.84, 2.92 ve 3.01 olmuştur. Aynı süre boyunca %15 PÇ ikameli 6B15, 6C15 ve 6D15 kodlu numunelerin ağırlık değişimleri %1.92, 2.02 ve 2.12'dir. Altı ay boyunca Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen numunelerin ağırlıklarının üç ay süreyle Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen numunelerin ağırlıklarına kıyasla önemli oranda değişmediği görülmüştür.



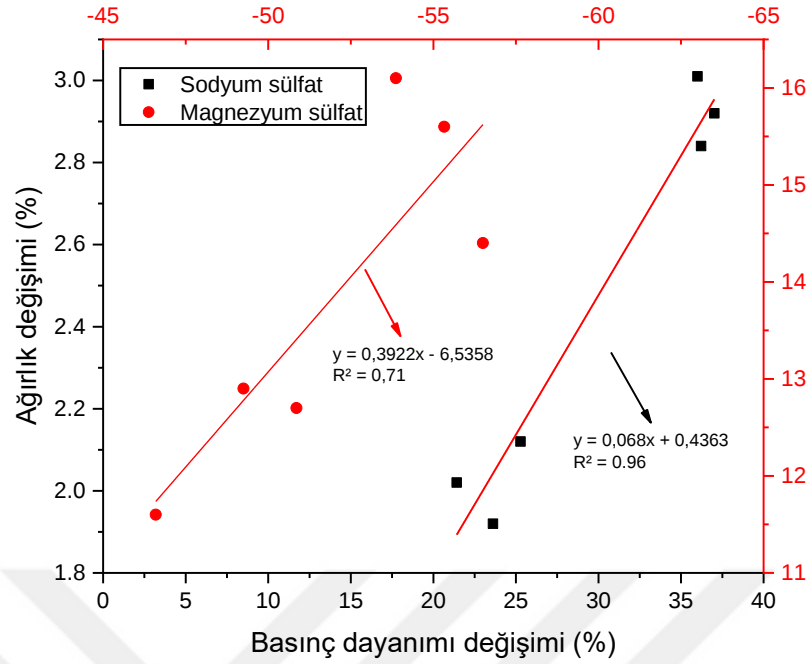
Şekil 5.44. Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen numunelerin ağırlığında meydana gelen değişim

Şekil 5.45, %5 MgSO_4 çözeltisinde bekletilen numunelerin ağırlığında meydana gelen değişimleri göstermektedir. Altı ay boyunca MgSO_4 çözeltisinde bekletilen PÇ ikameli numunelerin ağırlığında meydana gelen artış PÇ içermeyen numunelerin ağırlığında meydana gelen artıştan daha yüksek olmuştur. %15 PÇ ikameli numunelerin ağırlığında meydana gelen daha yüksek artış oranı numunelerin fiziksel görünümünde meydana gelen değişimle örtüşmektedir. Şekil 5.45'te gösterildiği üzere 6 ay boyunca MgSO_4 çözeltisinde bekletilen PÇ ikameli numunelerde meydana gelen bozulma ve genleşme PÇ içermeyen harç numunelerine kıyasla çok daha ileri seviyede olmuştur. Harç numunelerinin MgSO_4 çözeltisinde bekletildiği süre boyuca ağırlığında önemli artışlar meydana gelmiştir.



Şekil 5.45. $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen numunelerin ağırlığında meydana gelen değişim

Üç ayın sonunda 6B0, 6C0 ve 6D0 kodlu harç numunelerinin ağırlığında meydana gelen artış sırasıyla %7.1, 7.2 ve 7.5 olmuştur. Aynı maruz kalma süresi için %15 PÇ ikameli 6B15, 6C15 ve 6D15 kodlu harç numunelerinin ağırlık artışları ise sırasıyla %10.7, 10.5 ve 11.1 olarak ölçülmüştür. Beltrame vd. [179] yaptıkları çalışmada AAC numunelerini $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 çözeltisinde bekletmiş ve $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen numunelerde önemli ağırlık artışı meydana geldiğini belirtmiştir. Harç numuneleri altı ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisinde bekletildikten sonra 6B0, 6C0, 6D0, 6B15, 6C15 ve 6D15 numunelerinde kaydedilen ağırlık artışları sırasıyla % 12.9, 11.6, 12.7, 16.1, 14.4 ve 15.6 olmuştur. Harç numunelerinde kaydedilen en yüksek ağırlık artışı basınç dayanımının %56.5 ile en çok düştüğü 6C15 kodlu numunede meydana gelmiştir. %5 konsantasyonlu $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımında meydana gelen değişim ile ağırlığında meydana gelen değişim arasındaki korelasyon Şekil 5.46'da gösterilmektedir.

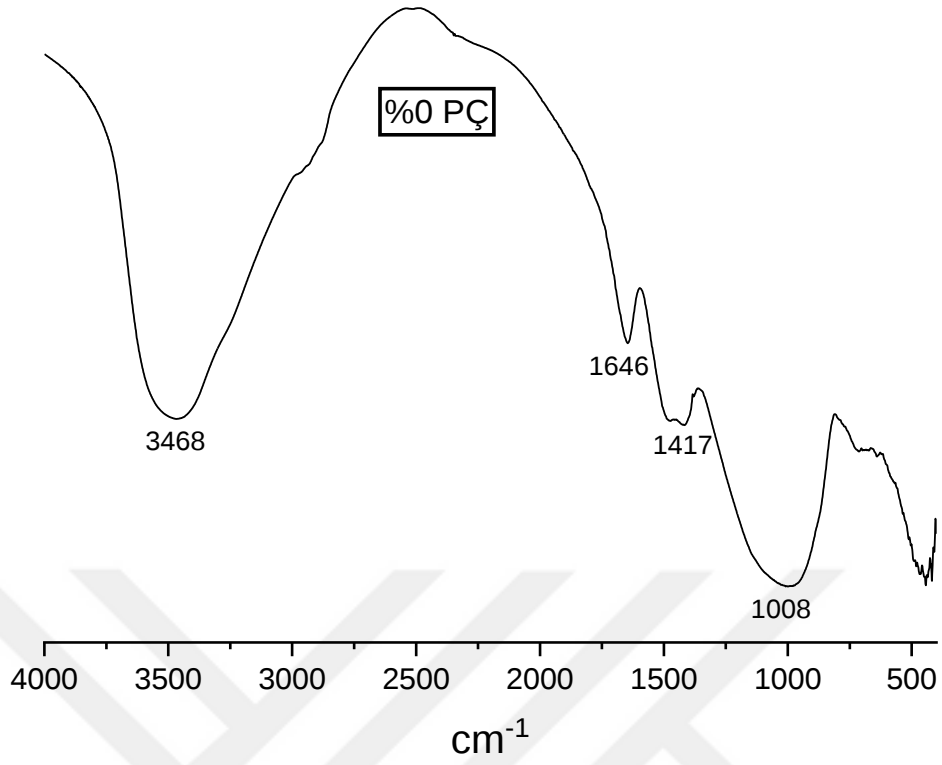


Şekil 5.46. $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 çözeltilerinde bekletilen numunelerin ağırlık ve basınç değişimleri arasındaki korelasyon

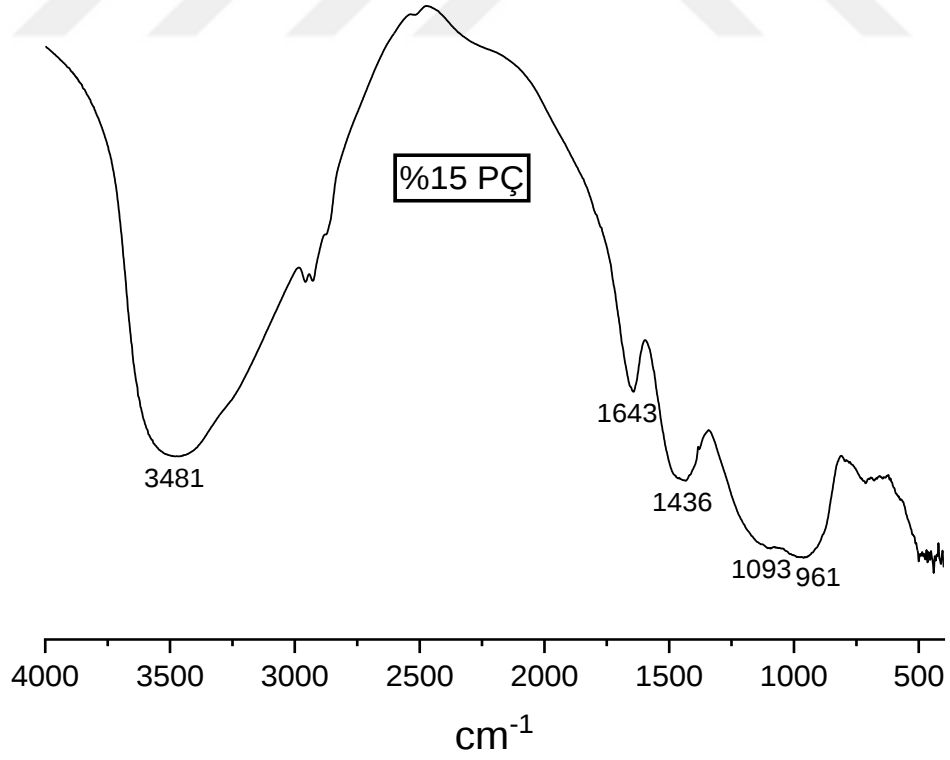
$MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımı değişimi ile ağırlık değişimi arasındaki R^2 katasıyısı 0.71 iken Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen numuneler arasındaki R^2 katsayısı 0.96 olarak hesaplanmıştır.

5.4.4. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Analizi Sonuçları

Na_2SO_4 ve $MgSO_4$ çözeltilerinin iç yapı üzerindeki etkisini incelemek için FTIR analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda PÇ içermeyen 6C0 kodlu harç numunesi ile %15 PÇ ikameli 6C15 kodlu harç numunesi Na_2SO_4 ve $MgSO_4$ çözeltilerine maruz bırakıldıktan sonra FTIR analizi yapılmıştır. Sülfat çözeltisine maruz bırakılmamış PÇ ikamesi içermeyen numunenin FTIR spektrumu Şekil 5.47’de gösterilmiştir. Sülfat çözeltisine maruz bırakılmamış %15 PÇ ikameli numunenin FTIR spektrumu ise Şekil 5.48’de gösterilmiştir.



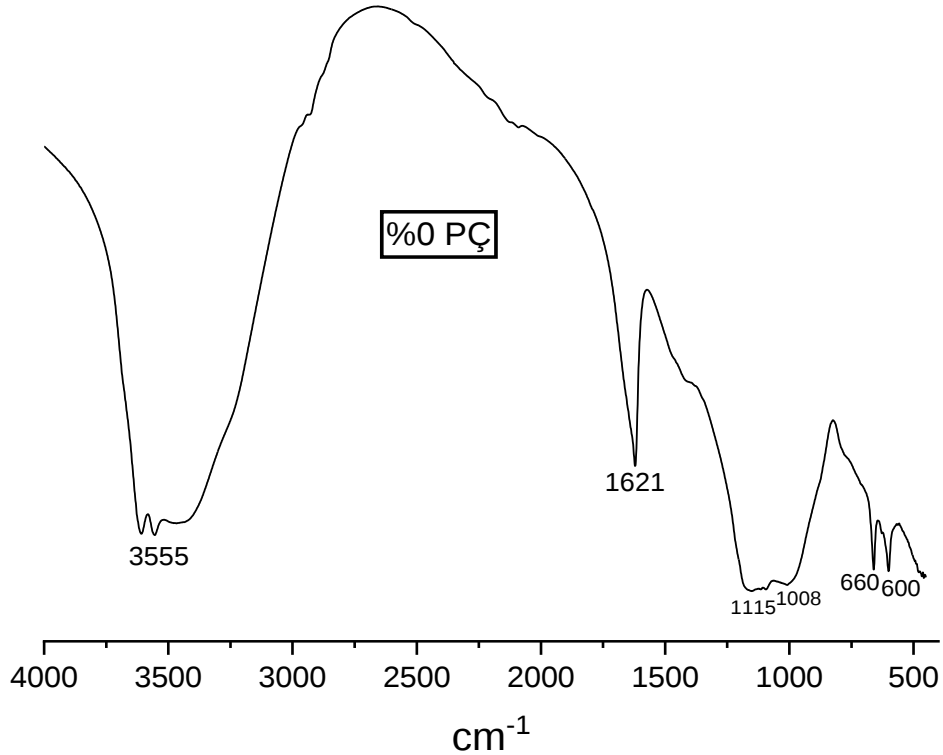
Şekil 5.47. Sülfat çözeltisine maruz bırakılmamış PÇ içermeyen numunenin FTIR spektrumu



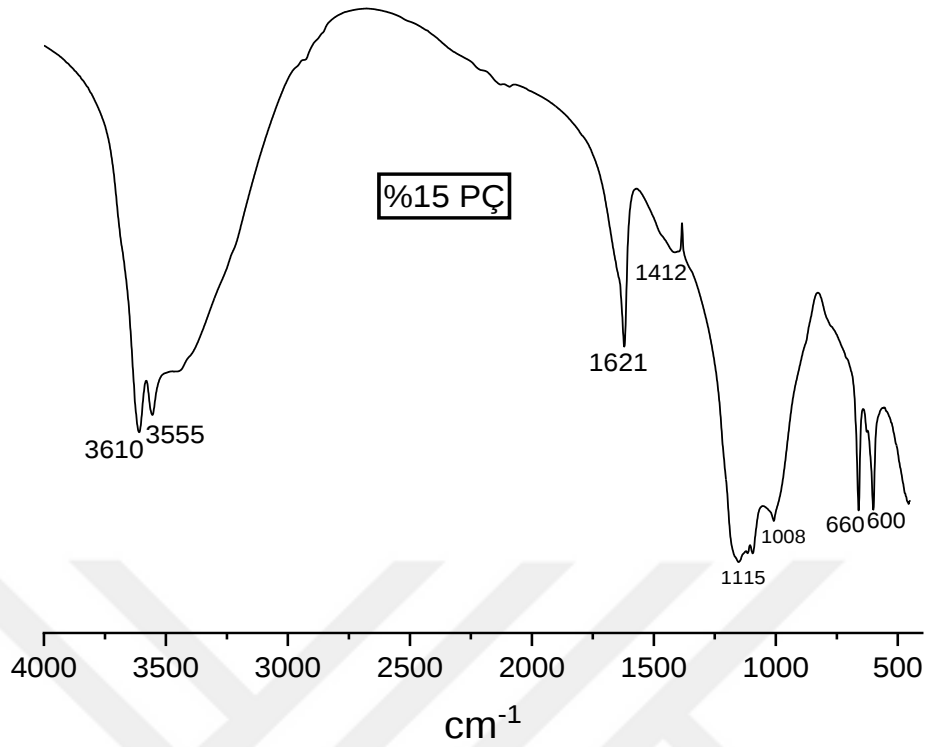
Şekil 5.48. Sülfat çözeltisine maruz bırakılmamış %15 PÇ ikameli numunenin FTIR spektrumu

Spektrumlarda $3400-3500\text{ cm}^{-1}$ arasında yüksek yoğunluklu geniş bir bant H-O-H gruplarının germe titreşim modlarına tanımlanmaktadır. Yaklaşık olarak 1645 cm^{-1} 'de gözlenen küçük titreşim bandı H-O-H bağlarının bükülme titreşim modlarına karşılık gelmektedir [171]. Zhang vd. [97] $1417-1471\text{ cm}^{-1}$ 'de gözlenen titreşimlerin C-O bağı ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. Bu, PÇ'ye CaCO_3 eklenmesi nedeniyle PÇ harman fraksiyonundaki CO^{2-} 'ye atfedilebilen CaCO_3 karakteristiğine karşılık gelir. Bu bağı (1417 cm^{-1}) PÇ içermeyen karışımda gözlemlenmesi atmosferik karbonatlaşma ile ilişkilidir [174]. Oluşan C-S-H veya C-A-S-H jelinde Si-O bağının en güçlü (daha uzun zincirler) titreşimine karşılık gelen bant spektrumda gözlemlenebilir. Bu alkali-aktif çimentoların karakteristiğidir ve 960 ile 980 cm^{-1} arasındaki dalga sayılarında meydana gelir, ancak kullanılan alüminosilikat esaslı malzemeye bağlı olarak daha yüksek dalga sayılarında (1050 cm^{-1}) bulunabilir [19]. $950-1200\text{ cm}^{-1}$ arasındaki bantın Si-O-Si veya Si-O-Al bağının asimetric germe titreşim modu ile ilişkili olduğu ifade edilmiştir. 600 ile 750 cm^{-1} arasındaki küçük bantlar SiO_4 ve MgO_4 gruplarının hem simetrik esneme hem de bükme modları ile ilişkilidir [113, 171–173].

Şekil 5.49 PÇ içermeyen numunenin altı ay boyunca MgSO_4 çözeltisinde bekletildikten sonraki FTIR spektrumunu göstermektedir. Şekil 5.50 ise %15 PÇ ikameli numunenin altı ay boyunca MgSO_4 çözeltisinde bekletildikten sonraki FTIR spektrumunu göstermektedir.



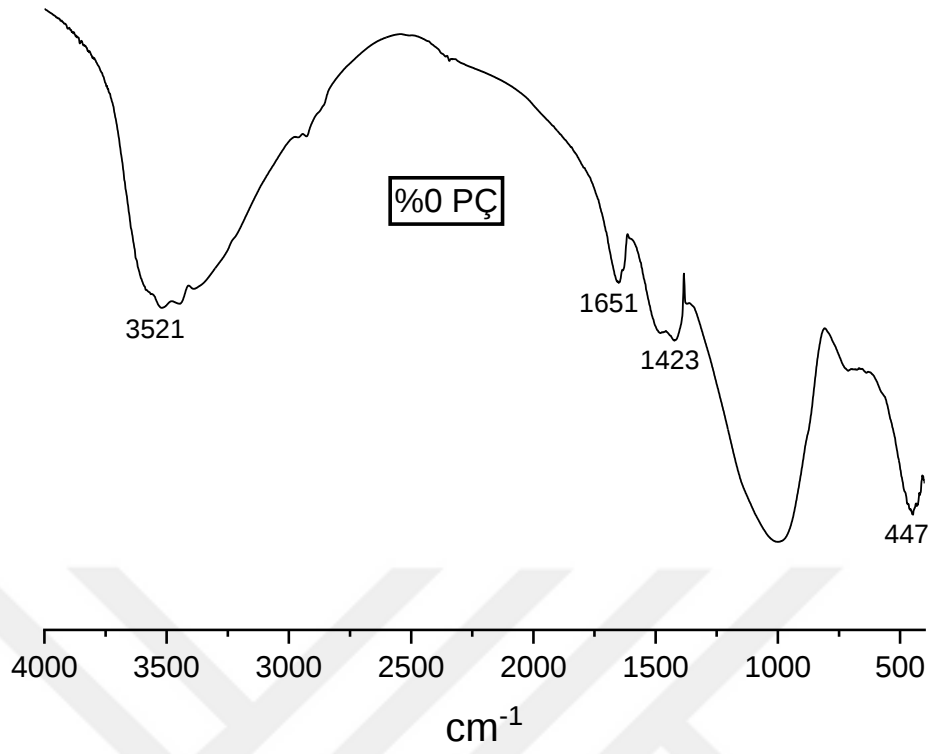
Şekil 5.49. MgSO_4 çözeltisinde bekletilen PÇ içermeyen numunenin FTIR spektrumu



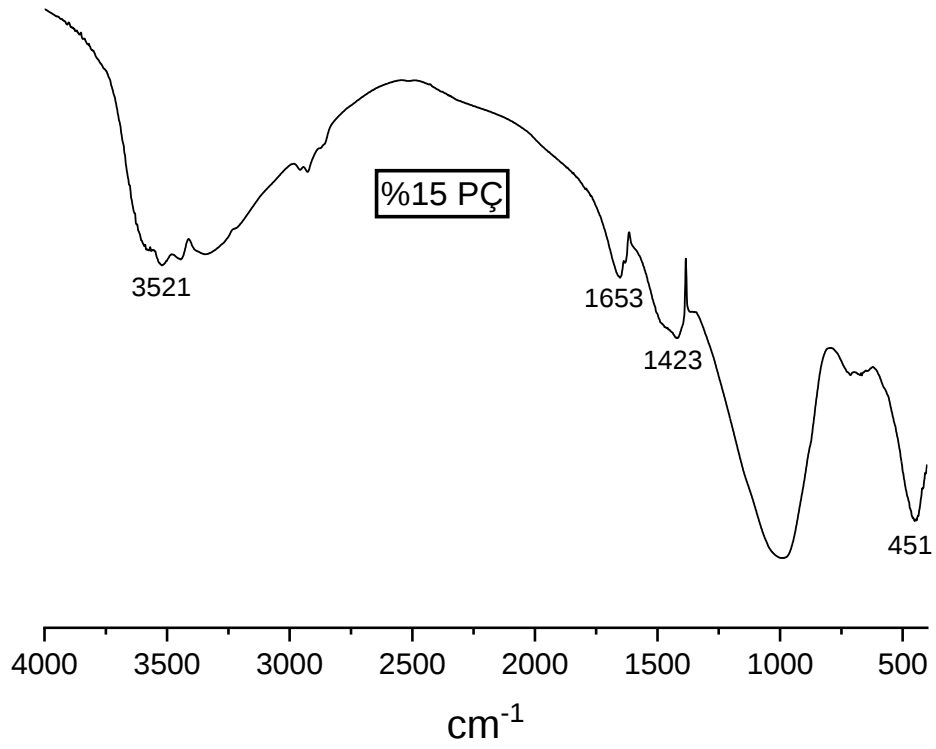
Şekil 5.50. MgSO₄ çözeltisinde bekletilen %15 PÇ ikameli numunenin FTIR spektrumu

MgSO₄ çözeltisine maruz kalmamış harç numunelerinin spektrumları ile karşılaştırıldığında spektrumlar arasında farklılıklar görülmektedir. Si-O-T bandının kaybolması ve 1115 cm⁻¹'de yeni bandın oluşması C-A-S-H jelinin ayrıştığını göstermektedir. Bu aynı zamanda alçıtaşının varlığına da işaret etmektedir. 600 ve 660 cm⁻¹'de gözlemlenen tepe noktaları da alçı taşının oluştuğunu göstermektedir. 1436 cm⁻¹'deki O-C-O bağlarının yoğunluğu oluşan ürünlerin ayrışması nedeniyle MgSO₄ saldırısından sonra tükenme eğilimi göstermiştir.

Şekil 5.51 PÇ içermeyen numunelerin altı ay boyunca Na₂SO₄ çözeltisinde bekletildikten sonraki FTIR spektrumunu göstermektedir. Şekil 5.52 ise %15 PÇ ikameli numunelerin altı ay boyunca Na₂SO₄ çözeltisinde bekletildikten sonraki FTIR spektrumunu göstermektedir.



Şekil 5.51. Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen PÇ içermeyen numunenin FTIR spektrumu



Şekil 5.52. Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen %15 PÇ ikameli numunenin FTIR spektrumu

Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilmiş PÇ içermeyen harç numunelerinin spektrumu ile Na_2SO_4 'a maruz kalmamış harç numunelerinin spektrumu arasında belirgin bir fark meydana gelmemiştir. 3470-3520 cm^{-1} arasındaki su ve 1645-1650 cm^{-1} 'deki kimyasal olarak bağlanmış H–O–H bandı, PÇ içermeyen harç numuneleri Na_2SO_4 çözeltisinde bekletildiğinde de değişmemiştir. Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen harç numunelerinde yaklaşık 1425 cm^{-1} CO_3 bağları mevcuttur.



6. SONUÇLAR

Bu çalışmada hafif agrega kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen alkali-aktif YFC/PÇ harcının mekanik ve durabilite özellikleri araştırılmıştır. Öncelikle hamur numuneleri üzerinde deneyler yapılmış, optimum sonuçları veren parametreler tespit edilmiştir. Daha sonra harç numuneleri üretilmiş, alkali-aktif YFC/PÇ harçlarının yüksek sıcaklık ve sülfat saldırısına karşı gösterdiği direnç araştırılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Hamur numuneleri üzerinde yapılan deneyler neticesinde en yüksek basınç dayanımı SS/SH oranı 3 olduğunda elde edilmiştir.
- Üç farklı SS/SH oranında da (2, 2.5 ve 3) en yüksek basınç dayanımları %15 PÇ ikamesinde elde edilmiştir.
- Üç farklı SS/SH oranında PÇ ikame oranı %20 ve üzerinde olduğunda numunelerde çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlakların oluşumu %20 ve üzeri PÇ ikame oranlarında numunelerin basınç dayanımında meydana gelen düşüşü anlamlandırmaktadır.
- 28 günün sonunda en yüksek basınç dayanımı başlangıç kür sıcaklığı 50 °C olduğunda elde edilmiştir.
- PÇ ikamesi içermeyen numunelerde 25, 50 ve 75 °C kür sıcaklıklarından sonra ölçülen basınç dayanımları sırasıyla 102.67, 109.3 ve 100.7 MPa olmuştur. %15 PÇ ikamesinde ölçülen basınç dayanımları sırasıyla 126.4, 147.5 ve 121.35 MPa'dır.
- Genel olarak en düşük basınç dayanımları numuneler 100 °C sıcaklıkta kür edildiğinde elde edilmiştir.
- İnşaat sezonunun en aktif olduğu yaz/bahar aylarında ortalama sıcaklık değerinin (İstanbul ili için) 25.1 °C olduğu göz önünde bulundurularak enerji gerektirecek bir kür sıcaklığına ihtiyaç duyulmaması açısından 25 °C kür sıcaklığının YFC tabanlı alkali-aktif bağlayıcılar için kullanılabileceği görülmüştür.
- PÇ ikamesiyle birlikte priz başlangıç ve bitiş sürelerinin hızla düştüğü görülmüştür.
- PA'nın oranı arttıkça karışım ağırlığında meydana gelen azalmaya bağlı olarak yayılma çapı azalmıştır.
- %60 oranında PA kullanılan karışımların yayılma çapları 210 mm ile 265 mm arasındayken %70 oranında PA kullanılan karışımların yayılma çapları 190 mm ile 245 mm aralığında olmuştur.
- %80 oranında PA kullanılarak üretilen karışımların akışkanlığı arzu edilen nitelikten oldukça uzakta olmuştur.
- PA'nın toplam agregaya hacimce oranı arttıkça basınç dayanımında önemli düşüşler meydana gelmiştir.

- %60 PA içeriğinde en yüksek basınç dayanımı 22.14 MPa ile A15 kodlu harç numunelerinden elde edilmiştir. A15 kodlu karışımın PA oranı sırasıyla %70 ve %80'e çıkarıldığında basınç dayanımlarında meydana gelen azalmalar sırasıyla %14.6 ve %40.4 olmuştur.
- PA'nın normal agregası ile yer değiştirilmesi sonucu harç numunelerinin yoğunluğu önemli ölçüde düşmüştür. PA'nın toplam agreganın hacimce %60, 70 ve 80 olarak kullanıldığı harç numunelerinde en düşük yoğunluk değerleri sırasıyla 1.827, 1.752 ve 1.678 gr/cm³ olmuştur.
- %60, 70 ve 80 PA içeriğinde en yüksek su emme değerleri ise sırasıyla %18.57, 20.52 ve 22.46 olmuştur.
- Alkali aktivatör/bağlayıcı oranının, su içeriğinin ve PÇ ikame oranlarının yoğunluk üzerindeki etkisi düşük olmuştur.
- Harç numunelerin basınç dayanımları yüksek sıcaklığa maruz kalmasıyla beraber azalmaya başlamıştır.
- PÇ içermeyen harç numunelerinin bir önceki yüksek sıcaklık değerine kıyasla basınç dayanımındaki yüzdesel olarak en büyük düşüş 600 °C sıcaklığa maruz bırakıldığında gerçekleşmiştir. %15 PÇ ikameli numuneler içinse bu sıcaklık değeri 800 °C olmuştur. Bu sonucun SEM görüntüleri ile tutarlı olduğu görülmektedir. PÇ içermeyen numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde 600 °C'de boşlukların belirginleşmeye başladığı görülmektedir. %15 PÇ ikameli numuneler için ise çatlakların iyice belirginleşmeye başladığı sıcaklık değeri 800 °C olmuştur.
- 1000 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonraki basınç dayanımının 800 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonraki basınç dayanımından yüksek olduğu görülmüştür.
- PÇ ikamesi içermeyen numunelerin yüksek sıcaklık direnci PÇ içeren emsallerine kıyasla daha iyi olmuştur. Daha düşük başlangıç mukavemetine sahip olmasına rağmen 1000 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra, PÇ ikamesi içermeyen numunelerin basınç dayanımları, %15 PÇ içeren numunelerden daha yüksek olmuştur.
- PÇ ikamesine bakılmaksızın harç numunelerinin UPV değerleri 400 °C sıcaklıktan sonra sonra önemli oranda düşmüştür.
- 800 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra PÇ içermeyen harç numunelerinin UPV değerleri 600°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra ölçülen UPV değerlerine kıyasla %13.1-%15.9 aralığında artmıştır.
- PÇ ikamesi içeren numunelerde yüksek kuruma büzülmesi nedeniyle mikro çatlakların seviyesi artmıştır.

- Hafif agrega kullanılarak üretilen harçların/betonların yüksek sıcaklık direncinin hafif agregaların buharlaşabilir su rezervuarı işlevi görmesinden mütevellit daha düşük olacağı bilinmektedir. Bu olguya rağmen hem PÇ ikameli hem de PÇ ikamesiz harç numunelerinde 1000 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra bile dökülme vs. meydana gelmemiştir.
- Harç numuneleri altı ay boyunca %5 konsantrasyonlu Na₂SO₄ çözeltisinde bekletildiğinde fiziksel görünümünde belirgin bir değişiklik meydana gelmemiştir. Bu durumun aksine harç numuneleri aynı konsantrasyona sahip MgSO₄ çözeltisine maruz bırakıldığında numunelerin fiziksel görünümünde ileri derecede bozulmalar meydana gelmiştir.
- %15 oranında PÇ içeren numuneler MgSO₄ çözeltisine maruz bırakıldığına meydana gelen fiziksel bozulma PÇ içermeyen emsallerinde meydana gelen bozulmadan daha belirgin olmuştur.
- Harç numuneleri MgSO₄ çözeltisinde altı ay boyunca bekletildikten sonra numunelerin ağırlıkları önemli ölçüde artmıştır. PÇ ikameli harç numunelerinde meydana gelen ağırlık artışı PÇ ikamesi içermeyen emsallerine kıyasla daha yüksek olmuştur.
- Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin ağırlığında meydana gelen değişim MgSO₄ çözeltisinden bekletilen numunelerin ağırlığında meydana gelen değişimden çok daha düşük olmuştur.
- PÇ içermeyen numuneler altı ay boyunca MgSO₄ çözeltisinde bekletildiğinde numunelerde meydana gelen ağırlık artışı %11.6 – 12.9 aralığındayken PÇ ikameli numunelerin ağırlık artışı %14.4-16.6 aralığında olmuştur. Aynı süre için Na₂SO₄ çözeltisinde bekletildiğinde PÇ içermeyen numunelerin ağırlık artışı %2.84-3.01 aralığındayken %15 PÇ ikameli numunelerin ağırlık artışı % 1.92-2.02 aralığında olmuştur.
- Sülata eşlik eden katyon, numunelerin basınç dayanımında büyük farklılıklar meydana gelmesine neden olmuştur. Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımında önemli bir artış olurken, MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin dayanımı önemli oranda düşmüştür.
- Harç numuneleri altı ay boyunca Na₂SO₄ çözeltisine maruz bırakıldığında, PÇ içermeyen numunelerin basınç dayanımındaki en yüksek artış %37 olmuştur. %15 PÇ ikameli numuneler arasında basınç dayanımındaki en yüksek artış %25.3 olmuştur. Numuneler altı ay boyunca MgSO₄ çözeltisinde bekletildiğinde, PÇ ikamesiz numunelerin basınç dayanımı %46.6-%50.9 aralığında, PÇ ikameli numunelerin basınç dayanımı ise %53.9-%56.5 aralığında azalmıştır.
- PÇ ikamesi ile alkali-aktif YFC/PÇ numunelerinin hem Na₂SO₄'e hem de MgSO₄e karşı direnci azalmıştır.
- FTIR analizleri numuneler altı ay süreyle Na₂SO₄ çözeltisine maruz bırakıldıktan sonra spektrumda belirgin bir değişikliğin meydana gelmediğini göstermiştir. MgSO₄ çözeltisine

maruz bırakıldıktan sonra Si-O-T bandının kaybolması ve 1115 cm^{-1} de yeni bir bandın oluşması C-(A)-S-H jelinin ayrıştığını göstermektedir.



7. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİ

Karbondiyoksit emisyonunu azaltma ve alternatif, sürdürülebilir bir malzeme üretme motivasyonu sonucu ön plana çıkmaya başlayan AAM'lerin yüksek bir kür sıcaklığında (50 °C ve üzeri) kür edilmeden üretilmesi enerji tasarrufu açısından önemli bir husustur. Bu çalışmada YFC tabanlı alkali-aktif bağlayıcının 25 °C sıcaklıkta sertleşip, dayanım kazandığı görülmüştür. YFC tabanlı alkali-aktif numunelerin yüksek sıcaklığa ve sülfat saldırısına karşı PÇ ikameli emsallerine kıyasla daha dirençli olması AAM'lerin mekanik özelliklerinin yanı sıra durabilite özellikleri ile de geleneksel çimento ile rekabet edebileceğini göstermiştir. Bunun yanı sıra AAM kullanılarak hafif ağırlıklı ve kendiliğinden yerleşen kompozit üretmenin mümkün olduğu görülmüştür. YFC tabanlı alkali-aktif bağlayıcının hızlı priz alması sertleşmenin çabuk istendiği uygulamalarda (tamir harcı vs.) değerli olabilir. Hızlı priz alması düşük kür sıcaklıklarında (<5 °C) üretilmesi durumunda priz süresinin ideal seviyelerde olacağını düşündürmektedir. YFC tabanlı alkali-aktif bağlayıcıların 25°C'nin altındaki sıcaklık değerlerinde üretiminin incelenmesi sonraki araştırmalar için ümit vadeden bir araştırma konusu olarak değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra farklı durabilite deneylerinin gerçekleştirilmesi bu tür malzemelerin kullanımı noktasındaki endişelerin giderilmesine katkıda bulunacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] The World Bank, <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>, Erişim: 17-8-2021
- [2] Kastiukas, G. (2017). *Alkali Activated Binders Valorised From Tungsten Mining Waste: Materials Design, Preparation, Properties and Applications*, Brunel University, College of Engineering, Design and Physical Science
- [3] Lehne, J.; Preston, F. (2018). *Making Concrete Change; Innovation in Low-carbon Cement and Concrete*, Chatham House Report
- [4] Olivier, J. G. J.; Janssens-Maenhout, G.; Muntean, M.; Peters, J. (2016). Trends in Global CO₂ Emissions: 2016 Report;PBL Netherlands Environmental Assessment Agency: *The Hague, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency & European Commission's Joint Research Centre (JRC)*
- [5] Provis, J. L.; Palomo, A.; Shi, C. (2015). Advances in understanding alkali-activated materials, *Cement and Concrete Research*, 110–125. doi:10.1016/j.cemconres.2015.04.013
- [6] Juenger, M. C. G.; Winnefeld, F.; Provis, J. L.; Ideker, J. H. (2011). Advances in alternative cementitious binders, *Cement and Concrete Research*. doi:10.1016/j.cemconres.2010.11.012
- [7] World Health Organization, (2018). COP24 special report: health and climate change
- [8] Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials, *Cement and Concrete Research*. doi:10.1016/j.cemconres.2017.02.009
- [9] Duxson, P.; Provis, J. L.; Lukey, G. C.; van Deventer, J. S. J. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete', *Cement and Concrete Research*. doi:10.1016/j.cemconres.2007.08.018
- [10] Alharbi, N.; Varela, B.; Hailstone, R. (2020). Alkali-activated slag characterization by scanning electron microscopy, X-ray microanalysis and nuclear magnetic resonance spectroscopy, *Materials Characterization*, Vol. 168, No. May, 110504. doi:10.1016/j.matchar.2020.110504
- [11] Aydin, S. (2010). *Alkalilerle Aktive Edilmiř Yůksek Fırın Cůrufu Baėlayıcılı Lifli Kompozit Geliřtirilmesi*, Dokuz Eylůl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [12] McLellan, B. C.; Williams, R. P.; Lay, J.; Van Riessen, A.; Corder, G. D. (2011). Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement, *Journal of Cleaner Production*. doi:10.1016/j.jclepro.2011.02.010
- [13] Provis, J. L.; Bernal, S. A. (2014). Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials, *Annual Review of Materials Research*, Vol. 44, No. 1, 299–327. doi:10.1146/annurev-matsci-070813-113515
- [14] Aydin, S.; Baradan, B. (2014). Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 57, 166–172. doi:10.1016/j.compositesb.2013.10.001
- [15] TOBB. (2020). Türkiye Demir Ve Demir Dışı Metaller Meclisi Raporu
- [16] Palomo, A.; Krivenko, P.; Garcia-Lodeiro, I.; Kavalerova, E.; Maltseva, O.; Fernández-Jiménez, A. (2014). A review on alkaline activation: new analytical perspectives, *Materiales de Construcción*, Vol. 64, No. 315, e022. doi:10.3989/mc.2014.00314
- [17] Çevre şhircilik Bakanlığı, <https://yfk.csb.gov.tr/birim-fiyatlar-i-100468>, Erişim: 17-8-2021.

- [18] Palomo, Á.; Maltseva, O.; García-Lodeiro, I.; Fernández-Jiménez, A. (2013). Hybrid alkaline cements. Part II: The clinker factor, *Revista Romana de Materiale/ Romanian Journal of Materials*, Vol. 43, No. 1, 74–80
- [19] Angulo-Ramírez, D. E.; Mejía de Gutiérrez, R.; Puertas, F. (2017). Alkali-activated Portland blast-furnace slag cement: Mechanical properties and hydration, *Construction and Building Materials*, Vol. 140, 119–128. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.02.092
- [20] Puertas, F.; Varga, C.; Palacios, M.; Pellerin, B.; Eychenne-Baron, C.; Babayan, D.; Boustingorry, P.; Elkhadiri, I. (2011). Alkali-Activation of Slag Cements : Activation Process , Microstructure and Mechanical Properties, *13th International Congress on the Chemistry of Cement*.
- [21] He, K. C.; Guo, R. X.; Ma, Q. M.; Yan, F.; Lin, Z. W.; Sun, Y. L. (2016). Experimental Research on High Temperature Resistance of Modified Lightweight Concrete after Exposure to Elevated Temperatures, *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2016. doi:10.1155/2016/5972570
- [22] Tosun-Felekoğlu, K. (2012). The effect of C 3A content on sulfate durability of Portland limestone cement mortars, *Construction and Building Materials*. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.091
- [23] Andrew, R. M. (2017). Global CO₂ emissions from cement production, *Earth System Science Data Discussions*, 1–52. doi:10.5194/essd-2017-77
- [24] Boden, T. A.; Andres, R. J.; Marland, G. (2017). Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions (1751 - 2014), *Environmental System Science Data Infrastructure for a Virtual Ecosystem; Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN (United States)*
- [25] IEA. (2016). Energy Technology Perspectives 2016: Towards Sustainable Urban Energy systems, *International Energy Agency (IEA)*
- [26] Penman, J.; Gytarsky, M.; Hiraishi, T.; Irving, W.; Krug, T. (2006). 2006 IPCC - Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, *Directrices Para Los Inventarios Nacionales GEI*
- [27] Köhl, H.(1908). Slag cement and process of making the same, Germany.
- [28] Purdon, A. O. (1940). The action of alkalis on blast-furnace slag, *J. Soc. Chem. Ind.-Trans.*, 59, s. 191-202.
- [29] Buchwald, A.; Vanootehem, M.; Gruyaert, E.; Hilbig, H.; De Belie, N. (2015). Purdocement: application of alkali-activated slag cement in Belgium in the 1950s, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. doi:10.1617/s11527-013-0200-8
- [30] Provis, J. L.; van Deventer, J. S. J. (2014). Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM, *Springer*
- [31] Krivenko, P. V. (1994). Alkaline cements, Proceedings of the First International Conference, Kiev, Ukraine, 11–129
- [32] Davidovits, J. (1984). Synthetic mineral polymer compound of the silicoaluminates family and preparation process, Google Patents
- [33] British standards Institution, (2016). British Standards Institution, British Standards Institution
- [34] Li, C.; Sun, H.; Li, L. (2010). A review: The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements, *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 9, 1341–1349. doi:10.1016/j.cemconres.2010.03.020
- [35] Balun, B. (2019). *Alkalilerle Aktive Edilmiş Bitlis Yöresi Pomzası İçeren Hibrit Bağlayıcıların Üretilebilirliğinin İncelenmesi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [36] Blaakmeer, J. (1994). Diabind: An alkali-activated slag fly ash binder for acid-resistant concrete, *Advanced Cement Based Materials*. doi:10.1016/1065-7355(94)90036-1

- [37] Van Deventer, J. S. J.; Provis, J. L.; Duxson, P. (2012). Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement, *Minerals Engineering*, Vol. 29, 89–104. doi:10.1016/j.mineng.2011.09.009
- [38] Habert, G.; Miller, S. A.; John, V. M.; Provis, J. L.; Favier, A.; Horvath, A.; Scrivener, K. L. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries, *Nature Reviews Earth & Environment*. doi:10.1038/s43017-020-0093-3
- [39] Krausmann, F.; Lauk, C.; Haas, W.; Wiedenhofer, D. (2018). From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900–2015, *Global Environmental Change*. doi:10.1016/j.gloenvcha.2018.07.003
- [40] Sumesh, M.; Alengaram, U. J.; Jumaat, M. Z.; Mo, K. H.; Alnahhal, M. F. (2017). Incorporation of nano-materials in cement composite and geopolymer based paste and mortar – A review, *Construction and Building Materials*, Vol. 148, 62–84. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.206
- [41] Monteiro, P. J. M.; Miller, S. A.; Horvath, A. (2017). Towards sustainable concrete, *Nature Materials*. doi:10.1038/nmat4930
- [42] Fawer, M.; Concannon, M.; Rieber, W. (1999). Life cycle inventories for the production of sodium silicates, *International Journal of Life Cycle Assessment*. doi:10.1007/BF02979498
- [43] Allen, A. J.; Thomas, J. J.; Jennings, H. M. (2007). Composition and density of nanoscale calcium-silicate-hydrate in cement, *Nature Materials*. doi:10.1038/nmat1871
- [44] Fernández-Jiménez, A.; Palomo, A. (2003). Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements, *Fuel*. doi:10.1016/S0016-2361(03)00194-7
- [45] Fernández-Jiménez, A.; Palomo, A.; Sobrados, I.; Sanz, J. (2006). The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes, *Microporous and Mesoporous Materials*. doi:10.1016/j.micromeso.2005.11.015
- [46] Fernández-Jiménez, A.; Puertas, F.; Sobrados, I.; Sanz, J. (2003). Structure of calcium silicate hydrates formed in alkaline-activated slag: Influence of the type of alkaline activator, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 86, No. 8, 1389–1394. doi:10.1111/j.1151-2916.2003.tb03481.x
- [47] Bakharev, T. (2005). Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing, *Cement and Concrete Research*. doi:10.1016/j.cemconres.2004.06.031
- [48] Criado, M.; Palomo, A.; Fernández-Jiménez, A. (2005). Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products, *Fuel*. doi:10.1016/j.fuel.2005.03.030
- [49] Duxson, P.; Provis, J. L.; Lukey, G. C.; Mallicoat, S. W.; Kriven, W. M.; Van Deventer, J. S. J. (2005). Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. doi:10.1016/j.colsurfa.2005.06.060
- [50] Talling, B.; Brandstetr, J. (1989). Present state and future of alkali-activated slag concretes, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. *Proceedings of the Third International Conference*, 1519–1545
- [51] Glasser, F. P. (2001). Mineralogical aspects of cement in radioactive waste disposal, *Mineralogical Magazine*, Vol. 65, No. 5, 621–633. doi:10.1180/002646101317018442
- [52] Haha, M. Ben; Lothenbach, B.; Le Saout, G.; Winnefeld, F. (2011). Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag - Part I: Effect of MgO, *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, No. 9, 955–963. doi:10.1016/j.cemconres.2011.05.002

- [53] Douglas, E.; Brandstetr, J. (1990). A preliminary study on the alkali activation of ground granulated blast-furnace slag, *Cement and Concrete Research*, Vol. 20, No. 5, 746–756. doi:10.1016/0008-8846(90)90008-L
- [54] Bernal, S. A.; San Nicolas, R.; Myers, R. J.; Mejía De Gutiérrez, R.; Puertas, F.; Van Deventer, J. S. J.; Provis, J. L. (2014). MgO content of slag controls phase evolution and structural changes induced by accelerated carbonation in alkali-activated binders, *Cement and Concrete Research*, Vol. 57, 33–43. doi:10.1016/j.cemconres.2013.12.003
- [55] Mills, S. J.; Christy, A. G.; Génin, J.-M. R.; Kameda, T.; Colombo, F. (2012). Nomenclature of the hydrotalcite supergroup: natural layered double hydroxides, *Mineralogical Magazine*, Vol. 76, No. 5, 1289–1336. doi:10.1180/minmag.2012.076.5.10
- [56] Oh, J. E.; Clark, S. M.; Monteiro, P. J. M. (2011). Does the Al substitution in C-S-H(I) change its mechanical property?, *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, No. 1, 102–106. doi:10.1016/j.cemconres.2010.09.010
- [57] Mostafa, N. Y.; El-Hemaly, S. A. S.; Al-Wakeel, E. I.; El-Korashy, S. A.; Brown, P. W. (2001). Characterization and evaluation of the hydraulic activity of water-cooled slag and air-cooled slag, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 6, 899–904. doi:10.1016/S0008-8846(01)00497-5
- [58] Li, D.; Xu, Z.; Luo, Z.; Pan, Z.; Cheng, L. (2002). The activation and hydration of glassy cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 7, 1145–1152. doi:10.1016/S0008-8846(02)00755-X
- [59] Swamy, R. N.; Bouikni, A. (1990). Some engineering properties of slag concrete as influenced by mix proportioning and curing, *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 3, 210–220
- [60] Pal, S. C.; Mukherjee, A.; Pathak, S. R. (2003). Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 9, 1481–1486. doi:10.1016/S0008-8846(03)00062-0
- [61] Krivenko, P. (1994). Progress in alkaline cements, *Proceedings of the 1st Inter. Conf. Alkaline Cements and Concretes*. 11–129, Kiev, Ukrayna
- [62] Glukhovsky, V. (1994). Ancient, Modern and Future Concretes, *First Inter. Conf. Alkaline Cements and Concretes*, 1, 1–8 Kiev, Ukrayna
- [63] Fernández-Jiménez, A. M. (2000). *Cementos de Escorias Activadas Alcalinamente: Influencia de Las Variables y Modelizacion Del Proceso*, Instituto Ciencias de La Construcción Eduardo Torroja
- [64] Singh, B.; Rahman, M. R.; Paswan, R.; Bhattacharyya, S. K. (2016). Effect of activator concentration on the strength, ITZ and drying shrinkage of fly ash/slag geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 118, 171–179. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.05.008
- [65] Weng, L.; Sagoe-Crentsil, K. (2007). Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: Part I-Low Si/Al ratio systems, *Journal of Materials Science*, Vol. 42, No. 9, 2997–3006. doi:10.1007/s10853-006-0820-2
- [66] Singh, P. S.; Bastow, T.; Trigg, M. (2005). Structural studies of geopolymers by ²⁹Si and ²⁷Al MAS-NMR, *Journal of Materials Science*, Vol. 40, No. 15, 3951–3961. doi:10.1007/s10853-005-1915-x
- [67] Awoyera, P. O.; Adesina, A.; Sivakrishna, A.; Gobinath, R.; Kumar, K. R.; Srinivas, A. (2020). Alkali activated binders: Challenges and opportunities, *Materials Today: Proceedings*. doi:10.1016/j.matpr.2019.08.199
- [68] Xu, H.; Van Deventer, J. S. J. (2003). Effect of source materials on geopolymerization, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 42, No. 8, 1698–1706. doi:10.1021/ie0206958

- [69] Vickers, L.; van Riessen, A.; Rickard, W. D. A. (2015). Precursors and Additives for Geopolymer Synthesis, 17–37. doi:10.1007/978-981-287-311-8_2
- [70] Khale, D.; Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review, *Journal of Materials Science*, Vol. 42, No. 3, 729–746. doi:10.1007/s10853-006-0401-4
- [71] de Vargas, A. S.; Masuero, Â. B.; Vilela, A. C. F. (2006). Investigations on the use of electric-arc furnace dust (EAFD) in Pozzolan-modified Portland cement I (MP) pastes, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 10, 1833–1841. doi:10.1016/j.cemconres.2006.06.003
- [72] Part, W. K.; Ramli, M.; Cheah, C. B. (2015). An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products, *Construction and Building Materials*, 370–395. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.12.065
- [73] Provis, J. L. (2009). Activating solution chemistry for geopolymers, *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*, 50–71. doi:10.1533/9781845696382.1.50
- [74] Weidema, B. (2000). Avoiding co-product allocation in life-cycle assessment, *Journal of Industrial Ecology*, 11–33. doi:10.1162/108819800300106366
- [75] Lee, W. K. W.; Van Deventer, J. S. J. (2002). Structural reorganisation of class F fly ash in alkaline silicate solutions, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 211, No. 1, 49–66. doi:10.1016/S0927-7757(02)00237-6
- [76] Brough, A. R.; Atkinson, A. (2002). Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars - Part I. Strength, hydration and microstructure, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 6, 865–879. doi:10.1016/S0008-8846(02)00717-2
- [77] Van Deventer, J. S. J.; Provis, J. L.; Duxson, P.; Brice, D. G. (2010). Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials, *Waste and Biomass Valorization*. doi:10.1007/s12649-010-9015-9
- [78] Hua, X.; Provis, J. L.; Van Deventer, J. S. J.; Krivenko, P. V. (2008). Characterization of Aged Slag Concretes, *ACI Materials Journal*. doi:10.14359/19753
- [79] Douglas, E.; Bilodeau, A.; Malhotra, V. M. (1992). Properties and durability of alkali-activated slag concrete, *ACI Materials Journal*. doi:10.14359/1832
- [80] Lloyd, R. R.; Provis, J. L.; Van Deventer, J. S. J. (2010). Pore solution composition and alkali diffusion in inorganic polymer cement, *Cement and Concrete Research*. doi:10.1016/j.cemconres.2010.04.008
- [81] Kovalchuk, G.; Krivenko, P. V. (2009). Producing fire- and heat-resistant geopolymers, *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. doi:10.1533/9781845696382.2.227
- [82] Lyon, R. E.; Balaguru, P. N.; Foden, A.; Sorathia, U.; Davidovits, J.; Davidovics, M. (1997). Fire-resistant aluminosilicate composites, *Fire and Materials*. doi:10.1002/(SICI)1099-1018(199703)21:2<67::AID-FAM596>3.0.CO;2-N
- [83] Yang, C. H.; Wu, F.; Chen, K. (2011). Research on set retarder of high and super high strength alkali-activated slag cement and concrete, *Key Engineering Materials*. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.477.164
- [84] Kovalchuk, G.; Fernández-Jiménez, A.; Palomo, A. (2007). Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development - Part II, *Fuel*. doi:10.1016/j.fuel.2006.07.010

- [85] Ingenieur, S. (2014). und Architektenverein SIA, Anforderungen an Neue Zemente (Merkblatt 2049)," Zürich, Switzerland
- [86] ASTM Committee C01.10. (2011). ASTM C1157-11 Standard Performance Specification for Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standards Volume 04.01
- [87] Bakharev, T.; Sanjayan, J. G.; Cheng, Y. B. (1999). Alkali activation of Australian slag cements, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 1, 113–120. doi:10.1016/S0008-8846(98)00170-7
- [88] Fernández-Jiménez, A.; Palomo, J. G.; Puertas, F. (1999). Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 8, 1313–1321. doi:10.1016/S0008-8846(99)00154-4
- [89] Shariati, M.; Shariati, A.; Trung, N. T.; Shoaie, P.; Ameri, F.; Bahrami, N.; Zamanabadi, S. N. (2021). Alkali-activated slag (AAS) paste: Correlation between durability and microstructural characteristics, *Construction and Building Materials*, Vol. 267. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120886
- [90] Duran Atiş, C.; Bilim, C.; Çelik, Ö.; Karahan, O. (2009). Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 1, 548–555. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.10.011
- [91] Gao, Y.; Xu, J.; Luo, X.; Zhu, J.; Nie, L. (2016). Experiment research on mix design and early mechanical performance of alkali-activated slag using response surface methodology (RSM), *Ceramics International*, Vol. 42, No. 10, 11666–11673. doi:10.1016/j.ceramint.2016.04.076
- [92] Bilim, C.; Karahan, O.; Atiş, C. D.; Ilkentapar, S. (2013). Influence of admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars subjected to different curing conditions, *Materials and Design*, Vol. 44, 540–547. doi:10.1016/j.matdes.2012.08.049
- [93] Chi, M. C.; Chang, J. J.; Huang, R. (2012). Strength and drying shrinkage of alkali-activated slag paste and mortar, *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2012. doi:10.1155/2012/579732
- [94] Bakharev, T.; Sanjayan, J. G.; Cheng, Y. B. (1999). Effect of elevated temperature curing on properties of alkali-activated slag concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 10, 1619–1625. doi:10.1016/S0008-8846(99)00143-X
- [95] Collins, F.; Sanjayan, J. G. (1998). Early age strength and workability of slag pastes activated by NaOH and Na₂CO₃, *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 5, 655–664. doi:10.1016/S0008-8846(98)00025-8
- [96] Collins, F. G.; Sanjayan, J. G. (1999). Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 3, 455–458. doi:10.1016/S0008-8846(98)00236-1
- [97] Zhang, G.; Yang, H.; Ju, C.; Yang, Y. (2020). Novel selection of environment-friendly cementitious materials for winter construction: Alkali-activated slag/Portland cement, *Journal of Cleaner Production*. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120592
- [98] Mohabbi Yadollahi, M.; Dener, M. (2019). Investigation of elevated temperature on compressive strength and microstructure of alkali activated slag based cements, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. doi:10.1080/19648189.2018.1557562
- [99] Mithun, B. M.; Narasimhan, M. C. (2016). Performance of alkali activated slag concrete mixes incorporating copper slag as fine aggregate, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 112, 837–844. doi:10.1016/j.jclepro.2015.06.026
- [100] Shi, C. (1996). Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars, *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 12, 1789–1799. doi:10.1016/S0008-8846(96)00174-3

- [101] Sun, Z.; Lin, X.; Vollpracht, A. (2018). Pervious concrete made of alkali activated slag and geopolymers, *Construction and Building Materials*, Vol. 189, 797–803. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.09.067
- [102] Bernal, S. A.; Mejía De Gutiérrez, R.; Pedraza, A. L.; Provis, J. L.; Rodriguez, E. D.; Delvasto, S. (2011). Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes, *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, No. 1, 1–8. doi:10.1016/j.cemconres.2010.08.017
- [103] Awoyera, P.; Adesina, A. (2020). Durability Properties of Alkali Activated Slag Composites: Short Overview, *Silicon*, Vol. 12, No. 4, 987–996. doi:10.1007/s12633-019-00199-1
- [104] Bakharev, T.; Sanjayan, J. G.; Cheng, Y. B. (2002). Sulfate attack on alkali-activated slag concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 2, 211–216. doi:10.1016/S0008-8846(01)00659-7
- [105] Komljenović, M.; Baščarević, Z.; Marjanović, N.; Nikolić, V. (2013). External sulfate attack on alkali-activated slag, *Construction and Building Materials*, Vol. 49, 31–39. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.08.013
- [106] Bondar, D.; Lynsdale, C. J.; Milestone, N. B.; Hassani, N. (2015). Sulfate Resistance of Alkali Activated Pozzolans, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 9, No. 2, 145–158. doi:10.1007/s40069-014-0093-0
- [107] Gong, K.; White, C. E. (2018). Nanoscale Chemical Degradation Mechanisms of Sulfate Attack in Alkali-activated Slag, *Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 122, No. 11, 5992–6004. doi:10.1021/acs.jpcc.7b11270
- [108] Ye, H.; Chen, Z.; Huang, L. (2019). Mechanism of sulfate attack on alkali-activated slag: The role of activator composition, *Cement and Concrete Research*, Vol. 125. doi:10.1016/j.cemconres.2019.105868
- [109] Park, K.-M.; Cho, Y.-K.; Lee, B.-C. (2016). Sulfate resistance of alkali-activated materials mortar, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 20, No. 2, 94–101
- [110] Cho, Y.; Park, K.; Jung, S.; Chung, Y. (2018). A Study on the Sulfate Resistance of Alkali Activated FA Based Geopolymer and GGBFS Blended Mortar with Various Sulfate Types, *Preprints.org*. doi:10.20944/preprints201811.0190.v1
- [111] Ismail, I.; Bernal, S. A.; Provis, J. L.; Hamdan, S.; Van Deventer, J. S. J. (2013). Microstructural changes in alkali activated fly ash/slag geopolymers with sulfate exposure, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol. 46, No. 3, 361–373. doi:10.1617/s11527-012-9906-2
- [112] Carabba, L.; Moricone, R.; Scarponi, G. E.; Tugnoli, A.; Bignozzi, M. C. (2019). Alkali activated lightweight mortars for passive fire protection: A preliminary study, *Construction and Building Materials*, Vol. 195, 75–84. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.005
- [113] Rovnaník, P.; Bayer, P.; Rovnaníková, P. (2013). Characterization of alkali activated slag paste after exposure to high temperatures, *Construction and Building Materials*, Vol. 47, 1479–1487. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.06.070
- [114] Li, Y. L.; Zhao, X. L.; Singh Raman, R. K.; Al-Saadi, S. (2018). Thermal and mechanical properties of alkali-activated slag paste, mortar and concrete utilising seawater and sea sand, *Construction and Building Materials*, Vol. 159, 704–724. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.10.104
- [115] Kürklü, G. (2016). The effect of high temperature on the design of blast furnace slag and coarse fly ash-based geopolymer mortar, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 92, 9–18. doi:10.1016/j.compositesb.2016.02.043

- [116] Bakharev, T.; Sanjayan, J. G.; Cheng, Y. B. (2001). Resistance of alkali-activated slag concrete to carbonation, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 9, 1277–1283. doi:10.1016/S0008-8846(01)00574-9
- [117] Fernández-Jiménez, A.; Puertas, F. (2001). Setting of alkali-activated slag cement. Influence of activator nature, *Advances in Cement Research*, Vol. 13, No. 3, 115–121. doi:10.1680/adcr.2001.13.3.115
- [118] He, J.; Gao, Q.; Wu, Y.; He, J.; Pu, X. (2018). Study on improvement of carbonation resistance of alkali-activated slag concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 176, 60–67. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.04.117
- [119] Pacheco-Torgal, F.; Abdollahnejad, Z.; Camões, A. F.; Jamshidi, M.; Ding, Y. (2012). Durability of alkali-activated binders: A clear advantage over Portland cement or an unproven issue?, *Construction and Building Materials*, 400–405. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.017
- [120] Shahrajabian, F.; Behfarnia, K. (2018). The effects of nano particles on freeze and thaw resistance of alkali-activated slag concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 176, 172–178. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.033
- [121] Wang, S. D.; Pu, X. C.; Scrivener, K. L.; Pratt, P. L. (1995). Alkali-activated slag cement and concrete: A review of properties and problems, *Advances in Cement Research*, Vol. 7, No. 27, 93–102. doi:10.1680/adcr.1995.7.27.93
- [122] Giosuè, C.; Mobili, A.; Di Perna, C.; Tittarelli, F. (2019). Performance of lightweight cement-based and alkali-activated mortars exposed to high-temperature, *Construction and Building Materials*, Vol. 220, 565–576. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.05.193
- [123] Karataş, M.; Balun, B.; Benli, A. (2017). High temperature resistance of self-compacting lightweight mortar incorporating expanded perlite and pumice, *Computers and Concrete*, Vol. 19, No. 2, 121–126. doi:10.12989/cac.2017.19.2.121
- [124] Oleiwi, S. M.; Algin, Z.; Nassani, D. E.; Mermerdaş, K. (2018). Multi-Objective Optimization of Alkali Activator Agents for FA- and GGBFS-Based Geopolymer Lightweight Mortars, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 43, No. 10, 5333–5347. doi:10.1007/s13369-018-3170
- [125] Yang, K. H.; Song, J. K.; Lee, J. S. (2010). Properties of alkali-activated mortar and concrete using lightweight aggregates, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol. 43, No. 3, 403–416. doi:10.1617/s11527-009-9499-6
- [126] Abdulkareem, O. A.; Mustafa Al Bakri, A. M.; Kamarudin, H.; Khairul Nizar, I.; Saif, A. A. (2014). Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 50, 377–387. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.09.047
- [127] Zuda, L.; Černý, R. (2009). Measurement of linear thermal expansion coefficient of alkali-activated aluminosilicate composites up to 1000 °C, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, No. 4, 263–267. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.02.002
- [128] Khaleel, O. R.; Abdul Razak, H. (2012). The effect of powder type on the setting time and self compactability of mortar, *Construction and Building Materials*, Vol. 36, 20–26. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.079
- [129] Abdollahnejad, Z.; Mastali, M.; Mastali, M.; Dalvand, A. (2017). Comparative study on the effects of recycled glass-fiber on drying shrinkage rate and mechanical properties of the self-compacting mortar and fly ash-slag geopolymer mortar, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 29, No. 8. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001918

- [130] Ghosh, K.; Ghosh, P. (2012). Effect Of $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ And W/B Ratio On Setting Time And Workability Of Flyash Based Geopolymer, *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)* (Vol. 2)
- [131] Roy, D. M.; Silsbee, M. R. (1991). Alkali Activated Cementitious Materials: An Overview, *MRS Proceedings*, Vol. 245. doi:10.1557/proc-245-153
- [132] Wang, S. D.; Scrivener, K. L. (1995). Hydration products of alkali activated slag cement, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 3, 561–571. doi:10.1016/0008-8846(95)00045-E
- [133] Saini, G.; Vattipalli, U. (2020). Assessing properties of alkali activated GGBS based self-compacting geopolymer concrete using nano-silica, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 12. doi:10.1016/j.cscm.2020.e00352
- [134] K, N. V.; Babu, D. L. V. (2018). Assessing the performance of molarity and alkaline activator ratio on engineering properties of self-compacting alkaline activated concrete at ambient temperature, *Journal of Building Engineering*, Vol. 20, 137–155. doi:10.1016/j.job.2018.07.005
- [135] Lv, J.; Du, Q.; Zhou, T.; He, Z.; Li, K. (2019). Fresh and mechanical properties of self-compacting rubber lightweight aggregate concrete and corresponding mortar, *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2019. doi:10.1155/2019/8372547
- [136] Cheboub, T.; Senhadji, Y.; Khelafi, H.; Escadeillas, G. (2020). Investigation of the engineering properties of environmentally-friendly self-compacting lightweight mortar containing olive kernel shells as aggregate, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 249. doi:10.1016/j.jclepro.2019.119406
- [137] Awoyera, P. O.; Akinwumi, I. I.; Karthika, V.; Gobinath, R.; Gunasekaran, R.; Lokesh, N.; Manikandan, M.; Narmatha, T. (2020). Lightweight Self-Compacting Concrete Incorporating Industrial Rejects and Mineral Admixtures: Strength and Durability Assessment, *Silicon*, Vol. 12, No. 8, 1779–1785. doi:10.1007/s12633-019-00279-2
- [138] Zarnaghi, V. N.; Fouroghi-Asl, A.; Nourani, V.; Ma, H. (2018). On the pore structures of lightweight self-compacting concrete containing silica fume, *Construction and Building Materials*, Vol. 193, 557–564. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.09.080
- [139] Ting, T. Z. H.; Rahman, M. E.; Lau, H. H.; Ting, M. Z. Y. (2019). Recent development and perspective of lightweight aggregates based self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 201, 763–777. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.128
- [140] Karthika, V.; Awoyera, P. O.; Akinwumi, I. I.; Gobinath, R.; Gunasekaran, R.; Lokesh, N. (2018). Structural properties of lightweight self-compacting concrete made with pumice stone and mineral admixtures, *Revista Romana de Materiale/ Romanian Journal of Materials*, Vol. 48, No. 2, 208–213
- [141] Türker, H. T.; Balçikanlı, M.; Durmuş, I. H.; Özbay, E.; Erdemir, M. (2016). Microstructural alteration of alkali activated slag mortars depend on exposed high temperature level, *Construction and Building Materials*, Vol. 104, 169–180. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.070
- [142] TSE. (2003). TSE EN 1008. Beton karma suyu, numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara., 2003
- [143] EFNARC. (2002). Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, Report from EFNARC, Vol. 44, No. February, 32. doi:0 9539733 4 4
- [144] TS. EN. 196- 3, 2002. Çimento Deney Metotları - Bölüm 3: Priz Süresi ve Hacim Genleşme Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara. (2002), 2002

- [145] TS EN 12390-7. (2000) Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [146] ASTM C109/C109M, A. (2007). Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in . or [50-mm] Cube Specimens) 1, American Society for Testing and Material
- [147] ASTM Standard. (2018). ASTM C348-18: Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 98, No. Reapproved, 98–100
- [148] Erdogan, T. Y. (2003). Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık, Türkiye
- [149] Noushini, A.; Babaei, M.; Castel, A. (2015). Suitability of heat-cured low-calcium fly ash-based geopolymer concrete for precast applications, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 68, No. 4, 163–177. doi:10.1680/mac.15.00065
- [150] Noushini, A.; Aslani, F.; Castel, A.; Gilbert, R. I.; Uy, B.; Foster, S. (2016). Compressive stress-strain model for low-calcium fly ash-based geopolymer and heat-cured Portland cement concrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 73, 136–146. doi:10.1016/j.cemconcomp.2016.07.004
- [151] Rovnaník, P. (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 7, 1176–1183. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.12.023
- [152] Memon, F. A.; Nuruddin, M. F.; Demie, S.; Shafiq, N. (2012). Effect of superplasticizer and extra water on workability and compressive strength of self-compacting geopolymer concrete, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, Vol. 4, No. 5, 407–414
- [153] Manjunath, R.; Narasimhan, M. C. (2018). An experimental investigation on self-compacting alkali activated slag concrete mixes, *Journal of Building Engineering*, Vol. 17, No. October 2017, 1–12. doi:10.1016/j.job.2018.01.009
- [154] Amer, I.; Kohail, M.; El-Feky, M. S.; Rashad, A.; Khalaf, M. A. (2020). Characterization of alkali-activated hybrid slag/cement concrete, *Ain Shams Engineering Journal*, No. xxxx. doi:10.1016/j.asej.2020.08.003
- [155] Khalil, M. Y.; Merz, E. (1994). Immobilization of intermediate-level wastes in geopolymers, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 211, No. 2, 141–148. doi:10.1016/0022-3115(94)90364-6
- [156] Gebregziabihier, B. S.; Thomas, R. J.; Peethamparan, S. (2016). Temperature and activator effect on early-age reaction kinetics of alkali-activated slag binders, *Construction and Building Materials*, Vol. 113, 783–793. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.03.098
- [157] Meteoroloji Genel Müdürlüğü. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=ISTANBUL>, Erişim: 19-8-2021
- [158] Singh, N. B.; Sarvahi, R.; Singh, N. P.; Shukla, A. K. (1994). Effect of temperature on the hydration of ordinary Portland cement in the presence of a superplasticizer, *Thermochimica Acta*, Vol. 247, No. 2, 381–388. doi:10.1016/0040-6031(94)80138-X
- [159] Wade, S. A.; Nixon, J. M.; Schindler, A. K.; Barnes, R. W. (2010). Effect of Temperature on the Setting Behavior of Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 22, No. 3, 214–222. doi:10.1061/(asce)0899-1561(2010)22:3(214)
- [160] Güneyisi, E.; Gesoglu, M.; Ghanim, H.; Ipek, S.; Taha, I. (2016). Influence of the artificial lightweight aggregate on fresh properties and compressive strength of the self-compacting mortars, *Construction and Building Materials*, Vol. 116, 151–158. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.140
- [161] Top, S.; Vapur, H.; Altiner, M.; Kaya, D.; Ekicibil, A. (2020). Properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete prepared using pumice and expanded perlite as aggregates, *Journal of Molecular Structure*, Vol. 1202. doi:10.1016/j.molstruc.2019.127236

- [162] Zuda, L.; Drchalová, J.; Rovnaník, P.; Bayer, P.; Keršner, Z.; Černý, R. (2010). Alkali-activated aluminosilicate composite with heat-resistant lightweight aggregates exposed to high temperatures: Mechanical and water transport properties, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 32, No. 2, 157–163. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.11.009
- [163] Falah, M.; Obenaus-Emler, R.; Kinnunen, P.; Illikainen, M. (2020). Effects of Activator Properties and Curing Conditions on Alkali-Activation of Low-Alumina Mine Tailings, *Waste and Biomass Valorization*. doi:10.1007/s12649-019-00781-z
- [164] Escalante-Garcia, J. I.; Espinoza-Perez, L. J.; Gorokhovskiy, A.; Gomez-Zamorano, L. Y. (2009). Coarse blast furnace slag as a cementitious material, comparative study as a partial replacement of Portland cement and as an alkali activated cement, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 7, 2511–2517. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.002
- [165] Pan, Z.; Tao, Z.; Cao, Y. F.; Wuhrer, R.; Murphy, T. (2018). Compressive strength and microstructure of alkali-activated fly ash/slag binders at high temperature, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 86, 9–18. doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.09.011
- [166] Rashad, A. M.; Hassan, A. A.; Zeedan, S. R. (2016). An investigation on alkali-activated Egyptian metakaolin pastes blended with quartz powder subjected to elevated temperatures, *Applied Clay Science*, Vols 132–133, 366–376. doi:10.1016/j.clay.2016.07.002
- [167] Karahan, O.; Yakupoğlu, A. (2011). Resistance of alkali-activated slag mortar to abrasion and fire, *Advances in Cement Research*, Vol. 23, No. 6, 289–297. doi:10.1680/adcr.2011.23.6.289
- [168] Karatas, M.; Dener, M.; Benli, A.; Mohabbi, M. (2019). High temperature effect on the mechanical behavior of steel fiber reinforced self-compacting concrete containing ground pumice powder, *Structural Concrete*. doi:10.1002/suco.201900067
- [169] Yang, K. H.; Cho, A. R.; Song, J. K.; Nam, S. H. (2012). Hydration products and strength development of calcium hydroxide-based alkali-activated slag mortars, *Construction and Building Materials*. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.063
- [170] Puertas, F.; Palacios, M.; Manzano, H.; Dolado, J. S.; Rico, A.; Rodríguez, J. (2011). A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements, *Journal of the European Ceramic Society*. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2011.04.036
- [171] Bernal, S. A.; Rodríguez, E. D.; De Gutiérrez, R. M.; Provis, J. L. (2015). Performance at high temperature of alkali-activated slag pastes produced with silica fume and rice husk ash based activators, *Materiales de Construcción*, Vol. 65, No. 318. doi:10.3989/mc.2015.03114
- [172] Lee, W. K. W.; Van Deventer, J. S. J. (2003). Use of Infrared Spectroscopy to Study Geopolymerization of Heterogeneous Amorphous Aluminosilicates, *Langmuir*. doi:10.1021/la026127e
- [173] Ping, Y.; Kirkpatrick, R. J.; Brent, P.; McMillan, P. F.; Cong, X. (1999). Structure of calcium silicate hydrate (C-S-H): Near-, mid-, and far-infrared spectroscopy, *Journal of the American Ceramic Society*. doi:10.1111/j.1151-2916.1999.tb01826.x
- [174] Hwang, C. L.; Yehualaw, M. D.; Vo, D. H.; Huynh, T. P.; Largo, A. (2019). Performance evaluation of alkali activated mortar containing high volume of waste brick powder blended with ground granulated blast furnace slag cured at ambient temperature, *Construction and Building Materials*. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.062
- [175] Elahi, A.; Khan, Q. U. Z.; Barbhuiya, S. A.; Basheer, P. A. M.; Russell, M. I. (2012). Hydration Characteristics of Cement Paste Containing Supplementary Cementitious Materials, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 37, No. 3, 535–544. doi:10.1007/s13369-012-0193-6

- [176] Lizarazo-Marriaga, J.; Claisse, P.; Ganjian, E. (2011). Effect of Steel Slag and Portland Cement in the Rate of Hydration and Strength of Blast Furnace Slag Pastes, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23, No. 2, 153–160. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000149
- [177] Mohabbi, M. (2019). Investigation of sulfates effects in perlite-based geopolymer, *Structural Concrete*, Vol. 20, No. 4, 1402–1410. doi:10.1002/suco.201900039
- [178] Fernandez-Jimenez, A.; Flores, E.; Maltseva, O.; Garcia-Lodeiro, I.; Palomo, A. (2013). Hybrid Alkaline Cements. Part Iii. Durability and Industrial Applications, *Revista Romana De Materiale-Romanian Journal of Materials*, Vol. 43, No. 2, 195–200
- [179] Beltrame, N. A. M.; Angulski da Luz, C.; Perardt, M.; Hooton, R. D. (2020). Alkali activated cement made from blast furnace slag generated by charcoal: Resistance to attack by sodium and magnesium sulfates, *Construction and Building Materials*, Vol. 238. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117710



ÖZGEÇMİŞ

Murat DENER

[illegible]

[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]

[REDACTED]

■ _____

■ _____

■ _____

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

1. M. Dener, M. Karatas, M. Mohabbi, High temperature resistance of self compacting alkali activated slag/portland cement composite using lightweight aggregate, *Construction and Building Materials*. (2021). doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123250.
2. M. Dener, M. Karatas, M. Mohabbi, Sulfate resistance of alkali-activated slag/Portland cement mortar produced with lightweight pumice aggregate, *Construction and Building Materials*. 304 (2021) 124671.
3. M. Karatas, M. Dener, A. Benli, M. Mohabbi, High temperature effect on the mechanical behavior of steel fiber reinforced self-compacting concrete containing ground pumice powder, *Structural Concrete*. (2019). doi:10.1002/suco.201900067.
4. M. Karatas, M. Dener, M. Mohabbi, A. Benli, A study on the compressive strength and microstructure characteristic of alkali-activated metakaolin cement, *Revista Materia*. (2019). doi:10.1590/s1517-707620190004.0832.

5. M. Mohabbi Yadollahi, M. Dener, Investigation of elevated temperature on compressive strength and microstructure of alkali activated slag based cements, European Journal of Environmental and Civil Engineering. (2019). doi:10.1080/19648189.2018.1557562.

Bildiriler:

1. M.Dener, M. Karataş, M.Yadollahi (2018). Effect of Specimen Size on Alkali Activated Cements,4th International Ege Composite Materials Symposium(KOMPEGE'18),Ege University,Izmir,Turkey,06-08 September.
2. M.Dener, M. Karataş, A. Benli, M.Yadollahi, (2017). The Influence of Elevated Temperature on the Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete with Ground Pumice Powder, 8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17), Fırat University, Elazığ, Turkey, 19-22 October.
3. M.Dener, M. Karataş, A. Benli, M.Yadollahi (2017). Mechanical and Durability Properties of Steel Fiber Reinforced Self Compacting Concrete Incorporating Ground Pumice Powder, 8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17), Fırat University, Elazığ, Turkey, 19-22 October.
4. F. İşsever, S. Varolgüneş, M. Yadollahi, M. Dener (2018). Reaktif Pudra Betonlarının Basınç Dayanımı ve Sulfata Karşı Dayanıklılığının İncelenmesi, International engineering and technology symposium (IETS'18), Batman University, Batman, Turkey, 3-5 May.
5. M. Yadollahi, F. İşsever, S. Varolgüneş, M. Dener (2018). Reaktif Pudra Betonlarda Mineral Katkı Kullanımının Çekme ve Basınç Gerilmeleri Arasındaki Regresyon Analizi, International engineering and technology symposium (IETS'18), Batman University, Batman, Turkey, 3-5 May.