

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALKALİ-AKTİF YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN SOĞUK HAVA
ŞARTLARI İÇİN ÜRETİM PARAMETRELERİNİN
BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ufuk ALTUNHAN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Murat DENER

BİNGÖL - 2025

**ALKALİ-AKTİF YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN SOĞUK HAVA
ŞARTLARI İÇİN ÜRETİM PARAMETRELERİNİN
BELİRLENMESİ**

Doç. Dr. Murat DENER danışmanlığında, Ufuk ALTUNHAN tarafından hazırlanan bu çalışma 03/09/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Ahmet BENLİ	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Murat DENER	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Muhammed ULUCAN	İmza	:

Yukarıdaki sonuç;

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

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince, bu tezin önerilmesi, yürütülmesi ve tamamlanması aşamalarında gerek teorik gerekse laboratuvar çalışmalarında her zaman bilgi ve tecrübesiyle yol gösteren, destek ve teşviklerini hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Murat Dener'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım, değerli katkılarıyla tez sürecime yön veren Sayın Doç. Dr. Ahmet Benli'ye şükranlarımı sunarım.

Araştırma süresince gerekli altyapı ve çalışma ortamını sağlayan, her aşamada desteklerini hissettiren Bingöl Üniversitesi'nin değerli akademik ve idari personeline teşekkür ederim.

Son olarak, bu süreçte maddi ve manevi olarak daima yanımda olan, desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen kıymetli aileme en derin teşekkürlerimi sunarım.

Ufuk ALTUNHAN

BİNGÖL - 2025

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
TABLolar LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. ALKALİ-AKTİF MALZEMELER	5
2.1. Tarihsel Gelişimi	5
2.2. Alkali – Aktif Malzemelerin Bileşenleri.....	8
2.2.1. Öncü Malzemeler	8
2.2.2. Alkali Aktivatörler	9
2.3. Alkali-Aktif Malzeme Çeşitleri	10
2.3.1. Düşük Kalsiyum İçeren Bağlayıcıların Jel Yapısı	11
2.3.2. Yüksek Kalsiyum İçeren Bağlayıcıların Jel Yapısı.....	13
3. SOĞUK HAVA ŞARTLARINA ELVERİŞLİ BİR BAĞLAYICI ALKALİ-AKTİF CÜRUF	14
4. KAYNAK ÖZETLERİ.....	17
4.1. Mekanik Özellikler.....	17
4.2. Priz (Sertleşme) Süresi.....	21
4.3. Hidratasyon Süreci / Isısı	22
5. METERYAL VE YÖNTEM.....	24
5.1. Kullanılan Malzemeler	24
5.1.1. Portland Çimentosu	24
5.1.2. Yüksek Fırın Cürufu	25
5.1.3. Aktivatör	26
5.1.4. Karışım Suyu	27
5.2. Karışımların Üretilmesi.....	27
5.3. Gerçekleştirilen Deneyler.....	31

5.3.1. Priz süresinin Belirlenmesi.....	31
5.3.2. Basınç Dayanım Deneyleri	32
5.3.3. Ultrases Geçiş Hızı Ölçümü (UGH) Analizleri	32
5.3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri	33
5.3.5. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Analizleri.....	34
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	37
6.1. Basınç Dayanımı Sonuçları	37
6.2. Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları	41
6.3. Priz Süresi Sonuçları	44
6.4. Ftr Analizi Sonuçları.....	46
6.5. Sem Analizi Sonuçları.....	50
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR	56

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Na ₂ SiO ₃	: Sodyum silikat
NaOH	: Sodyum hidroksit
K	: Potasyum
N	: Azot
PÇ	: Portland çimentosu
YFC	: Yüksek fırın cürufu
AAM	: Alkali-aktif malzeme
AEM	: Alümino silikat esaslı malzeme
UGH	: Ultrases Geçiş Hızı
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
FTIR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi
SH	: Sodyum hidroksit
SS	: Sodyum silikat
Mpa	: Mega paskal
gr	: Gram
mm ³	: Milimetre küp
%	: Yüzde
XRD	: X-Işını Difraktometresi
ITZ	: Arayüzey geçiş bölgesi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Lipetsk, Rusya’da bulunan ve AAM kullanılarak inşa edilen 20 katlı bina.....	6
Şekil 2.2.	Mariupol, Ukrayna’da bulunan ve AAM kullanılarak inşa edilen 9 katlı bina	7
Şekil 2.3	AAM kullanılarak üretilen beton ile inşa edilen yol.....	7
Şekil 2.4.	PC betonu ve AAC betonu ile imal edilen yollar	8
Şekil 2.5.	AEM'nin katı bir fazda oluşan alkali-aktivasyon süreci ve tepkime ürünleri.....	11
Şekil 5.1.	YFC'nin XRD Difraktometresi spektrumu	26
Şekil 5.2.	Aktivatör olarak kullanılan Na_2SiO_3 ve NaOH	26
Şekil 5.3.	Harç Mikseri.....	29
Şekil 5.4.	50x50x50 mm ³ Boyutlu Küp Numuneler.....	29
Şekil 5.5.	Hazırlanan Numuneler.....	30
Şekil 5.6.	Soğutucu	30
Şekil 5.7.	Vicat Aleti.....	31
Şekil 5.8.	Beton Test Numuneleri Deney Presi	32
Şekil 5.9.	Ultrases Geçiş Hızı Ölçüm (UGH) Cihazı.....	33
Şekil 5.10.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	34
Şekil 5.11.	FTIR Spektrofotometre	35
Şekil 6.1.	Alkali modülü 1,2 olan beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları	37
Şekil 6.2.	Alkali modülü 1,5 olan beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları	38
Şekil 6.3.	Alkali modülü 1,2 olan beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük UGH değerleri	42
Şekil 6.4.	Alkali modülü 1,2 olan beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük UGH değerleri	42

Şekil 6.5.	Farklı kürleme sürelerinde basınç dayanımı ile UGH arasındaki korelasyonlar.....	43
Şekil 6.6.	%5 Alkali dozajına sahip farklı modüldeki karışımların priz süreleri.....	45
Şekil 6.7.	YFC'nin FTIR spektrumları.....	47
Şekil 6.8.	Farklı alkali aktivatörü ve etkisindeki numunelerin FTIR spektrumları.....	47
Şekil 6.9.	M1.2/N5/P10 Numunesinin 28 ve 90 gün sonundaki FTIR Spektrumları.....	48
Şekil 6.10.	M1.5/N5/P0 Numunesinin 28 ve 90 gün sonundaki Ftir Spektrumları.....	48
Şekil 6.11.	(a-b) M1.5/N5/P0 Numunesinin 28 ve 90 günlük Sem görüntüleri (c-d) M1.2/N5/P10 Numunesinin 28 ve 90 günlük Sem görüntüleri..	51
Şekil 6.12.	a) M1.5/N5/P0 numunesinin mikro yapısındaki değişim b) M1.5/N9/P0 numunesinin mikro yapısındaki değişim.....	52

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 5.1.	PC'nin kimyasal bileşimi.....	25
Tablo 5.2.	YFC'nin kimyasal bileşimi.....	25
Tablo 5.3.	Hazırlanan numuneler ve karışım oranları.....	28
Tablo 5.4.	Numuneler üzerinde yapılan Deneyler ve Standartları.....	36

ALKALI-AKTİF YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN SOĞUK HAVA ŞARTLARI İÇİN ÜRETİM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Günümüzde gelişen beton endüstrisinin temel bileşenlerinden biri olan Portland çimentosu (PC) ile üretilen betonlarda, düşük hava sıcaklıklarında gerçekleştirilen kürleme işlemleri çeşitli sorunları beraberinde getirmektedir. Bu sıcaklık koşullarında, çimento bileşenlerinin çözünme hızı büyük ölçüde azalmakta ve hidrasyon reaksiyonları önemli ölçüde yavaşlamaktadır. Bunun sonucunda betonun priz alma süresi uzamakta, bu da beton imalatında uygulama ve dayanım gelişimi açısından ciddi zorluklara yol açmaktadır. Bu tür olumsuzluklar, PC'ye alternatif bağlayıcı malzemelere olan gereksinimi ortaya koymuştur. Bu bağlamda, yüksek kalsiyum içeriği sayesinde harici ısı uygulamasına gerek kalmaksızın yüksek mekanik performans sergileyebilen alkali-aktif cüruf (AAC) sistemleri, PC'ye potansiyel bir alternatif olarak dikkat çekmiş ve araştırmaların odağı hâline gelmiştir. Bu tez çalışmasında, düşük sıcaklıklarda (2 °C) gerçekleştirilen kürleme koşullarında PC yerine yada PC ile birlikte AAC'nin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, AAC'nin düşük sıcaklıkta da sürekli hidrasyon sağlayabilme özelliği sayesinde PC'ye alternatif bir bağlayıcı malzeme olup olamayacağının değerlendirilmesidir. Bu kapsamda, yüksek fırın cürufu, sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılarak alkali aktivasyon yoluyla AAC üretilmiştir. DeneySEL çalışmalarda; alkali modülü 1,2 ve 1,5, alkali dozajı %5, %7 ve %9, PC ikame oranı ise %0, %10 ve %20 olacak şekilde toplam 18 farklı karışım hazırlanmıştır. DeneySEL aşamada öncelikle karışımların priz alma süreleri belirlenmiş, ardından yaşına ulaşan numunelerde basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı testleri (UGH) gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, mikro yapı incelemeleri için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizleri yapılmıştır.

Alkali dozajının artırılması, erken yaş dayanımını artırmış; ancak 90 günlük dayanımda düşüşe neden olmuştur. Alkali modülü ile PC ikame oranının birlikte artırılması ise, büzümeye bağlı çatlak oluşumları nedeniyle dayanımı daha da azaltmıştır. En uygun karışım tasarımları; %5 alkali dozajı içeren, 1,2 modül değerine sahip karışıma %10 PC ilavesi ve yine %5 alkali dozajı içeren, 1,5 modül değerine sahip karışım PC kullanımından tamamen vazgeçilmesiyle elde edilmiştir. Düşük sıcaklıkta kürleme işlemi gerçekleştirilmesine karşın PC ikamesi priz sürelerini önemli ölçüde hızlandırmıştır. Modül ve alkali dozajındaki değişiklikler, FTIR spektrumundaki pik yoğunluklarını önemli ölçüde etkilemiştir. SEM analizlerinde özellikle 90 günlük numunelerde PC'nin ilave edilmesi ile birlikte meydana gelen çatlaklar çok net görülmüştür. Elde edilen bulgular, PC'nin hidrasyonunun sınırlı olduğu 5 °C altı sıcaklıklarda uygun karışım tasarımlarıyla AAC sistemlerinin umut vadettiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Portland Çimentosu, Yüksek fırın cürufu, Alkali-aktif cüruf, Düşük kür sıcaklığı, Basınç dayanımı.

DETERMINATION OF PRODUCTION PARAMETERS OF ALKALI-ACTIVATED BLAST FURNACE SLAG FOR COLD WEATHER CONDITIONS

ABSTRACT

In today's rapidly developing concrete industry, concrete produced with Portland cement (PC), one of the fundamental components of modern construction, faces significant challenges when curing is carried out under low ambient temperatures. Under such conditions, the dissolution rate of cement components is greatly reduced, and hydration reactions slow down considerably. As a result, the setting time of concrete is extended, leading to serious difficulties in terms of workability and strength development during concrete production. These unfavorable conditions have highlighted the need for alternative binder materials to PC. In this context, alkali-activated slag (AAC) systems, which exhibit high mechanical performance without the need for external heating due to their high calcium content, have emerged as a potential alternative to PC and have become the focus of recent research. In this thesis study, the usability of AAC as a partial or full replacement for PC under curing conditions at low temperatures (2 °C) was investigated. The main objective of the study is to evaluate whether AAS can serve as an effective alternative binder by sustaining hydration even under low-temperature conditions. For this purpose, alkali activation was carried out using ground granulated blast furnace slag, sodium silicate, and sodium hydroxide. A total of 18 different mixtures were prepared by varying the alkali modulus (1.2 and 1.5), alkali dosage (5%, 7%, and 9%), and PC replacement ratios (0%, 10%, and 20%). Initially, the setting times of the mixtures were determined. Subsequently, compressive strength and ultrasonic pulse velocity (UGH) tests were performed on samples at designated curing ages. In addition, microstructural investigations were carried out using scanning electron microscopy (SEM) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analyses. Increasing the alkali dosage improved early-age strength; however, it led to a reduction in 90-day strength. Simultaneous increases in alkali modulus and PC replacement ratio further reduced strength due to shrinkage-induced cracking. The most favorable mixture designs were obtained with 10% PC substitution at a modulus of 1.2 and with no PC at a modulus of 1.5. Despite low-temperature curing, PC replacement significantly accelerated the setting time. Variations in modulus and alkali dosage notably affected the intensity of peaks observed in the FTIR spectrum. SEM analyses revealed that cracks, especially evident in 90-day samples, became more pronounced with the addition of PC.

The findings suggest that AAC systems hold promise as alternative binders under temperatures below 5 °C, where PC exhibits limited hydration performance, provided that appropriate mixture designs are implemented.

Keywords: Portland cement, Blast furnace slag, alkali-activated slag, Low curing temperature, Compressive strength.

1. GİRİŞ

Günümüzde yapı malzemelerinin en başında gelen beton; çimento, agrega, su ve gerektiği durumlarda istenilen oranlarda ki kimyasal katkı malzemelerinin karıştırılmasıyla elde edilen bir bileşke malzemedir. Standart beton içeriğinde kullanılan agrega çeşitleri; taş tozu (kum), kırma taş (küçük boyuttaki çakıl) ve iri çakıl olarak sıralanabilir. Bu duruma daha açık bir tanımlamayı Türk Standartları yapmıştır. İlgili kuruluş; 4mm elekten geçen agregaları ince agrega, geçemeyenleri ise iri agrega olarak tanımlamıştır. İşte bu agrega çeşitlerini suyun da yardımıyla birbirine bağlayan malzeme çimentodur. Çimentonun amacı; iri ve ince agrega tanelerini bir arada tutup söz konusu agregalar ve diğer tüm bileşenler ile birlikte kompoze bir malzeme oluşturmaktır [1]. Gün geçtiçe artan dünya nüfusuna bağlı olarak, özellikle gelişmekte olan ülkelerin büyümesinde ve gelişmesinde önemli rol oynayan gelişmiş altyapı projelerinin inşa edilmesi önümüzdeki 40 – 50 yıl boyunca çimento talebinde önemli bir artış yaşanacağını habercisidir [2,3]. Yaklaşık 185 yıl gibi bir geçmişi bulunan Portland Çimentosu (PC); beton için en fazla kullanılan dominant bağlayıcı bir malzeme olarak günümüze kadar gelmiştir. PC'nin böylesine değerini artırıp günümüze kadar sürdürülebilir bir şekilde gelmesini ve halen de beton için en zirvedeki bağlayıcı olarak kullanılmasının birçok nedeni vardır. Bunların başlıcaları; dayanım, dayanıklılık, ekonomik işlevsellik ve çok yönlülük özellikleri olarak sayılabilir. Bu avantajlı özelliklerinin yanında PC 'nin sahip olduğu bazı olumsuz özellikleri de vardır. Bunların en başında ise, atmosfere salınan çok yüksek oranlardaki karbondioksit (CO_2) gazı gelmektedir [4]. Çok uzun zamandan beri kullanılan PC, karbonatların ayrışmasından kaynaklanan en büyük emisyon kaynağıdır [5]. PC üretimi sırasında kalker ve kil karışımından oluşan hammadde çok yüksek sıcaklıklara ($1350\text{--}1450^\circ\text{C}$) kadar pişirilir ve bu işlem sonucunda klinker adı verilen ürün elde edilir. Klinker ise, çok az miktarda alçı taşı ile öğütülerek nihai bağlayıcı olan PC elde edilir [110]. 1 ton PC üretimi için yaklaşık 4.2 GJ enerji gerekirken ve 1 ton PC üretimi esnasında atmosfere yaklaşık 0.8 - 1.0 ton CO_2 gazı salınmaktadır [6]. Çimento üretiminin önemli aşamalarından olan kimyasal ve termal yanma süreçlerinin, yıllık küresel CO_2 emisyonlarının %8'ini oluşturmaktadır [7,8]. Ülkemizde de bu emisyon değerleri bakımından hiçte azımsanmayacak sonuçlar ortaya çıkmaktadır. 2018 yılında yayınlanan

bir rapora göre [2], PC üretiminden kaynaklı oluşan CO₂ emisyon salınımları dikkate alındığında Türkiye; Çin, Hindistan, AB ve ABD'den hemen sonra gelmektedir. Dünya genelinde bu emisyon probleminin artması sonucu koruyucu önlemler alma politikaları düşünülmeye başlanılmış ve bu konuda adımlar atılmaya başlanmıştır. 2018 yılında toplanan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı [9], bu konferansa çimento endüstrisi temsilcilerini davet etmiş ve bu konferans sonunda çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ salınımının 2030 yılına kadar en az %16 düşürülmesi gerektiği yönünde ortak karar alınmıştır.

PC' nin en büyük avantajları; ekonomik işlevselliği, basit ve kolay erişilebilir olması ve dayanıma verdiği olumlu katkı olarak sıralanabilir. Bu sebeplerden dolayı PC üretiminde açığa çıkan CO₂ emisyonu nedeniyle PC'den tamamen vazgeçmek şuanda çokta mümkün görünmemektedir. Tabi ki beton olmadan yapılar inşa edilebilir örneğin çelik, ahşap vs. kullanılabilir ama bu durum gerek ekonomik gerekse uygulanabilirlik açısından her zaman mümkün olmamaktadır. Ayrıca PC'nin kullanıldığı farklı uygulamalarda ve ortamlardaki eksikliklerinden de kaynaklanan bazı olumsuzluklar ile de karşılaşmıştır. Buna örnek verecek olursak; çok hızlı onarım imalatı yapılan bazı uygulamalarda PC'nin sağlayabileceğinden daha hızlı mukavemet kazancı istenebilir. Bazı durumlarda da, yüksek asit veya yüksek sülfat konsantrasyonundan kaynaklı farklı çevresel koşullar PC ile hazırlanmış betonun önemli ölçüde bozulmasına neden olabilir. İşte tüm bu gibi durumlar için PC' nin alternatifine ihtiyaç duyulmaktadır [7].

Özellikle son yıllarda birçok araştırmacı, PC'nin CO₂ emisyonu kaynaklı çevresel sorunları ve bazı durumlardaki dayanıklılık problemini düşürmek amacıyla PC kullanımını azaltmak yada PC yerine kullanılacak başka bir malzeme bulmak amacıyla alternatif bağlayıcı malzemeler üzerinde çalışmalar yapmıştır. Özellikle CO₂ emisyonunu düşürmek amacıyla yapılan arayışlarda farklı endüstrilerden sağlanan atık malzemelerin kullanılması düşünülmüştür. PC ile hazırlanan betonlarda halihazırda, kömür yanmasıyla açığa çıkan uçucu kül, demir-çelik fabrikalarının yüksek fırınlarında yan ürün olarak kalmış yüksek fırın cürufu (YFC) ve ferrosilikon üretiminden açığa çıkan silis dumanı gibi mineral katkı malzemeleri bulunmaktadır ama bu malzemeler PC' nin %10 ile %50 arasında değişen nispeten daha düşük bir oranına ikame etmektedirler. İşte bu oranın çok daha yüksek olması, tamamen yada çok yüksek oranlarda sadece atık malzemelerin

bağlayıcı olarak kullanılmak istenmesi nedeniyle yeni bir malzeme fikri üzerinde çalışmalar yapılmıştır [7,10] ki bu malzemeler alkali – aktif malzemeler (AAM) olarak karşımıza çıkmaktadır.

AAM üretmek için öncü malzemelerin uygun kür koşullarında alkaliler ile aktif hale getirilmesi gerekmektedir [11]. Bu öncü malzemeler amorf katı alüminosilikat esaslı malzeme (AEM) olarak da adlandırılır. AAM; AEM' nin bir alkali aktivatör ile reaksiyona girmesi sonucu oluşur. Öncelikle AEM, alkali aktivatörün etkisi ile silikat ve alüminat parçacıklarına ayrıştırılır. Daha sonra bu parçacıklar, bağlanma özellikleri olan ve üç boyutlu bir matris üretmek için yeniden bir araya gelir. AEM olarak kullanılan malzemeler genellikle farklı endüstriyel alanlardan elde edilmiş yan ürünler olan silis dumanı, uçucu kül ve YFC olarak sıralanabilir. AAM'ler, özellikle CO₂ emisyonu konusundaki çevresel faydaları ve kendisi ile üretilen betonlardaki iyi mekanik ve durabilite özelliklerinden dolayı da PC'ye alternatif malzeme olarak ön plana çıkmaktadır [7,12–14].

YFC, demir-çelik üretimi sırasında yüksek fırınlarda oluşan bir yan üründür. Avrupa Cüruf Derneği (Euroslag) tarafından 2014 yılında yayımlanan bir rapora göre, demir-çelik tesislerinden çıkan cürufun yalnızca %5'i çimento üretiminde kullanılmakta; %43'ü yol inşaatlarında değerlendirilmektedir. Ayrıca YFC'nin %13'ü nihai, %19'u ise içsel olarak depolanmaktadır. Bu veriler, YFC'nin çimento endüstrisindeki kullanım oranının oldukça düşük seviyelerde kaldığını göstermektedir. YFC'nin, PC içermeyen yada %30'dan düşük oranlarda PC ile birlikte AAM sistemlerinde kullanılması sayesinde hem çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonu azaltılmakta hem de YFC için yeni bir kullanım alanı yaratılmaktadır. YFC'yi aktive etmek amacıyla genellikle sodyum silikat (Na₂SiO₃), sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum karbonat (Na₂CO₃) gibi alkali çözeltiler kullanılmaktadır. Bu alkali aktivasyon reaksiyonları sonucunda, PC hidratasyonu ile benzer yapıdaki C-S-H jeline ek olarak, düşük oranda Al içeren C-A-S-H jeli oluşmaktadır. Su ile tek başına düşük bağlayıcılık gösteren YFC, alkali aktivasyon sonrası daha hızlı reaksiyona girerek erken priz alır. Bu da, erken yaş dayanımının önemli olduğu uygulamalarda avantaj sağlamaktadır.

Özellikle soğuk havalarda, gerekli önlemler alınmadan ve yalnızca PC ile hazırlanan betonlar istenilen dayanım değerlerine ulaşmamaktadır [15]. 5°C'nin altında hidrasyon reaksiyonu gecikmekte ve bu da betonda daha yavaş bir dayanım artışına yol açmaktadır. [16]. Alkali - aktif cüruf (AAC) yapısındaki yüksek miktardaki alkali bileşenler, AAM'lerin donma noktasını düşürmüş ve hidrasyon için gerekli koşulları sağlamıştır [17]. Ju ve arkadaşlarının yaptığı bu çalışmada, AAC' nin tek başına 0°C'nin altındaki sıcaklıklarda yeterli mekanik özellikleri göstermeyebileceği ve bu nedenle kalsiyum kaynağı bakımından zengin PC'nin AAC' ye eklenmesi önerilmiştir. Düşük sıcaklık ortamlarında, AAC sistemine uygun miktarda ve kalsiyumca zengin malzeme eklenmesinin, erken yaş mukavemetinde belirgin bir artış sağladığı belirtilmiştir [18]. Bu nedenle, düşük sıcaklıklarda PC ve AAC oranlarının dengeli seçilmesiyle dayanımı olumsuz etkilemeyen beton karışımları elde etmek mümkündür. Angulo-Ramirez vd. yaptığı bir çalışmada, %80 YFC ve %20 PC içeren karışımların sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) aktivatörleriyle aktive edildiğinde, %100 PC'den üretilen referans karışıma kıyasla daha üstün mekanik özellikler gösterdiği raporlanmıştır [19]. Aydın vd. yaptığı bir çalışmada [20], YFC'nin yüksek sıcaklık kürüne gerek olmadan iyi mekanik performans sergilediği ve PC'ye alternatif olarak değerlendirilebileceği ifade edilmiştir.

Bu tez çalışmasında, belirli oranlarda PC ile ikame edilen YFC kullanılarak AAC karışımları hazırlanacaktır. Düşük sıcaklıkta (2 °C) kürlenene bu karışımlarda, farklı PC ikame oranları ile değişen alkali modülü ve alkali dozajlarının basınç dayanımı üzerindeki etkisi araştırılarak en uygun karışım oranları tespit edilmeye çalışılacaktır. Üretilen numuneler, testlerin uygulanacağı güne kadar 2 °C'de muhafaza edilecektir. Hazırlanan numunelerde priz süresi, basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı (UGH), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) analizleri gerçekleştirilecektir. Böylece mikroyapısal özellikler ile mekanik performanstaki değişimler kapsamlı şekilde incelenecektir.

2. ALKALİ-AKTİF MALZEMELER

Betonun inşaat yapım süreçlerinde yaygın olarak kullanıldığı göz önüne alındığında, büyük metrajlı beton oluşumları için gereken yüksek orandaki çimento üretimi, önemli çevresel sorunlara yol açmaktadır. Küresel ölçekte PC üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonu insan kaynaklı emisyonların yaklaşık %8'ini oluşturmaktadır [21,22]. Gelişmekte olan ülkelerin altyapı ihtiyaçlarını karşılamak için giderek artan miktarlarda beton üretimi gerçekleşmektedir. PC üretiminden kaynaklanan yüksek emisyon oranları nedeniyle araştırmacılar alternatif bağlayıcı malzemelerin bulunması ve geliştirilmesi noktasında bir arayışına girmiştir [23]. Dünya atmosferine ve denizlerine aşırı zarar vermeden milyarlarca insanın konut ve altyapı ihtiyacını sağlayacak, Geopolimer [24,25] olarak sınıflandırılanlar da dahil olmak üzere AAM'ler [26], inşaat sektöründe çevre tasarrufu sağlamaya yönelik bir bakış açısıyla şu anda tartışılan ve geliştirilen alternatif bağlayıcıların yüksek profilli bir örneğidir.

Yeterli düzeyde dayanım ve dayanıklılık özelliklerine sahip olmalarının yanı sıra çevresel açıdan önemli avantajlar sunan AAM, tüm bu özellikleri sayesinde PC'ye alternatif bağlayıcı sistemler olarak öne çıkmaktadır. AAM'ler, bir veya birden fazla AEM ile alkali aktivatörlerin kimyasal reaksiyona girmesi sonucu oluşur. Sürecin ilk aşamasında AEM, alkali aktivatörün etkisiyle silikat ve alüminat yapı taşlarına ayrışır. Daha sonra bu yapı taşları, bağlayıcı özelliğe sahip amorf ve üç boyutlu bir matris oluşturmak üzere yeniden birleşir. AEM olarak kullanılan başlıca malzemeler arasında silis dumanı, uçucu kül ve YFC gibi çeşitli endüstriyel yan ürünler yer almaktadır. [5,27–29].

2.1. Tarihsel Gelişimi

Çimentoda alkalilerin kullanılmasına yönelik ilk girişimler, Alman Kimyager H. Kuehl tarafından 1908 yılında yapılan çalışma ile gerçekleştirilmiştir [30]. Bu çalışmada; bağlayıcı malzeme üretimi için cüruf, sodyum sülfat/karbonat, kireç ve su ile karıştırılmıştır. Chassevent [31] ve R. Feret [32] daha sonra cürufu bir çimento bileşeni olarak incelemenin gerekliliğini tanımlamışlardır. Purdon ise, [33] cürufların, birbirinden

farklı kimyasal aktivatörlerle oluşturdıkları reaksiyonları detaylandıran ayrıntılı bir çalışma yayımlamıştır. Bu çalışmalarda sonucu üretilen çimento türü daha sonra "Purdocement" ismi verilerek ticari bir ürüne dönüştürülmüştür. . Buchwald vd. [34] tarafından 2015 yılında hazırlanan bir çalışmada 1950'li yıllarda Purdocement kullanılarak inşa edilen yapılar incelenmiş ve bu yapıların kendi hizmet ömürleri açısından amacına uygun bir şekilde varlıklarını sürdürdükleri görülmüştür. Takip eden yıllarda AAM alanındaki önemli araştırmalar ilk olarak Glukhovsky [10], ardından ise Krivenko'nun [35] öncülük ettiği Ukraynalı bir araştırma grubundan gelmiştir. Şekil 2.1'de AAM kullanılarak üretilen beton ile inşaatı gerçekleştirilen dönemin Sovyetler Birliği'nde ikame eden 20 katlı bir bina gösterilmiştir. Bu yapının dış duvarı yerinde döküm olarak hazırlanmış AAM betonu iken kat tabliyeleri, merdiven ve sahanlıklar ile diğer kısımlar ise prefabrik AAM betondur [36].



Şekil 2.1. Lipetsk, Rusya'da bulunan ve AAM kullanılarak inşa edilen 20 katlı bina [36]

Şekil 2.2'de ise AAM kullanılarak üretilen beton ile inşa edilmiş Mariupo, Ukrayna'da bulunan 9 katlı binalar gösterilmiştir.



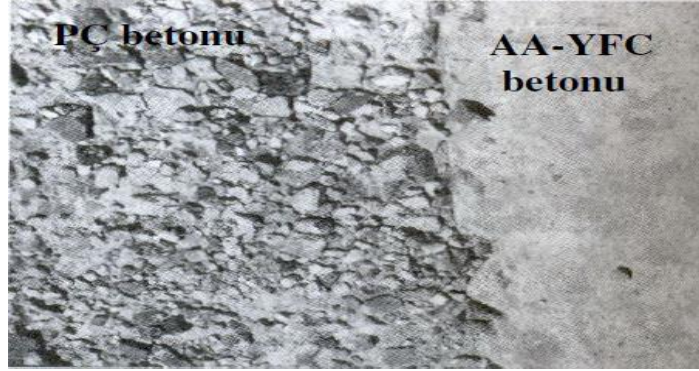
Şekil 2.2. Mariupol, Ukrayna’da bulunan ve AAM kullanılarak inşa edilen 9 katlı bina [36]

Konut inşaatlarına ek olarak AAM’ler daha farklı yapım uygulamalarında da kullanılmış ve onlarca yıl boyunca gayet iyi ve güvenli bir hizmet performansı vermiştir. Seneler 1984’ü gösterdiğinde; Magnitogorsk, Rusya’da YFC’nin alkali aktivatörler aracılığı ile aktif hale getirilmesi sonucu üretilen beton kullanılarak iki adet yol yapılmıştır. Üretilen betonlar taşıma ile uygulama ve döküm alanına getirilmiş ve beton o yörenin doğal iklim koşullarında sertleşerek prizini almıştır. Uygulanan betonun basınç ve tasarım dayanımı başta 30 MPa iken, 16 yıl sonra yapılan kontrollerde bu dayanım 86 MPa değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir. 1984 ile 1990 yılları arasına gelindiğinde ise Ternopol, Rusya’da; yine AAM kullanılarak üretilen beton ile inşaatı gerçekleştirilen yol Şekil 2.3’te gösterilmiştir. Bu yolun inşa tarihinin üzerinden yaklaşık 25 yıl geçtikten sonra incelenen ve fotoğraflanan yolun hiçbir deformasyona uğramadığı görülmektedir [12].



Şekil 2.3. AAM kullanılarak üretilen beton ile inşa edilen yol [12]

Seneler 1999 yılını gösterdiğinde ise; aynı bölgede PC betonu kullanılarak inşa edilen yolun AAC betonu ile üretilen yol ile karşılaştırılması yapılan fotoğraf Şekil 2.4'te gösterilmiştir. AAC betonu çok daha iyi durumdayken, PC betonunun ciddi ddeformasyona uğradığı görülmektedir [12].



Şekil 2.4. PC betonu ve AAC betonu ile imal edilen yollar [12]

2.2. Alkali – Aktif Malzemelerin Bileşenleri

Portland çimentosuna önemli bir alternatif olarak öngörülen AAM'ler; temel olarak, öncü bileşen olarak bir AEM'den ve alkali özellikli bir aktivatörden oluşmaktadır. Alt başlıklar altında AAM üretiminde kullanılan bileşenler detaylı bir şekilde tanıtılmıştır.

2.2.1. Öncü Malzemeler

PC'yi belirli bir oranda ikame eden puzolanik malzemelerin birçoğu AAM üretiminde öncü malzeme olarak kullanılmaktadır. Bir malzemenin puzolanik malzeme olarak kullanılabilmesi sahip olması gereken temel özellikler arasında reaktif silika ve alümina içeriğinin yeterli olması, amorf yapıda olması ve ince taneli olması gösterilebilir [37]. Çeşitli araştırmacılar tarafından AAM üretiminde kullanılan öncü malzemeler aşağıdaki gibidir [37].

- Yüksek fırın cürufu
- Uçucu küller
- Uçucu kül ve cüruf karışımları

- Uçucu kül ve metakaolin karışımları
- Cüruf ve metakaolin karışımları
- Cüruf ve kırmızı çamur karışımları
- Metakaolin
- Uçucu kül ve kaolin ve stilbit
- Kaolinitik killer gibi kalsine edilmemiş tüm malzemelerin karışımlarıdır

2.2.2. Alkali Aktivatörler

Alkali-aktif malzemeler endüstriyel yan/atık ürünlerden veya doğal malzemeler kullanılarak üretilen amorf veya yarı-kristalin yapılı inorganik polimerlerdir. Bu malzemelerin üretiminde kullanılan alkali aktivatörler, alkali aktivasyon işlemini başlatmak ve malzemenin sertleşmesini sağlamak için elzemdir. Alkali aktivatörler, AEM esaslı malzemelerin çözülmesine ve yeniden düzenlemesine yardımcı olarak sertleşmiş ve dayanıklı bir yapı oluşmasını sağlar [38]. Bazı alkali aktivatör çeşitleri aşağıda sıralanmıştır [38].

Sodyum hidroksit (NaOH): En yaygın olarak kullanılan alkali aktivatörler arasında gösterilir. Sahip olduğu yüksek alkalinite sebebiyle AEM'lerin çözülmesinde etkili rol oynar.

Potasyum hidroksit (KOH): Sodyum hidroksite benzer şekilde kullanılır, AEM çözülmesini hızlandırırsa da maliyeti nedeniyle kullanımı NaOH'un gerisinde kalmıştır.

Sodyum silikat (Na_2SiO_3): Genellikle NaOH ile birlikte farklı oranlarda karıştırılarak kullanılmaktadır. Reaksiyon ortamının silika içeriğini artırarak daha güçlü jel oluşumu, dolayısıyla daha iyi bir mekanik yapı oluşmasına katkıda bulunur.

Potasyum silikat (K_2SiO_3): Sodyum silikatın alternatifi olarak kullanılan bu aktivatör daha düşük çözünürlük sıcaklığına sahip olması dolayısıyla bazı uygulamalarda değerli olabilir.

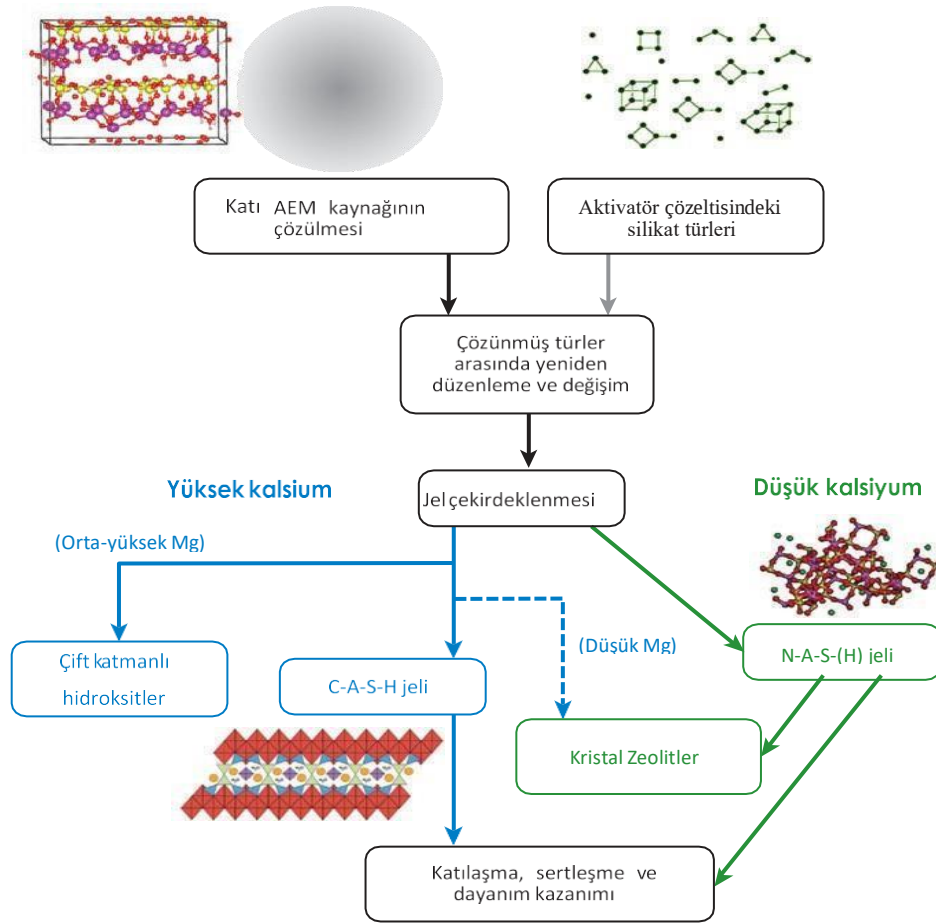
Sodyum karbonat (Na_2CO_3): Daha düşük bir alkaliniteye sahiptir. daha yüksek alkaliniteye sahip alkali aktivatörler ile karıştırılarak kullanılabilir.

Sodyum metasilikat ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$): Bir başka sodyum bazlı alkali aktivatördür olan bu metasilikat özellikle daha yüksek çözünürlük sağlayan formlara sahiptir.

2.3. Alkali-Aktif Malzeme Çeşitleri

AAM'lerin içeriği ve yapısı incelendiğinde ilk olarak bu sistemleri; meydana getiren yapıya hakim olan jel türlerine göre ayırt etmek gerekir. Söz konusu sınıflandırma Şekil 2.5'de gösterildiği üzere ilgili sistemde bulunan kalsiyum içeriği esas alınarak yapılır. Şekil 2.5'in [39] sağ tarafında kalsiyum yönünden fakir olan jeller gösterilmektedir. İlgili jel yapıları çoğunlukla N-A-S-(H) olarak ifade edilir. Ama bununla birlikte, potasyum; sodyum veya kalsiyum ile değişebilir. Bahsedilen tüm bu nedenlerden ötürü daha eksiksiz bir gösterim için N, K-(C)-A-S-(H) tercih edilebilir. Şekil 2.5'in sağ kısmındaki bölümde suyun, C-A-S-H jelinin tersine, ilgili jel yapısının önemli bir yapısal bileşeni olmadığını vurgulamak istendiğinden H parantez içerisine alınarak gösterilmiştir. SiO_2 'yi göstermek amacıyla S, Al_2O_3 için A, CaO için C, Na_2O için N, K_2O için K ve H_2O için H kısaltmaları kullanılmıştır.

İlgili jel içeriğinde potansiyel olarak bulunmayan, opsiyonel yada küçük bileşenler parantez içerisine alınarak gösterilmektedir. Bu semboller arasında bulunan kısa çizgiler, stokiyometrik olmayan bileşikler gösterir. C-A-S-H, stokiyometrik olmayan kalsiyum silikat hidratı gösterirken, CH (kısa çizgi olmadan) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in (portlandit) stokiyometrik olarak daha uygun bir gösterimi olmuştur. C-A-S-H özelliğindeki jeller, alüminyumun içeriklerinde oynadığı önemli rolü vurgulamak için paranteze alınmadan gösterilmektedir [39,40].



Şekil 2.5. AEM'nin kıatı bir fazda oluşan alkali-aktivasyon süreci ve tepkime ürünleri [39]

2.3.1. Düşük Kalsiyum İçeren Bağlayıcıların Jel Yapısı

Düşük miktarda kalsiyum içeren alkali ile aktifleştirilmiş bu sistemlerde bulunan temel bağlayıcı; yapısal olarak oldukça düzensiz ve fazla miktarda çapraz bağlı bir alüminosilikat jeldir [41]. Yukarıda şekil 2.5’de gösterilen ve şeklinin sağ tarafında bulunan N-A-S-(H) ürünü bu özellikteki yapılaradır örnekler. Düşük kalsiyumlu bu sistemlerin tepkimelerini başlatmak için yüksek alkali ortam ile 60 °C - 200 °C arasında kür sıcaklığı gibi sert çalışma koşulları gereklidir. Metakaolin ve uçucu kül, alkali ile aktifleştirilmiş çimentoda en fazla kullanılan düşük kalsiyumlu öncü malzemelerdir [36]. Fernandez-Jimenez ve Palomo [42,43], F sınıfı uçucu külün AAM üretimi için gerekli olan şartların, aşağıda belirtilen düzeyler arasında olması gerektiğini belirtmiştir.

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

Fernandez-Jimenez vd. [44], N-A-S-(H) jel oluşumunu kapsamlı bir yapısal model geliştirerek açıklamıştır. Alüminosilikat kaynağı alkali çözelti ile temas ettiğinde, ilk önce alümin ve silis monomerleri olmak üzere farklı türlerde çözünür. Bu monomerler, dimerler oluşturmak amacıyla reaksiyona girerler, bunlarda öteki monomerler ile reaksiyona girerek trimerler, tetramerler vb. yapıları meydana getirirler. Söz konusu çözelti doygun duruma geldiğinde, Al içeriği olarak zengin, yarı kararlı bir N-A-S-(H) jeli bir ara tepkime ürünü olarak çöker. Bu oluşum tepkimelerinin ilk anlarında alkali ortamda yüksek Al^{3+} iyon muhtevası ile açıklanabilir. Bunun nedeni, Al-O bağları, Si-O bağlarına göre daha zayıf olduğundan dolayı reaktif alüminyumun, silise göre daha hızlı çözülmesidir. Bu tepkime zamanla ilerledikçe, asıl alüminosilikat kaynağındaki Si - O grubu daha yüksek oranda çözülür ve tepkime ortamındaki silikon konsantrasyonunu ve N-A-S-(H) jelindeki oranını yükseltir. Bu işlevsel ve yapısal düzenleme, reaksiyonlar sonucu oluşan çimentonun çok sayıda fiziksel özelliğinin geliştirilmesinde ve ilerletilmesinde etkili olan polimerin en son halinin bileşimini, mikro gözenek yapısını ve malzemedeki dağılımını belirler. Değişik araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar [45–47], aktivatör tipinin ve kür sıcaklığının ilgili tepkime kinetiğini etkilediğini, kür sıcaklığının artmasıyla tepkime derecesinde arttığını göstermiştir. Düşük kalsiyum muhteva eden alüminosilikat esaslı malzemelerin aktive edilmesinde ortaya çıkan ürünlerin doğası, sıcaklığına ve kür süresine bağlı olarak değişir. Uzun süreler ile kürleme yapıldığında, silis bakımından oldukça zengin ürünlerin oluşumu sağlayarak dayanımın gelişmesine katkıda bulunur [13,26].

2.3.2. Yüksek Kalsiyum İçeren Bağlayıcıların Jel Yapısı

Alkali ile aktifleşen bağlayıcı malzemelerin kimyası ve iç yapısı incelenirken, ilk olarak bu sistemleri, yapıya hakim olan jel çeşitlerine göre sınıflandırmak önemlidir. Bu sınıflandırma esas olarak şekil 2.5’de gösterildiği gibi sistemdeki kalsiyum içeriği temel alınarak yapılır [39]. Bu bağlayıcı sistemler, yüksek silis ve kalsiyum içeren malzemelerin aktivasyonu olarak tanımlanır [36]. Kalsiyum miktarı yüksek olan bağlayıcıların $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ oranı yaklaşık olarak 1’dir [39]. Yüksek kalsiyum içeren bu sistemlerin ön önemli ve genel olarak kullanılan örneği YFC’nin ($\text{SiO}_2+\text{CaO}>\% 70$) orta alkali standartlar altındaki aktivasyonudur. Böyle bir durumda ana tepkime ürünü, PC hidratasyonu sırasında ortaya çıkan jelin özelliklerine benzer bir C-S-H jeli ve içerisinde az miktarda bir Al yüzdesini barındıran C-A-S-H jelidir [36]. Fazlasıyla katı ve sert bir bağlayıcı malzeme oluşturmak amacıyla su ile çok yavaş bir şekilde tepkimeye giren YFC, alkali aktivatörler aracılığı ile tepkimesini hızlandırarak birkaç saat içerisinde sertleşip mukavamet kazanır. Bu hızlanan süreç, özellikle inşaat malzemelerinde istenilen ve gerekli olan erken yaş dayanımını kazanma yönünden büyük önem taşımaktadır [39].

3. SOĞUK HAVA ŞARTLARINA ELVERİŞLİ BİR BAĞLAYICI ALKALİ-AKTİF CÜRUF

Amerikan Beton Enstitüsü'ne göre soğuk hava; hava sıcaklığının üst üste üç gün ve daha fazla süre ile 4°C'nin altında kaldığı ve bu sıcaklık değerinin 12 saat süre ile 10°C'yi aşmadığı dönem olarak tanımlanır [48]. Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınan bilgiye göre [49], 2022 yılında, dört ay boyunca ortalama sıcaklık 8°C ve altında kalmıştır Rusya, Çin, İskandinavya ve Kanada gibi topraklarının büyük bir bölümü soğuk iklimlerde kalan ülkelerde yılın önemli bir bölümünde soğuk hava koşullarının etkisi yaşanmaktadır [50]. Küresel kentleşme ve altyapı gelişimi sürekli olarak artmaktadır. Ancak iklime bağlı olarak bazı lokasyonlarda soğuk hava nedeniyle inşaat sezonu önemli ve büyük ölçüde kısıtlanmakta ve dolayısı ile bu durum, beton kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Tüm bu nedenlerin sonucu; olarak böyle alanlardaki altyapı çalışmaları ve inşaat projeleri olumsuz etkilenmektedir [51].

PC, teknik avantajları sebebiyle inşaatların yapımında kullanılan betonlarda baskın bağlayıcı malzeme olarak ortaya çıkmıştır [7]. Bu avantajların gerçekleşebilmesi için, kürlenme sıcaklığının en uygun değerlerde olması gerekmektedir [52–54]. PC'nin hidratasyon oranının kür sıcaklığının artmasıyla arttığı kabul edilmektedir [55,56]. Tam tersi durumda, düşük kürlenme sıcaklıkları çimento parçacıklarının çözünme hızını azaltması ve hidratasyon prosesinde yer alan kimyasal reaksiyonun görünür aktivasyon enerjisini arttırması nedeniyle, hidratasyon hızı üzerindeki etkileri yavaşlatır [51,57,58]. PC için en uygun ve verimli kür koşulları 10°C ile 20°C arasında ve %80 bağıl nem seviyelerindedir [59]. PC hidratasyonunun normal akışında devam edebilmesi için sıcaklığın 5°C'nin altına düşmemesi gerekir [48]. Sıcaklıkların 5°C'nin altına düştüğü durumlarda PC'nin hidratasyonu gecikir, 0°C'nin altına düştüğü durumlarda ise, beton erken don hasarına karşı çok daha hassas bir duruma gelir [60]. Donma hasarından kaynaklanan gerilme, betonun çekme dayanım değerini aştığında ise betonda çatlaklar oluşur ve bu durumda, betondaki mikro yapının bozulmasına neden olur [16,61]. Söz konusu çatlaklar betonun dayanıklılığını ve mukavemetini önemli ölçüde ve olumsuz

yönde etkiler [60]. Bu konu ile ilgili yapılan bir çalışma [62], -5 °C'de kürlenene normal bir PC betonunun 28 günlük dayanımının, normal sıcaklıktaki küremeye tabi tutulan numunelerle karşılaştırıldığında kabaca %80 daha düşük olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu duruma ek olarak; 0°C, 5 °C ve 10 °C'de küreme işlemleri gerçekleştirilen numunelerde sırasıyla %50, %38 ve %30'luk mukavemet kayıpları yaşanmıştır. PC parçacıklarının daha yavaş çözünmesi ve hidrasyon reaksiyonlarının normalinden daha fazla gecikmesi nedeniyle soğuk hava koşullarında betonun priz süresinin uzaması, PC'nin kış koşullarında uygun önlemler alınmadan kullanılmasında birçok zorluğu beraberinde getirmiştir [63–65]. ACI [48] soğuk hava şartlarında beton dökümü gerçekleştirebilmek bazı farklı seçenekler sunar. Bunlardan en yaygın olanı; düzenli bir karışımın kullanılmasını, bu karışımın inşaat alanına sıcak bir şekilde transferi için ısıtılmasını, alt tabakanın çözülmesini ve kürlenene betonun yalıtım veya ısıtılmış muhafazalarla korunması işlemlerini kapsar. ACI, erken dönemde mukavemet kazanımını hızlandırmak için ekstra çimento eklenmesini, yüksek değerde çimento kullanılmasını veya prizlenmeyi hızlandıran bir katkı kullanılmasını önerir. Bunların dışında soğuk hava şartlarında PC ikameli beton dökümü için daha farklı seçeneklerde mevcuttur. Sıcak bir baraka/kulübe inşa etmek ve izolasyon malzemeleri kullanmak gibi koruyucu önlemlerin uygulanması, normal ve akışında hidrasyonu sağlamanın etkili ve sağlam yolları olabilir [66]. Ancak bu fazladan ve karmaşık işlemler proje maliyetlerini önemli ölçüde artırmaktadır [15].

Etkili yaklaşımlardan biri de betonun ideal kürlenme sıcaklığında tutulmasıdır. Soğuk havaya karşı istenilen optimum direnci sağlamak amacıyla, kış mevsiminde gerçekleştirilen inşaat sırasında karıştırma ve dökümden önce hammaddelerin ısıtılması gerekir [67].

Betonda istenen özelliklere ulaşana kadar uygun ve optimum ortam sıcaklığını sağlamak ve korumak için sıcak bir baraka inşa etmek ve elektrikli battaniye kullanmak gibi yöntemler fazlasıyla kullanılmaktadır [68]. Ancak bu sıcaklık koruma yöntemleri önemli miktarda enerji tüketir ve büyük miktarda CO₂ salınımı ve emisyonlara neden olur [67]. Tüm bu önlemler 10°C'lik sıcaklık düşüşünü etkili bir şekilde telafi eder [69]. Literatür, PC'nin soğuk havalarda herhangi bir koruyucu önlem alınmadan kullanılmasının uygun olmadığını ancak bu önleyici tedbirlerin uygulanmasının da zorlu, maliyetli ve fazla

enerji tüketen seçenekler olduğunu bizlere göstermektedir [70–72]. Sülfoalüminat içeren çimentolar ve magnezyum içeren çimento bağlayıcıları düşük sıcaklıklarda iyi performans gösteririr. Ancak bu çimentoların kullanımları genellikle onarım işleriyle sınırlıdır. Yüksek maliyetler ve alüminyum gibi nispeten zor ulaşılabilen hammadde kaynakları nedeniyle büyük ölçekli altyapı inşaatı için ideal değildirler [67,73,74]. Bir alkali aktivator ile , herhangi bir alüminosilikat öncü malzemesi (GBFS, FA, SF vb.) arasında gerçekleşen reaksiyon sonucu üretilen AAM'ler; standart ve geleneksel bir çimento bağlayıcısı ile karşılaştırılabilir özellikler sergiler [39]. Alkali aktivatörlerin en fazla kullanılan bileşikleri MOH ve $M_2O \cdot nSiO_2$ 'dir; burada M; Na veya K'yi temsil eder [10]. Düşük CaO miktarı içeren uçucu kül gibi öncü malzemelerin; alkali aktivasyon prosesinde, 60 °C ile 200 °C değerleri arasında değişen bir kürleme sıcaklıklarının olması gerekmektedir [36]. Düşük miktarda CaO içeren sistemlerde, başlangıç kürleme sıcaklığının olmaması, sınırlı bir reaksiyon oluşturarak zayıf mekanik performanslara neden olur [75,76]. AAC, yüksek kalsiyum içeren bir malzeme olması ve dışarıdan herhangi bir sıcaklık işlemi gerektirmeksizin üstün bir mekanik performans sergiler [36,77]. AAC betonu normal ortam koşullarında 60 MPa–150 MPa basınç dayanımına ulaşabilir [78]. Son zamanlarda yapılan araştırmalar [17,60,67] AAC'nin; kürleme işleminin düşük sıcaklıklarda gerçekleştirildiğinde bile kabul edilebilir, tatmin edici bir mekanik performans sergilediğini göstermektedir. Xiang vd. yaptığı başka bir araştırmada; AAC'nin düşük sıcaklıkta kürleme işleminin gerçekleştirilmesinin, depolimerizasyon sürecini kolaylaştırdığı ve AAC'nin polikondensasyonunu engellediğini bulunmuştur [79]. Ayrıca alkali aktivatörün yapısında bulunan yüksek miktardaki alkali bileşenler, AAM'lerin donma noktasını düşürür ve hidratasyon için gerekli koşulları sağlar [17]. Zhang vd. [67], cürufl bazlı AAM'lerin donma noktasının; donma noktası -4,8 °C olan PC hamurundan önemli ölçüde daha düşük olduğunu gözlemlemiştir. Ju vd. [15], 0°C'de kürleme işlemi gerçekleştirilen ve sodyum silikat yada potasyum silikat ile aktive edilen AAC harcının 28 günlük basınç dayanımını yaklaşık 40 MPa olarak bildirmiştir. Aynı araştırma grubu tarafından yürütülen bir başka çalışmada [17], AAC'nin 0°C'nin altındaki sıcaklıklarda yeterli mekanik performans gösteremeyebileceği ve bu nedenle kalsiyum kaynaklarının AAC'ye dahil edilmesi önerilmiştir. Yang vd. [18], sıcaklığın düşük olduğu bir ortamda, AAC sistemine uygun miktarda ve kalsiyum içeriği olarak zengin malzeme eklenmesinin, erken yaş mukavemetinde önemli bir iyileşmeye yol açtığını ileri sürmüştür.

4. KAYNAK ÖZETLERİ

Literatürde, AAC ve PC kullanılarak, farklı sıcaklıklarda ve çeşitli aktivatör türleri ile değişen miktarlarda hazırlanan çok sayıda karışım kompozisyonuna yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, elde edilen numunelerin mekanik özellikleri, priz süreleri ve hidratasyon davranışları (ısı gelişimi) detaylı şekilde incelenmiştir.

4.1. Mekanik Özellikler

Düşük CaO'lu sistemlerin aksine, AAC; fırında sertleştirme sıcaklığına maruz kalmaya gerek kalmadan sertleşmeye uğrar. Ayrıca, düşük kürleme sıcaklıklarında çeşitli malzemelerin ikamesi yoluyla veya yalnızca cüruf kullanılarak üretilen AAC davranışı üzerine birçok araştırma yapılmıştır.

Ya-min vd. [80] (7 °C ve 15 °C) altındaki veya normale yakın (20 °C ve 30 °C) sıcaklıklarda kürlenmiş AAC harçlarının özelliklerini araştırmıştır. Kullanılan alkali aktivatör, modülü 1.42 olan sodyum silikat olarak seçilmiş ve kullanılan öncü malzeme, YFC olarak alınmıştır. Harç numuneleri belirlenen test günlerine kadar belirlenen sıcaklık değerlerinde muhafaza edilmiştir. 7 °C'de kürlenmiş harç numunesinin erken yaş basınç dayanımı, daha yüksek sıcaklıklarda kürlenmişlere göre önemli ölçüde düşük kalmıştır. Ancak 7 °C'de kürlenmiş numunenin 28 günlük basınç dayanımı 62,3 MPa'ya yükselmiştir. 90 günün sonunda gücü 65 MPa'yı aşmıştır. Özellikle, en düşük kürleme sıcaklığı olan 7 °C'deki basınç mukavemeti, en yüksek kürleme sıcaklığı olan 30 °C'de elde edilen mukavemetten yalnızca 11 MPa daha düşük kalmıştır. Veriler, normal sıcaklıklarda kürlenmiş harç numunelerinin basınç dayanımında orta düzeyde bir artış olduğunu gösterirken; kürleme sıcaklığı düşürüldüğünde, 90 günlük sonuçlar incelendiğinde kayda değer bir dayanım artışı gözlemlenmiştir. Normal sıcaklıklarda kürlenmiş numunelerdeki ılımlı artış oranı, hızlı erken hidratasyon reaksiyonuna ve cürufun etrafında iyonların göç hızını azaltan yoğun bir hidratasyon ürünleri tabakasının oluşmasına bağlanabilir [60,81]. Uzatılmış kürleme süresiyle, 7°C ve 30°C'de kürlenmiş numunelerin mukavemetlerinin daha da yaklaşması beklenmiştir. 7 °C'de 90 gün

kürlenen numuneler en yüksek eğilme mukavemetine sahip numuneler olarak görülmüştür. Yüksek sıcaklıklar, kimyasal büzülmenin neden olduğu mikro çatlaklara atfedilen basınç dayanımı artışına rağmen eğilme dayanımının azalmasına neden olmuştur. Benzer koşullarda AAC ve PC performanslarının karşılaştırdıkları çalışmada, 5°C'de birkaç hafta kürlenen AAC harçlarının, standart sıcaklıklarda kürlenen PC harçlarına benzer dayanımlar sergilediği sonuçlarına ulaşılmıştır [82]. Yang liderliğindeki bir araştırma ekibi, sıcaklıkların zaman zaman 5°C'nin altına düştüğü Çin'deki bir binada sahada dökülen AAC betonunun yapısal uygulaması üzerine önemli bir çalışma yürütmüştür. Basınç dayanımı testinin prosedürü şu şekilde planlanmıştır: Başlangıçta AAC karışımları 10 cm'lik küpler halinde dökülmüş ve saha koşullarına tabi tutulmuştur. Daha sonra numunelerin bir kısmı 28. güne kadar sahada bekletilirken, kontrol grubuna ise standart kür şartı uygulanmıştır. Saha şartlarında tutulan numunenin basınç dayanımının düşük olmasına rağmen yine de hedeflenen C40 beton sınıfı şartlarını karşıladığı sonucuna varılmıştır [83]. Araştırmacılar, tatmin edici mekanik özelliklerin yanı sıra, AAC betonu ile PC betonu arasındaki inşaat prosedürlerindeki farkların, su yerine alkalin bir çözeltinin kullanılması ve maliyetlerinde ki değişkenler olduğunu belirtmişlerdir. Çünkü bu iki beton türü karşılaştırılabilir. Ju vd. yaptığı bir çalışmada [17], 5 °C'de kürlenen bir harç numunesinin 28 gün sonra yaklaşık 75 MPa'lık bir basınç dayanımına ulaştığını gözlemlemiştir. Ayrıca birinci ve yedinci günde harç numuneleri sırasıyla 23 MPa ve 47 MPa civarında dayanıma ulaştığını saptamıştır. Literatür incelemeleri, AAC numunelerinin, normalin altındaki sıcaklıklarda kürlendiğinde, aktivatörlerin ve karışım oranlarının uygun şekilde belirlenmesi koşuluyla, katkı maddelerine ihtiyaç duymadan gerekli erken mukavemete ve tatmin edici nihai basınç mukavemetine ulaşabileceğini göstermiştir.

AAC üretiminin, dayanım kazanma oranı ve sıfırın altındaki sıcaklıklarda tatmin edici basınç dayanımı elde etme açısından zorluklar yaratacağını tahmin etmek oldukça mantıklıdır.

Hongen vd. [60], -10 °C'de kürlendiğinde alkaliyle aktifleştirilen cüruf pastalarının mukavemet gelişimini araştırmak için bir çalışma yürütmüştür. Aktivatör olarak, modülü 3.3 olan bir sodyum metasilikat (Na_2SiO_3) ve molaritesi 8 ila 12 arasında değişen bir sodyum hidroksit çözeltisi karışımı kullanılmıştır. 28 gün boyunca sıfırın altındaki

sıcaklıklarda kürlenene numunelerin basınç dayanımları, NaOH molaritelerindeki artışla birlikte gözle görülür bir artış eğilimi sergilemiş, NaOH molaritesi 12 olan macun numunesi, 30,7 MPa'lık bir basınç dayanımına ulaşmıştır. Araştırmacılar, -10 °C'de kürlenene AAC mukavemet gelişiminin, normal sıcaklıkta kürlenene kıyasla daha düşük olduğunu kaydetmişlerdir. Ancak 28 gün sonunda en yüksek mukavemeti gösteren numunenin hiçbir katkı maddesi kullanılmadan -10 °C'de dahi ilk üç gün içerisinde mukavemetinin %38'ine ulaşması dikkat çekmiştir. Ju ve arkadaşları [17], sıfırın altındaki sıcaklıklarda AAC performansını artırmak için bir CaO kaynağının dahil edilmesini önermiştir. Bu ilave, Ca^{2+} C-(A)-SH'nin sisteme dahil edilmesini artırarak mekanik özellikleri iyileştirmiş, Ayrıca CaO ve su arasındaki ekzotermik kimyasal reaksiyon yoluyla sıcaklık artışı kolaylaştırmıştır. Ju vd. tarafından yapılan bir çalışmada [15], sıfırın altındaki sıcaklıklarda kalsiyum oksidin (CaO), AAC özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. AAC'de öğütülmüş YFC için kısmi ikame olarak çeşitli oranlarda CaO (ağırlıkça %1, ağırlıkça %2, ağırlıkça %3 ve ağırlıkça %4) kullanılmaya başlanmıştır. Potasyum silikat ve potasyum hidroksit, 1.4'lük bir aktivatör modülü ve %13'lük bir alkali dozajı ile aktivatör olarak görev yapmıştır. Numuneler hazırlama sırasında -10 °C'de tutulmuştur. Geliştirilmiş hidrasyon ısısal salınımı, sıfırın altındaki sıcaklıklarda AAC hidrasyonunu hızlandırmak için umut verici bir strateji olarak görülmüştür. Basınç ve eğilme dayanımları, -10 °C'de CaO içeriğinin artmasıyla kademeli bir artış göstermiştir. CaO'nun ikame edilmesi, özellikle bir günlük sonuçlarda açıkça görülen, basınç dayanımında dikkate değer bir artışa yol açmıştır. CaO'nun AAC harcı üzerindeki güçlendirme etkisi, hızlı reaksiyon kinetiği nedeniyle öncelikle erken aşamaya odaklanmıştır. Zhang vd. [67], YFC/PC kış inşaatlarında kullanımı üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Hem PC'nin hem de YFC'nin içeriğinin ağırlıkça %70 ile %100 arasında değiştiği alkaliyle aktifleştirilen YFC/PC bağlayıcının performansını araştırmışlardır. Çalışma, performansı 20°C, -5°C ve -20°C dahil olmak üzere farklı sıcaklıklarda değerlendirilmiştir. Alkali aktivatörler, özellikle su bardağı ve NaOH, %14'e ayarlanmış alkali dozajıyla kullanılmıştır. Sıfırın altındaki koşullarda PC, -5 °C'de 28 günde yalnızca 22 MPa'ya ve -20 °C'de 2 MPa'ya ulaşarak engellenmiş bir dayanım gelişimi sergilemiştir. Buna karşılık, AAC/PC bağlayıcılar -5 °C'de üstün mukavemet gelişimi göstererek 28 günde 57,9 ila 62,7 MPa mukavemete ulaşmışlardır. Çalışma, alkaliyle aktifleştirilen bağlayıcıların, sıfırın altındaki sıcaklıklarda mukavemet gelişiminde PC'den daha iyi performans gösterdiğini vurgulamıştır. Ek olarak, YFC

dozajının etkisi vurgulanmış ve YFC'nin sürekli olarak en yüksek basınç dayanımına ulaştığına dikkat çekilmiştir; bu da soğuk ortamlarda bağlayıcı performansının optimize edilmesinde YFC-PC oranının önemine işaret etmiştir.

Samantasinghar ve Singh [84], -15°C ve 0°C sıcaklıklarda kürlenene AAM'lerde cürufun %40'ını uçucu külle ikame etmişlerdir. Uçucu kül ilavesi, tamamı cüruftan oluşan karışımla karşılaştırıldığında her yaşta basınç dayanımında azalmaya neden olmuştur. Wei vd. [85], -5°C , 0°C ve 5°C sıcaklıklarda kürlenene %50-%50 cüruf ve uçucu kül karışımını kullanarak alkaliyle aktifleştirilen harç numuneleri üzerinde bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada, dondurucu bir madde, geciktirici ve plastikleştirici gibi kimyasal katkı maddelerinin yanı sıra NaOH ve Na_2SiO_3 oluşan bir aktivatör karışımı kullanılmıştır. Sonuçlar, cürufun %50 oranında uçucu külle değiştirilmesi durumunda bile, 90 gün sonra basınç dayanımlarının -5°C , 0°C ve 5°C 'de sırasıyla 30,82 MPa, 38,52 MPa ve 67,96 MPa olduğunu göstermiştir.

Alzaza vd. [50], karıştırma işleminin PC bazlı kompozitlerle benzerliği göz önüne alındığında pratik kullanım açısından avantajlı olduğu düşünülen tek parça AAC'lerin mekanik performansını incelemiştir. Susuz sodyum metasilikat katı aktivatör olarak görev yapmıştır. Tek kısımlı AAC karışımı bileşimi bakımından bağlayıcı, ağırlıkça %90 YFC ve %10 sodyum metasilikattan oluşmaktaydı. Hazırlanan harçlar sıfırın altındaki sıcaklıklarda 56 güne kadar kürlenmiştir. Sonuçlar, AAC harcının, çimento harcıyla karşılaştırıldığında ultrasonik darbe hızında ve basınç dayanımında önemli ölçüde daha düşük azalmalarla üstün sertleşme özellikleri sergilediğini ortaya çıkarmıştır. Çalışma, sıfırın altındaki sıcaklıklarda tek parçalı AAC harcının hızlandırılmış reaktivitesini ve daha hızlı mukavemet gelişimini ve buz kristalinin neden olduğu basınca dayanabilen sağlam bir mikro yapı oluşturma yeteneğini vurgulamıştır. Dikkat çekici bir şekilde, tek bileşenli AAC harcı -5°C 'de kürlendiğinde 56 günde 68 MPa'lık bir basınç dayanımına ulaşarak çimento harcıyla elde edilen 9,7 MPa'yı aşmıştır. Bu, AAC harcının soğuk kürlenme ortamlarında daha dayanıklı bir alternatif olarak potansiyelini vurgulamaktadır. Aynı araştırma grubu [70], tarafından yürütölen ayrı bir çalışmada araştırmacılar, sıfırın altındaki sıcaklıklarda kürlenene tek bileşenli AAC harcının mekanik performansını arttırmayı amaçlamışlardır. Bunu, değişen ekleme oranlarıyla (%5, %10 ve %20) bir katkı maddesi olarak mikron altı metalurjik kalıntıyı ekleyerek başarmışlardır. Bu mikron

altı parçacıklar, ticari olarak temin edilebilen nano ve mikro parçacıklara kıyasla çevre dostu ve uygun maliyetli bir alternatif olarak seçilmişlerdir. Mikron altı parçacıkların dahil edilmesi, hidrat fazlarının yaygın ve arttırılmış çökmesi ve mikron altı metalurjik kalıntıların doldurma etkisi nedeniyle daha kompakt bir mikro yapıya ve gelişmiş arayüzey geçiş bölgesine (ITZ) neden olmuş ve bu da basınç dayanımının artmasına yol açmıştır. Ancak parçacıkların ikame oranı arttıkça, sıfırın altındaki tüm sıcaklık değerlerinde basınç dayanımı üzerindeki olumlu etki azalmıştır.

4.2. Priz (Sertleşme) Süresi

Ju ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada [17], sırasıyla 20 °C, 5 °C ve -10 °C'de kürleme işlemi gerçekleştirilen, farklı CaO içerikli AAC harçlarının priz süreleri araştırılmıştır. İçerisinde CaO bulunmayan AAC harcının 20 °C sıcaklıkta 20 dakikalık nispeten küçük bir priz süresi ile katılaşmaya başladığı görülmüş ve AAC harcının, sıcaklık ile priz süresi arasındaki ilişki ile ilgili şu sonuçlara varılmıştır. Sıcaklığın 20 °C'den -10 °C'ye düşürülmesiyle priz süresi, 20 dakikadan 32 dakikaya uzamıştır. Uzamış priz süresi ve dolayısıyla AAC harcının katılaşmasının gecikmesinin nedenleride şöyle açıklanmıştır. 0°C altındaki sıcaklıklarda düşük hidratasyon nedeniyle sıcaklık alt seviyelerde kalmıştır [20,86]. Bununla birlikte, 0 °C, 5 °C ve -10 °C sıcaklıklarda CaO içeriğinin ağırlıkça %1'den ağırlıkça %4'e yükseltilecek priz süresinin kısaltılması istenmiştir. -10 °C sıcaklıkta CaO içeriğinin ağırlıkça %4'e kadar artırılmasıyla AAC harcının priz süresinin 32 dakikadan 12 dakikaya düştüğü görülmüştür. 20°C sıcaklıkta ise AAC harcının priz süresi, CaO içeriğinin aynı miktarda artmasıyla 20 dakikadan 8 dakikaya düşmüştür.

CaO içeriği ağırlıkça %0'dan %3'e artırıldığında AAC harcının priz süresinin %30 ve %31 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır. -10 °C ve 20 °C sıcaklıkta CaO içeriği ağırlıkça %3'ten ağırlıkça %4'e çıkarıldığı zaman ise %30 ve %31'lik ek bir azalma daha olduğu görülmüştür. Ağırlıkça %4 CaO içeren AAC harcının priz süresindeki bu belirgin azalma, çokta istenilen birdurum değildir. AAM'lerin; karıştırılması, titreştirilmesi, taşınması ve dökülmesi için yeterli süreyi sağlamak amacıyla, pratik mühendislikte çok kısa priz sürelerine izin verilmez. Tüm bu nedenlerden ötürü, AAM'lerin; inşaat uygulamaları göz önüne alındığında, CaO içerikleri ağırlıkça %0 ile %3 arasında değişen miktarlara uygun olarak alınır. Priz süresi, AAM'lerin inşaat uygulamaları açısından genel

olarak izlenen bir gösterge olan katılaşma oranının doğrudan bir yansımasıdır [87–89]. Başka bir çalışmada [15]; -10 °C, -5 °C, 0 °C, 5 °C ve 20°C gibi farklı sıcaklıklarda alkali aktivatörü olarak K (potasyum) ve N (azot) kullanılarak üretilmiş AAC harçlarının priz süreleri incelenmiş ve tüm bu sıcaklık değerlerinde K kullanılarak hazırlanmış harçların priz sürelerinin daha kısa olduğu kanısına varılmıştır.

Zhang ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada ise [67], YFC ve PC kullanılarak hazırlanan karışım üzerinde priz süresi incelendi ve alkali ile aktifleştirilen YFC/PC bağlayıcının priz süresinin azaldığı sonucuna varıldı. Bu sonuç; hem PC hem de YFC içeren alkali ile aktifleştirilen bağlayıcıların daha hızlı bir performans sergilediğini gösterdi.

4.3. Hidratasyon Süreci / Isısı

Ağırlıkça % 0, % 1 ve % 3 CaO içeren AAC harçları hazırlanarak bunların hidratasyon süreçlerinin incelendiği bir çalışma yapılmıştır [17]. Her bir örnek için erken yaş hidratasyon süreçlerinde iki pik noktanın meydana geldiği görülmüştür. Yaklaşık 0 – 10 dakikada oluşan ilk pik noktasının, YFC parçacıklarının alkali aktivatör çözeltisi ile ıslatılması ve çözülmesi işleminden ve çözünmüş Ca^{2+} tepkimesinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Ardından 15-30 dakika sonra oluşan ikinci pik noktasının nedeninin ise alkalinin uyardığı reaksiyon kaynaklı olduğu görülmüştür [90,91]. Tüm bu durumların özünde, YFC'nin alkali aktifin eklenmesiyle yavaş yavaş çözüldüğü, bu çözülme sırasında YFC'den Ca^{2+} , Al^{3+} ve $[\text{SiO}_4]^{4-}$ iyonlarının serbest bırakıldığı ve böylece C (- A) - S - H jelinin oluştuğu görülmektedir.

Yine bu çalışmada [17], ağırlıkça %1 CaO içeren AAC'nin, ilk ekzotermik reaksiyon sıcaklık pik değerinin, sade AAC harcından daha yüksek olduğu görülmüştür. Çünkü CaO, su ile birleşerek yavaş yavaş $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oluşturduğunda büyük miktarda ısı açığa çıkar. Aynı zamanda; bu işlem, sistemdeki Ca^{2+} miktarını da artırır, böylece Ca^{2+} il $[\text{SiO}_4]^{4-}$ arasındaki reaksiyonu teşvik eder, hatta AAC harcıyla karşılaştırıldığında daha da artırılabilir. Ağırlıkça % 1 CaO içeren AAC harcının ikinci ekzotermik reaksiyon sıcaklık pik değerinin konumunun ileriye doğru hareket ettiği, ancak zirve yüksekliğinin azaldığı görülmüştür. Su ile birleşen CaO tarafından açığa çıkan ısı, AAC reaksiyonunu teşvik

ederek kimyasal tepkime sürecini hızlandırır. Bu arada birinci ekzotermik dönemde tüketilen bol Ca^{2+} nedeniyle reaksiyon bir miktar zayıflar. Bu durum, ısı salınımının azalmasıyla sonuçlanır. Ayrıca, ağırlıkça %3 CaO eklendikten sonra, orijinal iki ekzotermik reaksiyon sıcaklık pik değerinin, erken dönemde güçlü ve gergin bir pik değerine entegre olduğu görülebilir. Bu durum, CaO ilavesinin ağırlıkça %1'den ağırlıkça %3'e çıkmasıyla ısı salınımındaki artan artışa bağlanabilir ve bu da reaksiyon hızını önemli ölçüde artırır.

Garcia – Loderio ve ark. yaptığı bir çalışmada [92], uçucu kül ve PC içeren AAC karışımları hazırlamış alkali ile aktifleşen kül / PC karışımının hidratasyon sürecinin, sadece uçucu kül içeren numuneye göre daha hızlı olduğunu belirtmişlerdir.

Way ve ark. ise [93], PC'nin yüksek OH^- içerisinde daha hızlı ve erken hidratasyon süreci sergilediğini belirtmişlerdir.

5. METERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasının temel amacı, Düşük sıcaklıkta (2 °C) kürleme işlemi gerçekleştirilecek beton içerisinde; PC yerine ve ya PC ile birlikte kullanılabilecek, uygun priz alma süreleri, dayanım ve dayanıklılık özellikleri gösterebilecek, çevre koşullarına uyumlu ve sürdürülebilir PC'ye alternatif bir malzeme geliştirmek ve bu malzemenin üretim parametrelerini belirlemektir.

Tez kapsamında yürütülen deneysel çalışmalarda, sadece YFC içeren ve YFC'nin belirli oranlarda PC ile ikame edildiği çeşitli bağlayıcı karışımları hazırlanmıştır. Bu karışımlar farklı alkali modül ve dozajlarda tasarlanmış, tüm numuneler sabit olarak 2 °C sıcaklıktaki kür ortamında bekletilmiştir. Bu deneysel çalışmayla, söz konusu sıcaklık koşullarında en uygun bağlayıcı kompozisyonlarının belirlenmesi hedeflenmiştir.

5.1. Kullanılan Malzemeler

Çalışma kapsamında kullanılan tüm malzemeler ve bu malzemelerin sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıdaki başlıklarda verilmiştir.

5.1.1. Portland Çimentosu

Bu tez çalışması için CEM I 42.5 R PC kullanılmıştır. PC'nin kimyasal bileşimi tablo 5.1'de gösterilmiştir. PC'nin sahip olduğu özgül yüzey alanı 3600 cm²/g, özgül ağırlığı ise 3.13 değerlerine sahiptir.

Tablo 5.1. PC'nin kimyasal bileşimi

<u>Kimyasal bileşim</u>	<u>%</u>
SiO ₂	18,5
Al ₂ O ₃	4,4
Fe ₂ O ₃	3,1
CaO	64,1
MgO	1,2
SO ₃	3,5
Na ₂ O	0,44
K ₂ O	0,78
Kızdırma kaybı	3,75

5.1.2. Yüksek Fırın Cürufu

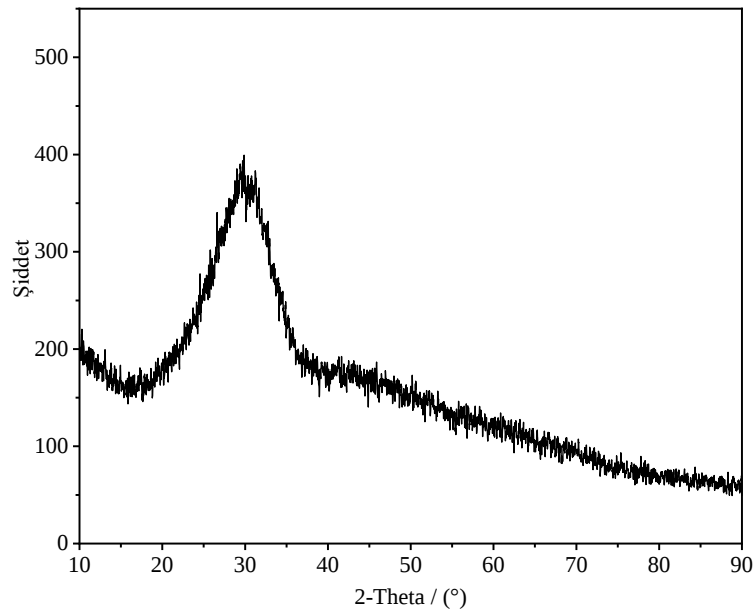
Bu çalışmada AAM üretiminde ana bağlayıcı bileşen olarak Ereğli Demir ve Çelik Fabrikası'ndan temin edilen YFC kullanılmıştır.

Kullanılan YFC'nin özgül ağırlığı ve özgül yüzey alanı sırasıyla 2.8 ve 4400 cm²/g'dır. YFC'nin kimyasal bileşimi Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. YFC'nin kimyasal bileşimi

<u>Kimyasal bileşim</u>	<u>%</u>
SiO ₂	34,9
Al ₂ O ₃	15,8
Fe ₂ O ₃	0,7
CaO	38,5
MgO	8,6
SO ₃	<0,1
Na ₂ O	0,4
K ₂ O	0,5
Kızdırma Kaybı	<0,1

YFC üzerinde yapılan X-Işını Difraktometresi (XRD) analizi ise şekil 5.2'de verilmiştir. YFC'nin amorf veya kristal iç yapısını ortaya çıkarmak için yapılan bu analiz; 30°de amorf bir tümsek özelliği göstererek, büyük miktarlarda camsı yapının olduğuna işaret etmiştir [94].



Şekil 5.1. YFC'nin X-Işını Difraktometresi spektrumu

5.1.3. Aktivatör

Bu çalışmada alkali aktivatör olarak sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) karışımı kullanılmıştır. Kullanılan sodyum silikat çözeltisi ağırlıkça %28 SiO_2 , %13,5 Na_2O ve %58,4 H_2O içermektedir. Sodyum hidroksit ise %99 saflığa sahip pelet formundadır. Kullanılan aktivatörler şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Aktivatör olarak kullanılan Na_2SiO_3 ve NaOH

5.1.4. Karışım Suyu

AAM'lerin üretiminde kullanılan alkali aktivatör çözeltilerinin doğru şekilde hazırlanması ve bu çözeltilerle birlikte kullanılacak karışım suyunun beton veya hamur malzemelerine zarar vermeyecek nitelikte olması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında, karışım suyu olarak Bingöl ili şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

5.2. Karışımların Üretilmesi

Karışımların üretilmesinde, öncelikle deneysel çalışma parametreleri belirlenmiştir. Bunlardan ilki aktivatör modülüdür. Bu parametre, aktivatör karışımındaki toplam SiO_2 'nin, toplam Na_2O 'ya oranı alınarak hesaplanmış ve bu çalışmada 1.2 ve 1.5 olarak seçilmiştir. Sonraki parametre ise alkali dozajıdır. Alkali dozajı ise, aktivatör çözeltisi içerisindeki Na_2O içeriğinin, bağlayıcı dozajına oranı alınarak belirlenmiştir. Bu belirlenme ise, NaOH ile Na_2SiO_3 'ün harmanlanmasıyla gerçekleştirilip, ilgili parametre %5, %7 ve %9 olarak alınmıştır. PC miktarı karışım ağırlığının %0, %10 ve %20'si olarak seçilmiş olup, bu değerlerin tamamlayıcı kadarıda YFC olarak alınmıştır. Su bağlayıcı oranı ise 0,34 olacak şekilde, karışım suyunun miktarıda buna göre belirlenmiştir.

Bu değerler alınarak toplamda 18 farklı kombinasyonda beton hamur karışımları hazırlanmıştır. Bu farklı karışımlar isimlendirilirken ilk olarak aktivatör modülü, ikinci olarak alkali dozajı ve son olarakta PC ikame yüzdesi yazılarak isimlendirme tamamlanmıştır. Örneğin; alkali modülü 1.2, alkali dozajı %5 ve çimento ikamesi %20 olan bir numune M1.2/N5/P20 şeklinde isimlendirilmiştir.

Tablo 5.3 Hazırlanan numuneler ve karışım oranları

Karışım	Aktivatör Modülü	Alkali Dozajı (%)	PC (%)	YFC (%)
M1.2/N5/P0	1.2	5	0	100
M1.2/N7/P0		7		
M1.2/N9/P0		9		
M1.2/N5/P10		5	10	90
M1.2/N7/P10		7		
M1.2/N9/P10		9		
M1.2/N5/P20		5	20	80
M1.2/N7/P20		7		
M1.2/N9/P20		9		
M1.5/N5/P0	1.5	5	0	100
M1.5/N7/P0		7		
M1.5/N9/P0		9		
M1.5/N5/P10		5	10	90
M1.5/N7/P10		7		
M1.5/N9/P10		9		
M1.5/N5/P20		5	20	80
M1.5/N7/P20		7		
M1.5/N9/P20		9		

Numune hamur karışımları, şekil 5.4’ te gösterilen harç mikserinde oluşturulmuştur. İlk olarak bu bölümünün en başında açıklandığı şekliyle belirlenen aktivatör modülü ve alkali dozajı değerlerine göre hazırlanan Na_2SiO_3 , karışım suyu içerisinde çözüldükten sonra yine miktarı önceden belirlenen NaOH ile birlikte harç mikseri içerisinde karıştırılan PC ve YFC karışımlarına ilave edilerek, homojen bir hamur haline gelinceye dek karılmak sureti ile hazırlanan 18 farklı kombinasyonda karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımların her biri için 7, 28 ve 90 günlük analiz değerlerine ulaşabilmek için şekil 5.5’te gösterilen

50x50x50 mm³ küp numune kaplarından 3 adet olmak üzere toplamda 54 küp numune hazırlanmıştır.



Şekil 5.3. Harç Mikseri



Şekil 5.4. 50x50x50 mm³ Boyutlu Küp Numuneler



Şekil 5.5. Hazırlanan Numuneler

Hazırlanan tüm bu farklı kombinasyondaki numunelerin; 1/3'ü 7. gün, 1/3'ü 28. gün ve kalan diğer 1/3'ünün de 90. günde gerekli testlerin yapılması suretiyle laboratuvar ortamında bulunan şekil 5.7'de gösterilen soğutucuda 2 °C sabit sıcaklıkta bekletilerek kür koşulları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.6. Soğutucu

5.3. Gerçekleştirilen Deneyler

Hazırlanan numuneler üzerinde ilk olarak priz süresi tayini yapılmış olup, daha sonra basınç dayanımı deneyleri, ultrases geçiş hızı (UGH), taramalı ekektron mikroskobu (SEM) ve fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) analizleri yapılmıştır.

5.3.1. Priz Süresinin Belirlenmesi

Priz süresi belirlenirken, şekil 5.8’ de gösterilen vicat aleti kullanılmıştır. Bu işlem yapılırken; öncelikle vicat aletinin iğnesi, aletin taban plakasının üzerine indirilerek yerleştirilir ve alet göstergesi sıfırlanır. Hazırlanan numuneler vicat halkası içerisine yerleştirilir. Daha sonra numune hamurunun üst bölgesi düzeltilerek düzgün bir hale getirilir. Vicat iğnesinin numunelere çok hızlı bir şekilde batması istenilen bir durum değildir bu nedenle vicat iğnesi yavaşça indirilerek numunelere yakın bir noktada serbest bırakılır. Bunun ardından belirli zaman aralıklarında ölçümler yapılır. Pratikte; başlangıç zamanından, vicat aletinin iğnesi ile taban plakası arasındaki mesafe 4 ± 1 mm oluncaya kadar ki zaman aralığına priz başlama süresi denir. Vicat aletinin iğnesinin numuneye artık hiç batmadığı ya da en fazla 0,05 mm battığı zamana kadar geçen süreye ise priz bitiş süresi denilmektedir. İşte bu şekilde tüm numunelerin priz süreleri hesaplanarak kayıt altına alınmıştır. Tüm bu işlemler yapılırken her defasında vicat aleti iğnesi numuneye batırıldıktan sonra temizlenip yeniden kullanılmıştır. Priz süresinin tayin edilebilmesi için yapılan bu deney, laboratuvar ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deney ASTM C 191 [95] standartlarına göre gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.7 Vicat Aleti

5.3.2. Basınç Dayanım Deneyleri

Beton hamurlarının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarını belirleyebilmek için her bir karışım kombinasyonundan, 50x50x50 mm³ boyutlarındaki küp kalıplardan 3'er tane numune olmak üzere, toplamda 54 adet numune alınmıştır. Günü gelen numune şekil 5.9' da gösterilen 200 tonluk, beton test numuneleri deney presi cihazında, 0.9 kN/s yükleme hızında kırılarak, bu kırılmanın karşılık geldiği basınç dayanımı değerleri not edilmiştir. Basınç dayanımı testi yapılırken ASTM C109 numaralı standart dikkate alınmıştır [96].



Şekil 5.8. Beton Test Numuneleri Deney Presi

5.3.3. Ultrases Geçiş Hızı Ölçümü (UGH) Analizleri

Bu deneyler yapılırken şekil 5.10' da gösterilen UGH cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz 54 kHz ultrasonik darbeleri iletir, alabilen dönüştürüye sahiptir. Deneyler yapılırken; sonuçların daha sağlıklı olabilmesi için cihaz başlıklarının takılacağı numunenin iki yüzü fırça yardımı ile iyice temizlendikten sonra buralara jel sürülmüştür. Daha sonra numunenin bir yüzüne dalga gönderici başlık, öteki yüzüne dalga alıcı başlık takılarak iyice bastırılmış ve ses üstü dalgaların bu iki kısım arasındaki mesafeyi ne kadar sürede geçtikleri belirlenmiştir.

UGH cihazının kullanılmasıyla beton numunelerin bir yüzeyinden öteki yüzeyine ultrasonik puls uygulanarak betonun içerisinde basınç dalgaları oluşturulur. Oluşturulan bu ses üstü dalgalar betonların bir yüzeyinden verilerek öteki yüzeyinden alınır. UGH cihazı, bu ses üstü dalgaların aldıkları toplam yolun süresini ölçer, bununla birlikte dalga hızında ölçerek bu verileri bize verir. Hesaplanan bu ses üstü dalga hızları ile beton basınç dayanımı değerleri ve diğer özellikleri arasında ki ilişki yaklaşık olarak elde edilmektedir [1]. Ultrasonik hız ölçümleri ASTM C 597 – 16 no.lu standarttaki esaslara göre yapılmıştır [97].



Şekil 5.9. Ultrases Geçiş Hızı Ölçüm (UGH) Cihazı

5.3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri

Hazırlanan numunelerin SEM analiz deneyleri; şekil 5.11’ da gösterilen, Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde bulunan JSM-6510 markalı SEM cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler yapılırken, ilk olarak kırık numuneler sputter coater denilen kaplama cihazı ile altın kaplama ile homojen bir şekilde kaplanarak incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu, numuneler yüzeyinden yüksek çözünürlüklü görüntüler alma sistemi ile çalışır ve bunları yaparkende

elektronları kullanır. Tüm bu organizasyonun sonucunda ise, numunelerin üç boyutlu görüntüleri elde edilir. Bu işlemler gerçekleşirken; öncelikle numune içerisindeki atomlar ile bu cihazdan gelen elektronlar etkileşime girerek ilgili numune yüzeyinde kompozisyon ve topografi ile ilgili bilgiler içeren değişik sinyaller oluşturur. Cihazdan gelen elektron demeti, ızgara tarama düzeni ile numunenin tüm yüzeyini tarar ve bu elektron demetinin konumu, algılanan sinyallerle eşleştirilerek üç boyutlu görüntü oluşturulur. Bu cihazlarda, optik mikroskoplara göre elektronun aktif olarak kullanılmasından ötürü daha iyi görüntüleme derinliği ve geniş bir büyütme alanı bulunmaktadır. Ayrıca bu cihaz, yüzeyi yeterince düzgün olmayan numunelerde de kullanılabilir [11].



Şekil 5.10. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

5.3.5. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Analizleri

Bu deneyler, üretilen numunelerin bileşik yapılarını ortaya çıkarmak için yapılmıştır. Deneyleri gerçekleştirmek için şekil 5.12’de gösterilen, Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde bulunan, Perkin Elmer Spectrum 100 FTIR cihazı kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler, deneylere başlamadan önce ince ince öğütülmüştür. İnce toz haline getirilen numuneler daha sonra Potasyum Bromür ile homojen bir şekilde karıştırıldıktan sonra basınç uygulanarak çapı 10 mm, kalınlığı 0,5

mm olan bir pelet haline getirilmiştir. Cihazın optik sistemi sayesinde $450-4500\text{ cm}^{-1}$ aralığında veri elde edilebilmektedir. IR Spektrometresi ile numunelerin molekül veya bileşik yapısında bulunan bağlar hakkında tanımlayıcı analizler yapılır. Bu analizleri gerçekleştiren IR spektrumu, maddenin en temel yapı taşı olan atomların arasında beliren titreşim hareketi ile ortaya çıkan frekanslarına karşılık gelen absorpsiyon pikleri ile görünmesi zor olan olguların bile görülebilmesine olanak sağlar. Buna parmak izini örnek olarak verebiliriz. Kimyasal dalgalar, tüm dalga sayısı değerlerinde gözlemlenemez. Bu durumun önüne geçmek için korelasyon tabloları kullanılır. IR spektrumlarında gözlenen pik değerler, molekülün içerisindeki mevcut, farklı fonksiyonel gruplara ait pik değerlerdir. Spektrumun ilgili bölgesinin; incelenip, değerlendirilmesiyle o molekülde hangi fonksiyonel grupların mevcut olup olmadığı anlaşılabilir [11].



Şekil 5.11. FTIR Spektrofotometre

Tablo 5.4. Numuneler üzerinde yapılan Deneyler ve Standartları

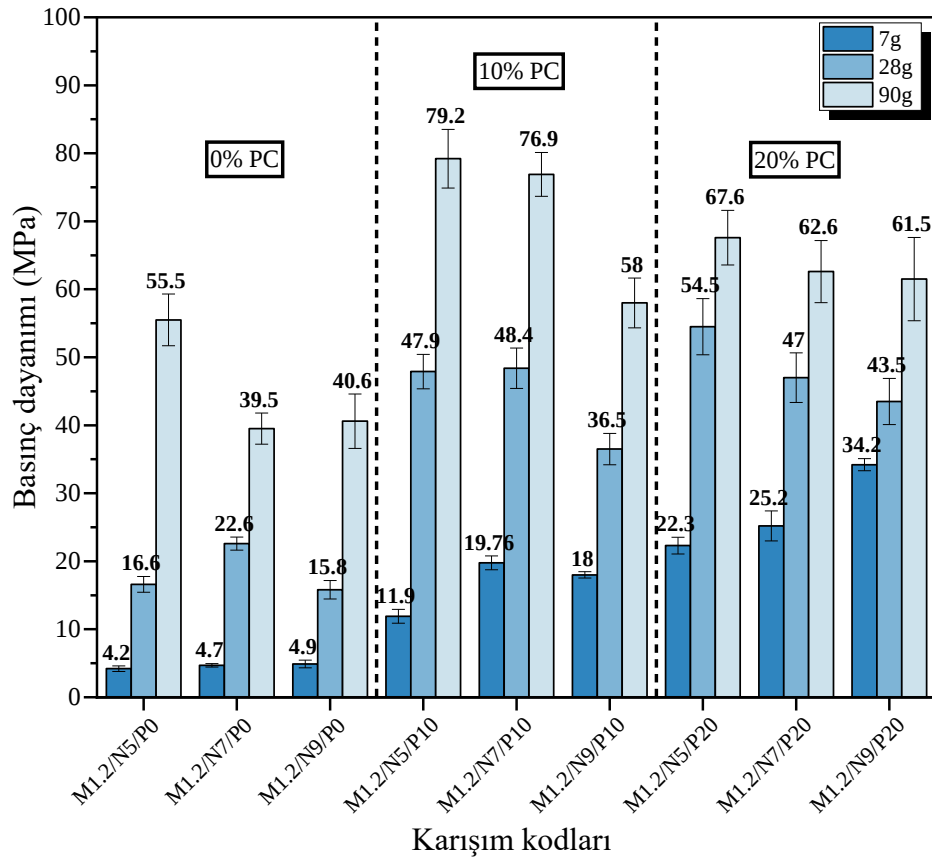
Deney	Deney Standartı	Kullanılan Numune
Basınç Dayanımı Deneyi	ASTM C109/C109M	50×50×50 mm ³ her karışım için 3 küp numune
UGH Deneyi	ASTM C597	50×50×50 mm ³ her karışım için 3 küp numune
Priz süresi belirleme Deneyi	ASTM C191	Taze Hamur Numune
FTIR Deneyi		İnce Öğütülmüş Numune
SEM Deneyi		Altın kaplamalı Numune

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

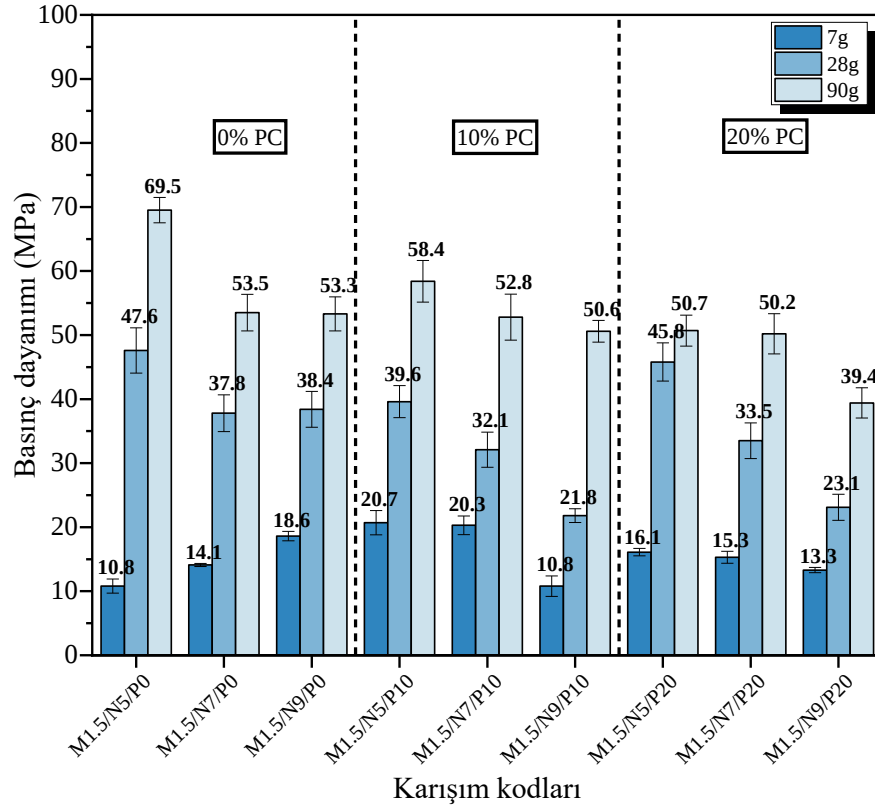
Numuneler üzerinde yapılan tüm deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar ve bunların nedenleri bu bölümde açıklanmıştır.

6.1. Basınç Dayanımı Sonuçları

Önceden yapılan birçok çalışmada göz önünde bulundurularak aktivatör modülü 1.2 ve 1.5 olan, sırasıyla PC oranları %0, %10, ve %20 oranında ve alkali dozajlarında sırasıyla %5, %7, %9 olarak alınan numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelerin 7, 28, ve 90 günlük basınç dayanımları şekil 6.1 ve şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Alkali modülü 1,2 olan beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları



Şekil 6.2. Alkali modülü 1,5 olan beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları

İlk olarak alkali modülü 1.2 ve 1.5 olan numunelerin 7 günlük basınç dayanımları incelendi. PC içermeyen 1.2 alkali modülündeki numunelerin 7 günlük basınç dayanımlarının düşük olduğu görüldü. Ardından alkali dozajı önce %7'ye daha sonrada %9'a çıkarılarak hazırlanan numune sonuçlarına bakıldı. Alkali dozajının bu artışı, numunelerin basınç dayanımında küçük bir artışa neden olsa da 4,9 MPa gibi nispeten düşük bir değerde kaldı. Alkali modülünün, düşük sıcaklıktaki kürlenme koşullarının etkisi altında kaldığında AAC'nin erken yaştaki dayanımına belirgin bir etkisi vardır. Alkali modülünü 1.5'e yükseltince 7 günlük basınç PC içermeyen numunelerin dayanımında önemli bir artış olduğu görüldü. Ayrıca 1.5 modülünde; alkali dozajının %5'ten, %7 ve %9'a çıkarılmasıyla PC ikamesinin olmadığı numunelerin 7 günlük basınç dayanımlarının önemli ölçüde arttıkları saptandı. Bu basınç dayanımları; %5, %7 ve %9 alkali dozajı içeren numunelerde sırasıya 10.8 MPa, 14.1 MPa ve 18.6 MPa olarak tespit edildi.

Alkali dozajının artması ile PC içermeyen numunelerde gözlenen basınç dayanımındaki artış, alkali aktivatörünün pH değerinin yükselmesine ve cürufun hidratlama kapasitesinin artmasına bağlanabilir [98,99].

Abubakr vd. [100], ortam koşullarında kürlenene AAC içeren numunelerin modüllerinin 1'den 1.25'e ve 1.5'e çıkarılmasının erken basınç dayanımında önemli bir düşüşe yol açtığını belirtmişlerdir. Mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlar, jeopolimerizasyon sürecinin daha düşük kürlenme sıcaklıklarında etkili bir şekilde ilerlemesi için daha yüksek bir modülün gerekli olduğunu göstermektedir [101]. Alkali modülü 1.2 olan numunelerde; tüm alkali dozajlarında %10 PC ikamesi yapılan durumda ise tüm numunelerin birbirine yakın ve çokta yüksek olmayan ama PC' siz numunelere göre birazcık daha iyi dayanımlar sergilediği saptandı. %5, %7 ve %9 alkali dozajları için bu sonuçlar sırasıyla 11.9, 19.76 ve 18 MPa olarak ölçüldü. İlgili modülde PC ikamesi %20' ye çıkarıldığında 7 günlük sonuçların tüm numunelerde daha yüksek ve kabul edilebilir düzeylere çıktığı görüldü. Böylelikle PC'nin %10 ve %20 oranlarında eklenmesiyle 7 günlük basınç dayanımlarının arttığı görülmüştür. PC ve su arasındaki kimyasal reaksiyon hızlı ve yoğun bir davranış sergileyerek, PC'nin AAC içeren numunelerin dayanımı üzerindeki faydalı etkisinin, öncelikli olarak gelişimin erken aşamalarında yoğunlaştığını vurgulamaktadır [17]. Alkali modülü 1.5'e çıkarıldıktan sonra, %10 PC eklenmesi; %5 ve %7 alkali dozajlı numunelerin 7 günlük basınç dayanımlarını artırmıştır. Nitekim bu değerler 20.7 ve 20.3 MPa olarak ölçülmüştür. Ancak %9 alkali dozaj içeren numuneler üzerinde olumsuz bir etkiye sebep olmuş ve basınç dayanımı değeri 10.8 MPa' ya kadar düşmüştür. Ju ve ark. [17], sıfırın altındaki sıcaklıklarda kürlenene AAC'nin erken yaş dayanımının CaO ikamesi ile arttığını saptamışlardır. Bu çalışmada ise, yüksek alkali modülü ve yüksek alkali dozajı içeren numunelerde PC ikamesinin, 2°C'de kürlenene AAC numunelerinde büzülme çatlaklarına neden olarak basınç dayanımı üzerinde olumsuz bir etkiye neden olduğu gösterilmiştir.

Kürlenme süresinin 28 güne çıkarılması ile beton basınç dayanımında önemli bir artış saptandı. Alkali modülünün 1.2 olduğu, PC oranının ise %0 ve %10 olduğu numunelerde, alkali dozajının %5'ten %7'ye çıkarılması ile basınç dayanımının arttığı görüldü. Aynı numunelerde alkali dozajı %9'a çıkarıldığında ise basınç dayanımının, %7'lik alkali dozajı bulunan numuneye göre düştüğü saptandı. PC oranı %20'ye çıkarıldığında ise alkali dozajının artırılmasının basınç dayanımında düşüşe neden olduğu görüldü. Alkali

modülünün 1.5 olduğu numunelerde ise; alkali dozajının artırılması PC içeren numunelerde daha fazla olmakla beraber tüm numunelerin basınç dayanımında bir düşüşe neden oldu. %5, %7 ve %9 alkali dozajlarında %10 PC içeren numunelerin basınç dayanımları sırasıyla 39.6, 32.1 ve 21.8 MPa olarak ölçüldü. PC oranının %20 olduğu numunelerde ise basınç dayanımı sırasıyla 45.8, 33.5 ve 23.1 MPa olarak görüldü. Alkali modülünün 1.2 olduğu numunelerde PC'nin dahil edilmesi 28 günlük basınç dayanımını artırdı. Ancak alkali modülünün 1.5 olduğu numunelerde PC miktarının az olması basınç dayanımı konusunda daha avantajlı sonuçlar verdi. PC içeren bu numunelerin; 28 günlük basınç dayanımında, alkali dozajının artması ile birlikte görülen düşüş, öncelikle büzülmeden kaynaklanan çatlakların oluşumuna bağlanabilir [102–104]. Ayrıca alkali dozajının artırılması, çözülmüş cürufan Ca'nın çözünürlüğünü engeller ve bağlayıcı fazların oluşumunu azaltabilir [98,105].

90. gün basınç dayanımları incelendiğinde ise; alkali modülü, alkai dozajı ve PC ikame oranlarına bakılmaksızın tüm numunelerin basınç dayanımında artış gözlemlendi. Basınç dayanımındaki en büyük artışlar; 1.2 ve 1.5 alkali modülünde, alkali dozajı %5 olan ve PC içermeyen numunelerde saptandı. 1.2 modüldeki kombinasyon incelendiğinde; ilgili karışım, düşük sıcaklıkta kürlenmiş AAC'nin erken yaşta hidratlanmasını geciktirmesine ve düşük basınç dayanımına (4.2 MPa) neden olmasına rağmen, 90 günün sonunda önemli bir iyileşmesi (55.5 MPa) özelliği gösterdi. Yine bu modülde %20 PC ikamesi yapılan numunelerde, alkali dozajlarının değişiminin basınç dayanımında çok büyük farklılıklara neden olmadığı görüldü hatta ilgili modüldeki en düşük dayanım artış miktarları bu kombinasyonlarda saptandı. 1.5 modüldeki, PC' siz ve %5 dozajlı kombinasyon ise, 10.8 MPa'dan 69.5 MPa'lık dayanım iyileşmesi özelliği gösterdi. 1.2 modülünde, PC içeren numuneler, PC içermeyen muadillerine kıyasla daha yüksek basınç dayanımı performansı gösterdi. Bu modül için en uygun PC ikame oranı %10 olarak belirlendi. Bu modülde, 90 gün sonunda en düşük basınç dayanımını veren numune ise 39.5 MPa ile PC içermeyen ve alkali dozajı %5 olan olarak tespit edildi. 1.5 modülünde ise; PC eklenmesi, tüm alkali dozajlarındaki numunelerde basınç dayanımında bir düşüşe neden oldu. %5 alkali dozajına sahip, PC içermeyen numunede basınç dayanımı 69.5 MPa olarak ölçülürken, aynı alkali dozajına sahip ancak %10 ve %20 PC ikamesi içeren numunelerde basınç dayanımları sırasıyla 58.4 MPa ve 50.7 MPa değerlerine kadar düştü. 90. Gün sonunda, PC ikame oranı ve modülünden bağımsız olarak, en iyi basınç

dayanımları %5 alkali dozajına sahip numunelerden elde edildi. İlgili modülde; en düşük dayanımı veren numune ise, 39.4 MPa ile %20 PC ikame edilen ve alkali dozajı %9 olan numune olarak saptandı.

1.2 ve 1.5 alkali modülüne sahip, 2°C’de kürlenene numunelerin, 90 gün sonunda en yüksek basınç dayanımlarına sırasıyla M1.2/N5/P10 (79.2MPa) ve M1.5/N5/P0 (69.5 MPa) numuneleri ulaştı.

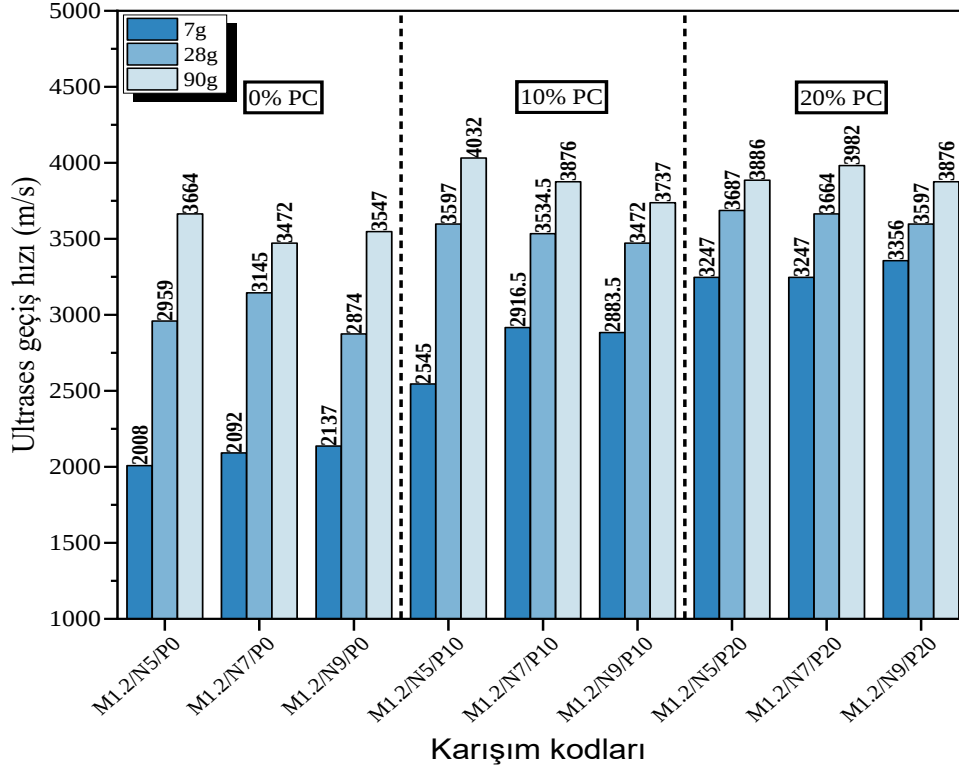
1.2 modülündeki numuneler incelendiğinde, %20 oranında PC eklenmesi çok yüksek erken basınç dayanımı sağlarken, 28 günlük sonuçlarda benzer şekilde daha iyi sonuçlar vermiştir. %10 PC içeren numunelerin ise 90 günlük basınç dayanımlarının daha yüksek değere ulaştıkları görüldü.

1.5 alkali modülüne sahip numunelerde ise; PC eklenmesinin, tüm durumlarda 90 günlük basınç dayanımını önemli ölçüde azalttığı saptandı. Aynı şekilde 28 günlük basınç dayanımlarında incelendiğinde, benzer şekilde PC artışına paralel bir şekilde bu dayanımlarda da düşüş olduğu görülmüştür.

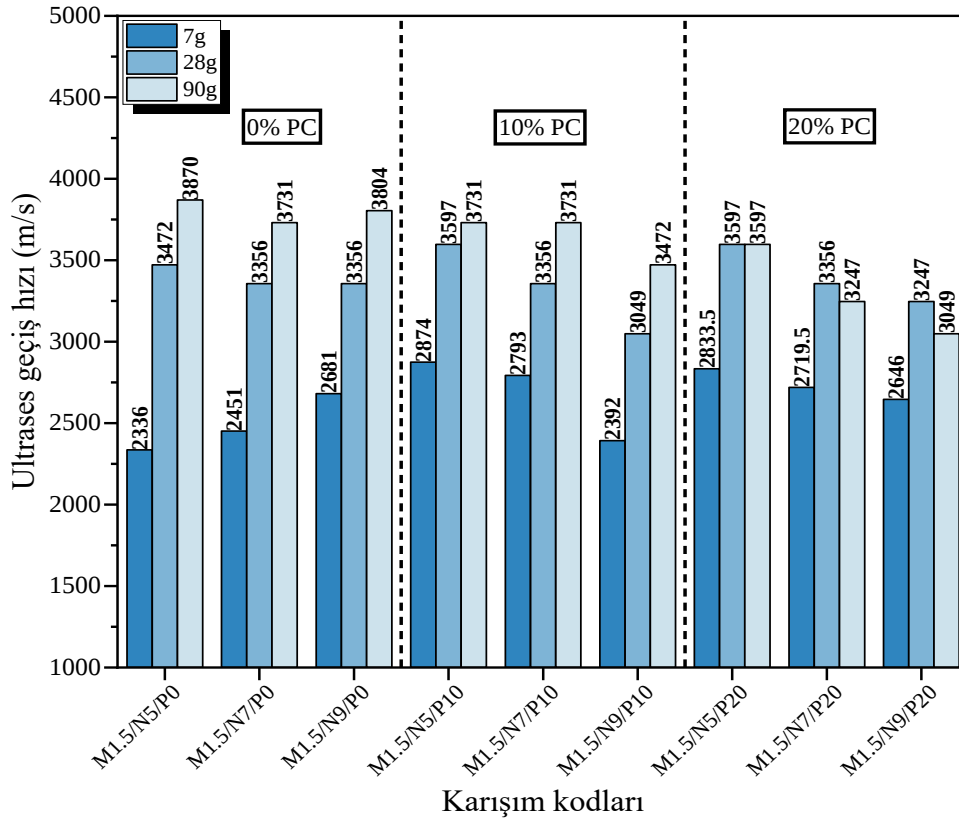
Sonuç olarak; alkali ile aktive edilen AAC / PC bağlayıcı, düşük sıcaklıkta (2°C) daha hızlı reaksiyon sergiledi, bu durumda dayanımın artmasını kolaylaştırdı ve soğuk hava koşulları için bir malzeme olarak uygunluğunu kanıtladı [67].

6.2. Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları

Alkali aktivatör modülü 1.2 ve 1.5 olan numunelerde %5, %7 ve %9 alkali dozajı ve PC ikamesi değişkenlerine bağlı olarak ölçülen ultases geçiş hızları (UGH) şekil 6.3. ve 6.4’te gösterilmiştir.

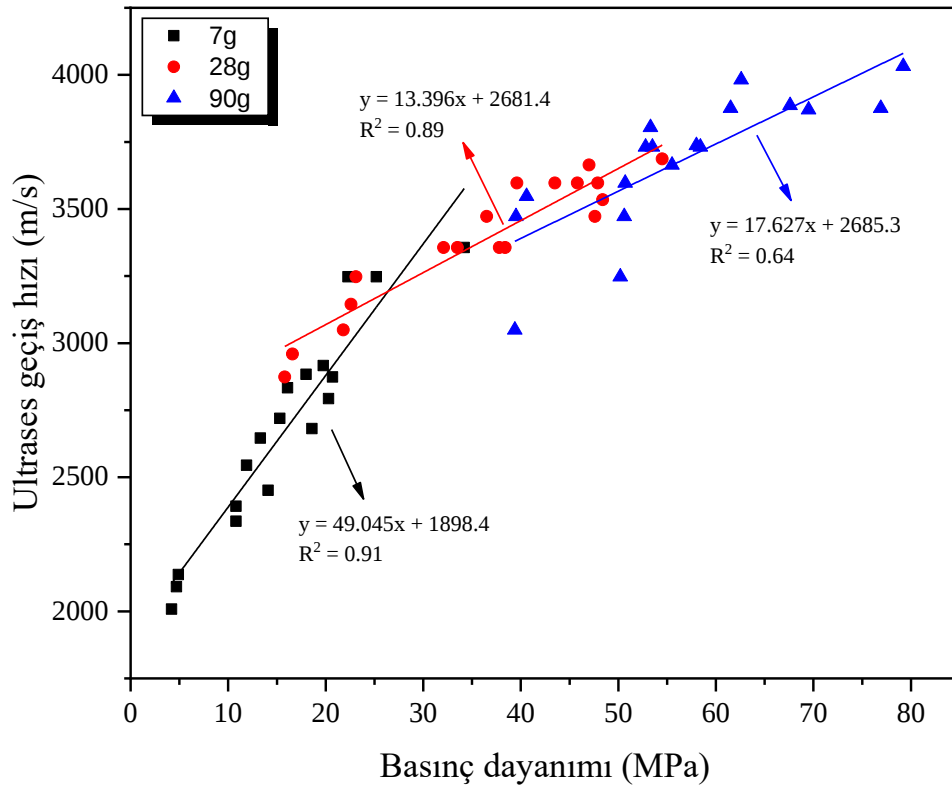


Şekil 6.3. Alkali modülü 1,2 olan beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük UGH değerleri



Şekil 6.4. Alkali modülü 1,5 olan beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük UGH değerleri

Alkali modülü 1.2 olan numunelerin 7 günlük UGH sonuçları incelendiğinde en düşük sonuçlar PC içermeyen numunelerde görüldü. Bu modülde alkali dozajının %5'ten %7 ve %9'a çıkarılması UGH sonuçlarında bir miktar artışa neden olsa da, bu artış basınç dayanım sonuçlarında da gözlenildiği gibi yüksek bir değere ulaşmadı. Alkali modülü değiştirilmeden PC'nin ikame edilmesi 7 günlük UGH değerinde önemli bir iyileşmeye neden oldu. %10 PC içeriğine sahip 7 günlük, %5, %7 ve %9 alkali dozajları etkisi altındaki numunelerin UGH sonuçları sırasıyla 2545 m/s, 2917 m/s ve 2884 m/s olarak ölçüldü. PC ikamesi %20'ye çıkarıldığında ise 3247 m/s'yi geçen değerler elde edildi. 7 günlük UGH sonuçları incelendiğinde; PC ikamesinin, 1.2 modülünde ve düşük sıcaklıklardaki kür koşullarında numunelerin erken mekanik gelişimi için kritik olduğunu göstermektedir. Alkali modülünün 1.5'e çıkarılması ve alkali dozajının %5'ten, %7 ve %9'a yükseltilmesiyle PC içermeyen numunelerin 7 günlük UGH sonuçlarında artış gözlemlenmiştir. Ancak 1.5 modüldeki numunelerin PC eklendiği durumlarda alkali dozajının artırılması UGH sonuçlarında olumsuz bir etkiye neden olmuştur. Basınç dayanımı ile UGH değeri arasındaki 7, 28 ve 90 günlük kürlenme periyotları arasındaki ilişki şekil 6.3'te gösterilmiştir.

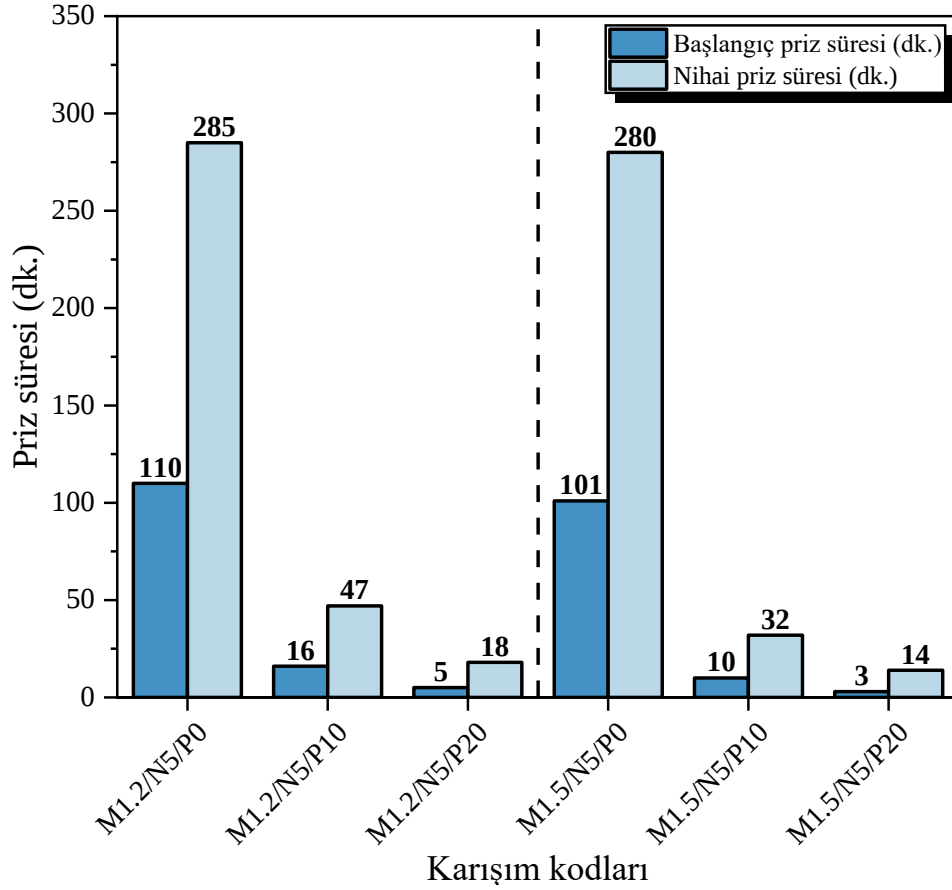


Şekil 6.5. Farklı kürlenme sürelerinde basınç dayanımı ile UGH arasındaki korelasyonlar

28 günlük sonunda ölçülen UGH değerleri, basınç dayanımı sonuçları ile güçlü bir korelasyon göstermektedir. Bu kürlenme periyodundan sonra UGH ile basınç dayanımı arasındaki belirleme katsayısı (R^2) 0,89 olarak hesaplanmıştır. 1.2 alkali modülünde , %5 alkali dozajına sahip ve PC içermeyen numuneler, basınç dayanımındakine benzer oranda bir iyileşme göstersede, UGH değeri bu kombinasyonda en düşük değerde kalmıştır. 1.2 modül ve %5 dozaja sahip bu numunelerde, 90 günlük sürenin ardından ise devam eden iç reaksiyonlar sonucu numunelerin artan sıkılıklarına bağlı olarak belirgin bir UGH artışı gözlemlenmiştir [98,106]. 1.5 alkali modülüne sahip ve %20 PC içeren tüm numunelerde ise 90 günlük UGH değerleri, 28 günlük UGH değerlerine göre düşük değerde kalmıştır. İki durum arasındaki bu fark; UGH sonuçları ile basınç dayanım sonuçlarını bu noktada birbirinden ayırmış ve birbiri ile aralarında nispeten daha düşük bir korelasyon oluşmasına neden olmuştur. Bu çalışmada, hazırlanan hamur numunelerinde yüksek aktivatör modülü ve alkali dozajı ile birlikte PC'nin dahil edilmesi, kürlenme süresi uzadıkça büzülmeyle ilişkili çatlakların oluşmasına neden olmuştur. Basınç dayanımı ve UGH ölçümlerinin çatlak oluşumuna göre gelişen farklı hassasiyetleri, hesaplanan düşük belirleme katsayısında önemli rol oynamıştır [102].

6.3. Priz Süresi Sonuçları

Priz süresi deneyi için, basınç dayanımı sonuçları göz önüne alındığında en iyi sonuçları veren M1.2/N5/P10 ve M1.5/N5/P0 numuneleri özellikle seçilerek bunlara ek olarak birkaç kombinasyon daha ilave edilerek sonuçları şekil 6.6'da gösterilmiştir.



Şekil 6.6. %5 Alkali dozajına sahip farklı modüldeki karışımların priz süreleri

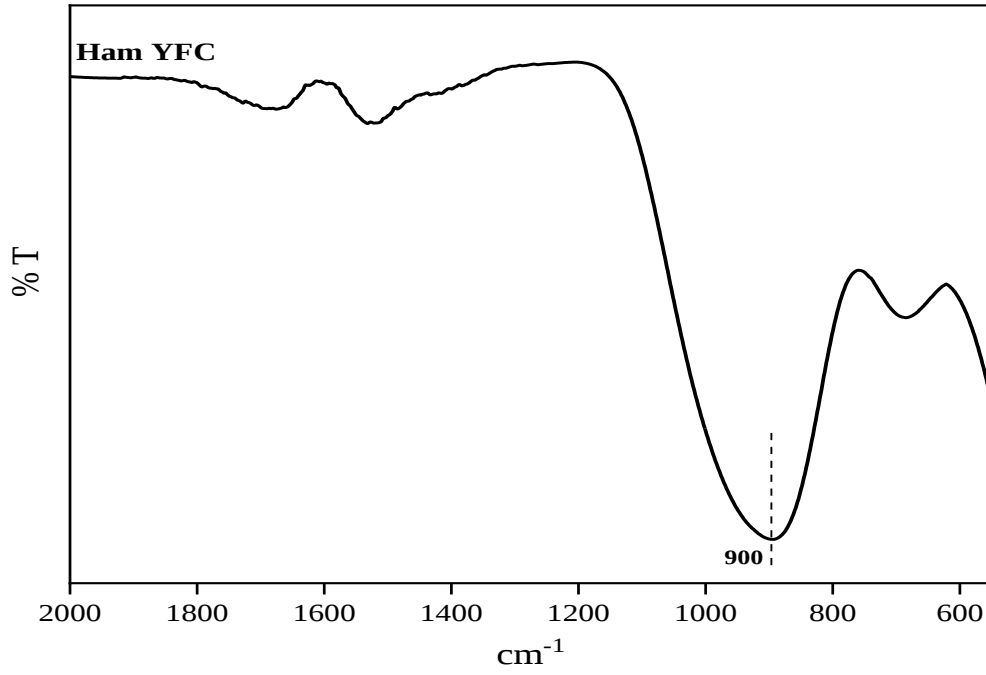
Çimento içeren malzemeler, plastik özelliklerini kaybetmeden iyi bir karışım ve döküm için yeterli bir priz süresine sahip olmalıdırlar [102]. ASTM C595 [107] uyarınca, Portland yüksek fırın cürufu çimentosunun en az 45 dakikalık bir priz başlangıç süresine sahip olması ve son priz süresinde 7 saati geçmemesi gerekmektedir. PC içermeyen, sırasıyla 1.2 ve 1.5 alkali modülüne sahip M1.2/N5/P0 ve M1.5/N5/P0 karışımlarının 2°'lik bir kütleme sıcaklığında priz alma süreleri şekil 6.6'te görülmektedir. Bununla birlikte 1.2 alkali aktivatör modülüne sahip karışım, 90 gün sonunda iyi bir basınç dayanımı performansı sergilerken, nispeten daha yavaş bir mukavemet kazanım özelliği göstermiştir. 1.2 aktivatör modülünde PC ikame oranını %10'a çıkarmak basınç dayanımı açısından iyi bir performans sağlasa da, priz süresini kısaltması M1.2/N5/P10 numunesi için sınırlayıcı bir özellik olarak ortaya çıkmıştır. PC içermeyen karışım için; alkali modülünün 1.2'den 1.5'e artırılması, priz süresi üzerinde büyük bir değişime neden olmamıştır. Modülün 1.2'den 1.5'e yüksetilmesi, son priz süresini 285 dakikadan 280 dakikaya düşürmüştür. Chen ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada [108], silikat

modülündeki artışla priz süresinin uzadığı, ancak modülde daha fazla artışla aktivatördeki aşırı silikatın AAC macunu üzerinde geciktirici bir etkiye neden olduğu belirtilmiştir. Makhadmeh vd. yaptığı başka bir çalışmada [101], yüksek alkali dozajı durumunda, aktivatörde bulunan silikatlardaki artışın, priz süresi üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu bildirilmiştir. PC'nin AAM'ye dahil edilmesi, karışım numunelerinin karakteristik bir özelliği olan priz süreleri değerlerinde azalmaya neden oldu [109]. Alkali modülünün 1.2 olduğu karışımlara sırasıyla %10 ve %20 PC ikamesi yapıldığında son priz süreleri 285 dakikadan sırasıyla 47 ve 18 dakikaya düştü. Modül 1.5 olduğunda ise; yine 280 dakikalık priz süresi, 32 ve 14 dakikaya kadar azaldı. PC ile su reaksiyona girdiğinde, koloidal olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ parçacıklarını üretir ve yüksek çözünürlükleri nedeniyle de Ca^{2+} iyonları ve pH değerlerinde artışa sebep olur. Artan pH; Ca^{2+} , A^{3+} , $\text{Si}(\text{OH})_4$ ve $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 'ü açığa çıkararak YFC'nin çözünmesini hızlandırır. Çözelti içerisindeki iyonların doygunluğu, bu iyonların arasındaki bağ çekirdeklenmesini ve büyümesini teşvik eder. Tüm bu olaylara eş zamanlı olarak; ısı, alüminosilikat parçacıklarının çözünmesini kolaylaştırarak karışımdaki sertleşme süresini toplu olarak azaltır [17].

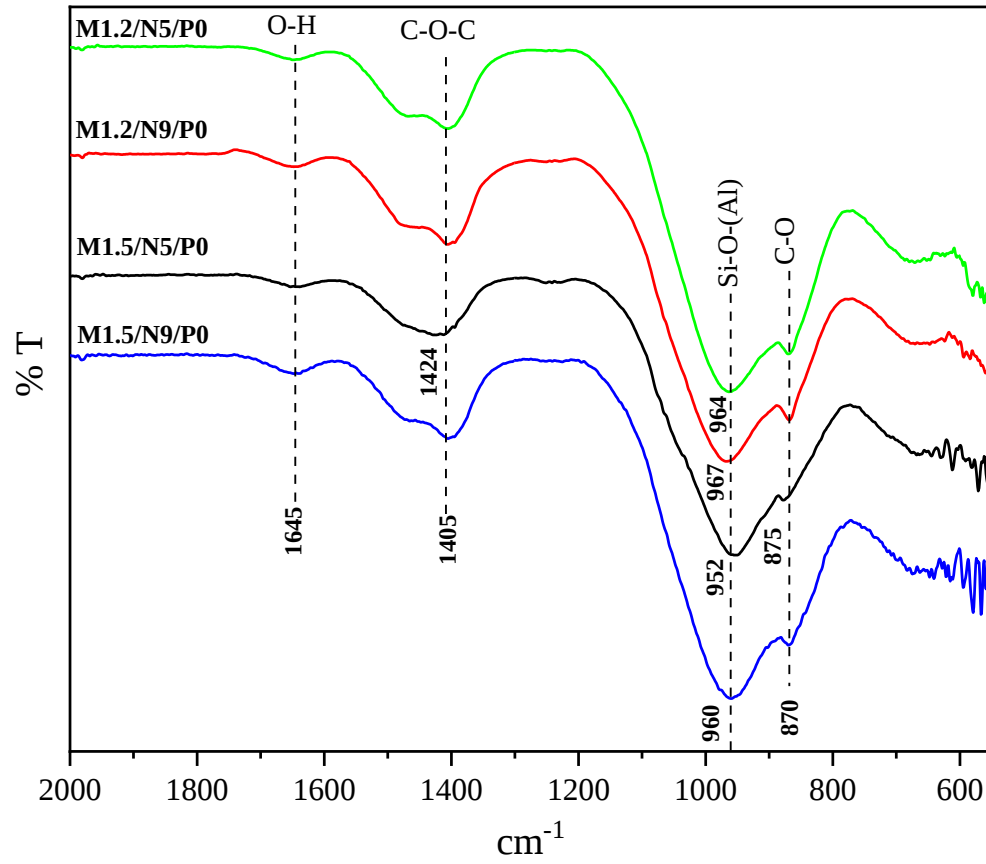
6.4. Fır Analizi Sonuçları

Tepkimeye girmemiş YFC' nin fır spektrumları şekil 6.7.'de farklı alkali aktivatörü ve alkali dozajlarının etkisinde kürlenmiş numunelerin 28 gün sonundaki fır spektrumları ise şekil 6.8.'de gösterilmiştir.

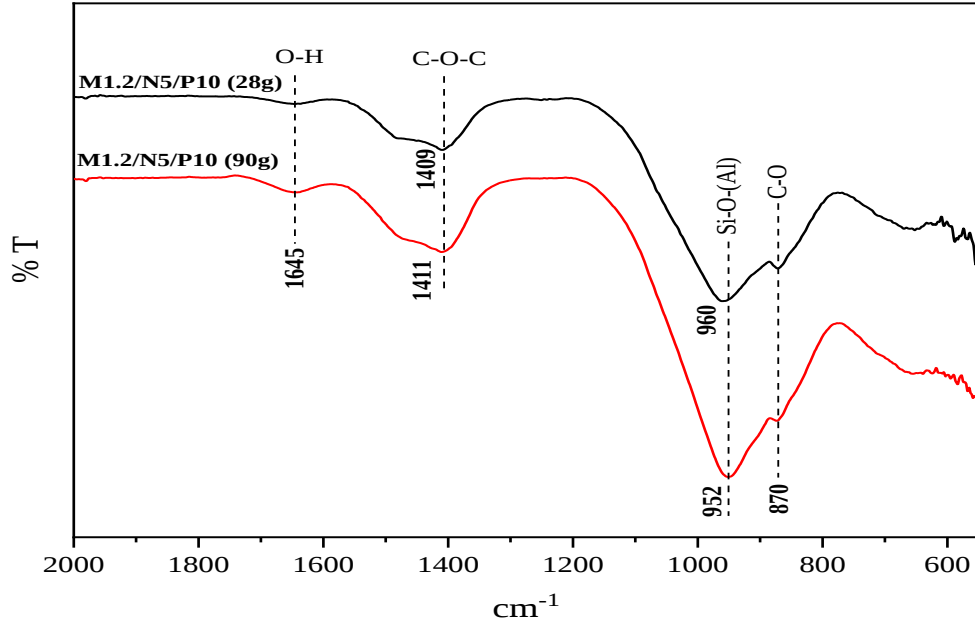
Şekil 6.9'da ve 6.10'da ise; M1.2/N5/P10 ve M1.5/N5/P0 olarak isimlendirilen numunelerin 28 ve 90 gün sonunda elde edilen fır spektrumları gösterilmiştir.



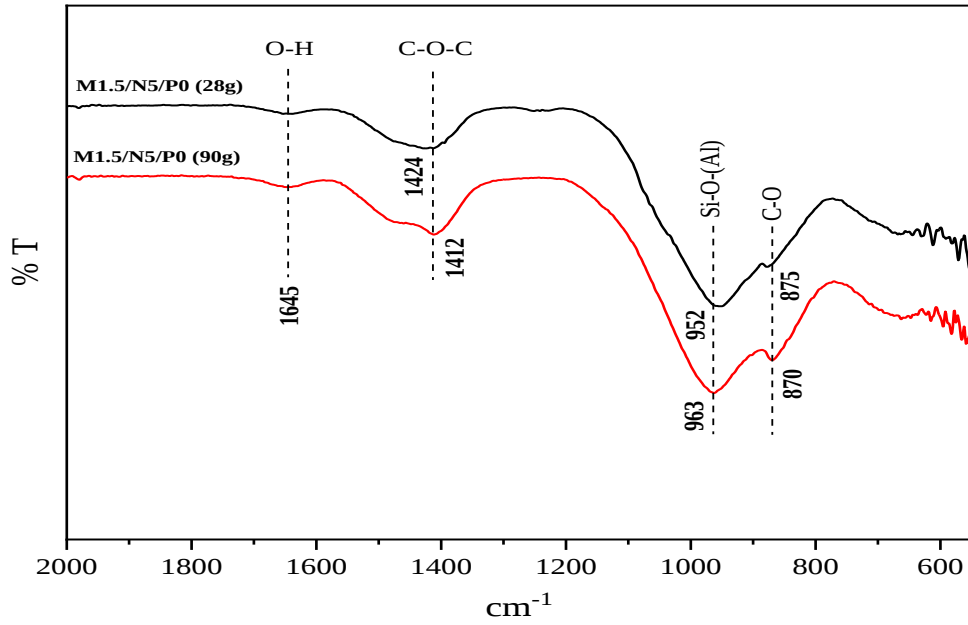
Şekil 6.7. YFC'nin Ftır Spektrumları



Şekil 6.8. Farklı Alkali Aktivatörü ve Etkisindeki numunelerin FTIR spektrumları



Şekil 6.9. M1.2/N5/P10 Numunesinin 28 ve 90 gün sonundaki Ftır Spektrumları



Şekil 6.10. M1.5/N5/P0 Numunesinin 28 ve 90 gün sonundaki Ftır Spektrumları

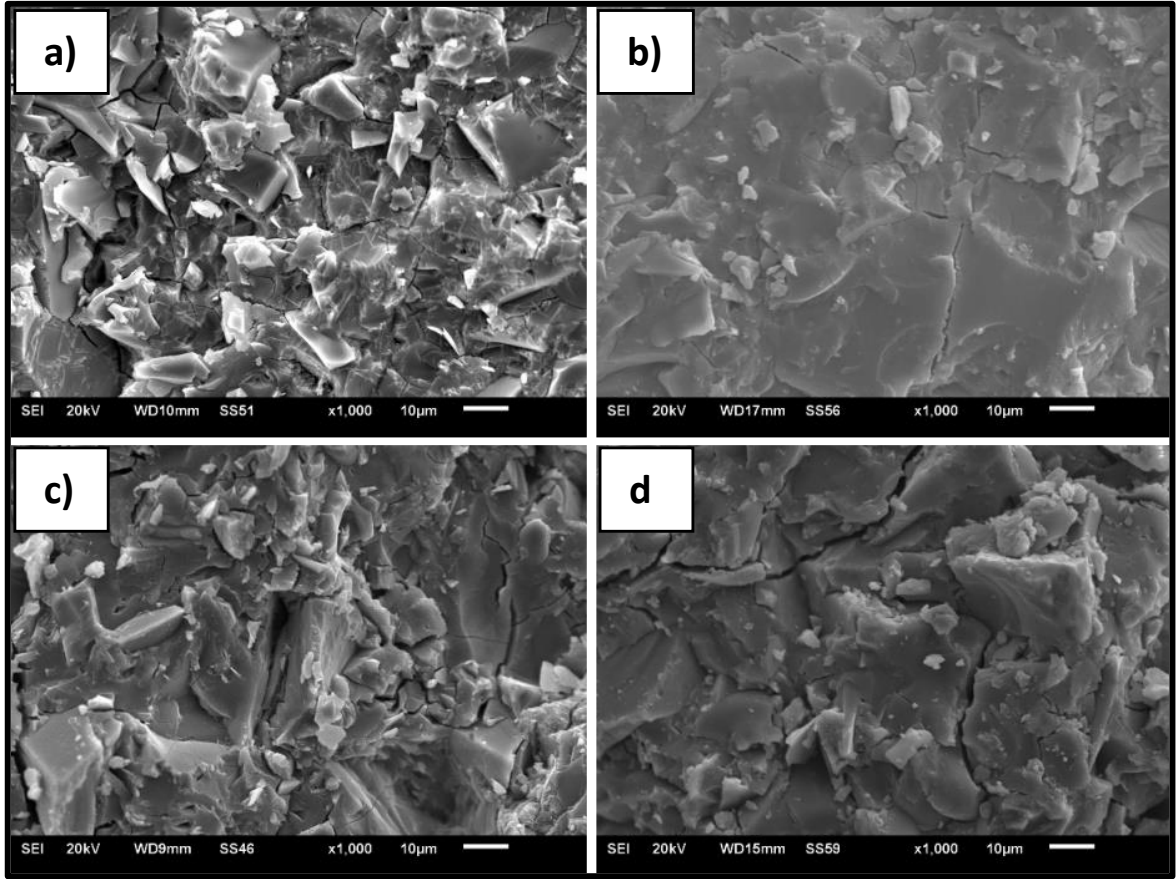
Ftır analizi için bu numunelerin seçilme sebebi; M1.2/N5/P10 numunesi PC içeren numuneler arasında, M1.5/N5/P0 numunesinin ise PC içermeyen numuneler arasında en yüksek 90 günlük dayanım sonucunu vermesidir.

Spektrumların dalgalanma şekilleri benzerlik gösterse de yoğunluklarda farklılıkların olduğu gözlenmektedir. 1645 cm^{-1} ' deki dalgalanmalar su içerisindeki temel O-H bağının gerilme ve bükülme titreşimleri nedeniyle oluşmuştur [67,110]. Bu gözlem, seçilen numunelerde hidratlı fazların olduğunu göstermektedir [111,112]. Spektrumlarda $1405\text{--}1424\text{ cm}^{-1}$ aralığında karbonat izleri tespit edilmiştir. Bu dalgalanmalar O – C – O bağlarının asimetrik gerilme modu ile ilişkilendirilmiştir [67]. Havadan gelen CO_2 'nin absorbe edildiğini ve numunelerin karıştırma ve döküm işlemleri sırasında karbonatların oluşumuna yol açtığını göstermektedir [113]. M1.2/N5/P10 numunesinde bulunan karbonatların varlığı, çimento karışımı fonksiyonundaki karbonat içeriğine de bağlanabilir [67,114,115]. Spektrumlarda, 960 cm^{-1} değerlerinde meydana gelen Si-O bağıyla ilişkili en belirgin dalgalanma, C-S-H ve C-A-S-H jelinin oluşmasına karşılık gelir. Bunun nedeni ise, tipik olarak AAC veya hibrit bağlayıcıların özelliklerine bağlanır [67]. $870\text{--}875\text{ cm}^{-1}$ aralıklarında; keskin bir dalgalanmanın olması , numunelerdeki çözünür alkali türlerinin karbonatlaşması ile ilgilidir [116]. Ftr spektrumlarında $1405\text{--}1424\text{ cm}^{-1}$ arasındaki dalgalanmanın yoğunlaşması ve $870\text{--}875\text{ cm}^{-1}$ arasındaki dalgalanmanın görülmesi, numunelerde daha fazla karbonat bulunduğunu göstermektedir [80]. Tepkimeye girmemiş YFC' ilişkin olarak, Si-O bağı yaklaşık 900 cm^{-1} yer almaktadır; dalga sayısında ki yükselme, daha yüksek polimerize olmuş bir Si-O ağının oluştuğunu göstermektedir. Hidrasyon ürünlerini temsil eden tepe noktasının genel konumunun; aktivatör modülü ve alkali dozajından bağımsız olarak tutarlı kaldığı sonucuna varılabilir. Ancak, bu tepe noktalarının yoğunluklarında belirgin bir farklılık vardır. AAC'nin basınç dayanımı; özellikle aktivasyon süreci sırasında oluşan jelin türü ve konsantrasyonu olmak üzere mikro yapısal özellikleriyle doğrudan ilgilidir. Ftr spektrumlarındaki Si-O bağ bandının yoğunluğu, bu malzemelerin içindeki jel oluşumunun temel bir göstergesi olarak karşımıza çıkar. Alkali modülü 1.2 ve 1.5 gibi farklı değerler olan numuneleri karşılaştırmak, mikro yapısal varyasyonlara ilişkin önemli çıkarımlar sunar. 1.5 alkali modülüne sahip numunelerde ki yüksek Si-O bağ bandı yoğunluğu; 1.2 alkali modülüne sahip numuneye göre daha yüksek bir C-S-H veya C-(A)-S-H konsantrasyonuna işaret eder. Bu durum; bizlere, 1.5 modüle sahip AAC'nin daha bol ve yoğun polimerize bir jel yapısına sahip olduğunu gösterir. Bu geliştirilmiş jel yapısı, özellikle 28. günde belirgin bir şekilde gözlenen mukavemet gelişimi ile ilişkilidir. Bu durum, AAC'nin mekanik özelliklerini belirlemede jel oluşumunun kritik rolünü vurgular [67,108]. Bahsedilen durumun önemi, bu malzemelerin düşük sıcaklıklarda

kürlenmesiyle ortaya çıkar. Normal sıcaklık değerlerinde kürlenme gerçekleştiğinde, genellikle 675 cm^{-1} değerleri civarında oluşan emilim zirvesinin, $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de oluşmadığı görülmektedir. Bu durum, düşük sıcaklıkların C-S-H' deki köprü pozisyonunun oluşumuna elverişli olmadığını göstermektedir [67]. M1.5/N5/P0 numunesinin fır spektrumları, 28 ile 90 gün arasında sınırlı bir değişim göstermektedir. 28 günlük sonuçta 952 cm^{-1} 'deki SiO bağı yoğunluğu, 90 günün sonunda 963 cm^{-1} değerine kaydı. Öte yandan 90 günlük M1.2/N5/P10 numunesi, 28 günlük numuneye göre daha keskin ve daha güçlü bir Si-O bağı oluşumu gösterdi; bu durum da, ilgili numunenin 90. gün sonundaki mukavemeti ile tutarlılık göstermiştir.

6.5. Sem Analizi Sonuçları

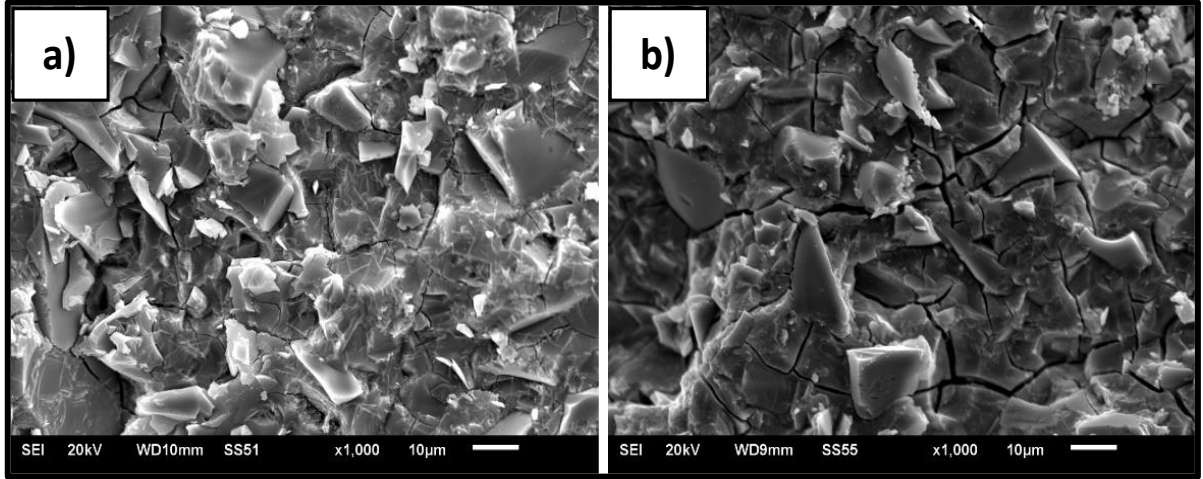
Şekil 6.11'de 28 ve 90 gün sonunda M1.5/N5/P0 ve M1.2/N5/P10 numunelerine ait sem görüntüleri gösterilmiştir. Sem değerleri için bu numunelerin seçilme sebebi; ilgili numunelerin, PC içeren ve PC içermeyen numuneler arasında en yüksek 90 günlük dayanımı vermeleridir.



Şekil 6.11. a-b) M1.5/N5/P0 numunesinin 28 ve 90 günlük Sem görüntüleri
c-d) M1.2/N5/P10 numunesinin 28 ve 90 günlük Sem görüntüleri

PC içermeyen M1.5/N5/P0 karışıma ait 28 günlük görüntülemelerde, keskin kenarlara sahip, hidratlanmamış YFC parçacıkları açık bir şekilde görülmektedir. %10 PC içeren M1.2/N5/P10 örneğinin Sem görüntüsü incelendiğinde yine hidratlanmamış YFC parçacıkları görülmüştür ancak burada YFC miktarına önceki örneğe göre daha az rastlanmıştır. Bu durumun nedeni; kalsiyum oksit ve H_2O kombinasyonu ile artan hidrasyon ısısı salınımı ve kalsiyum konsantrasyonlarının etkisine bağlanabilir [17]. Şekil 6.11.(a-b)'de gösterildiği gibi yapı, kürlenme süresi arttıkça yoğunlaşır. Daha düşük sıcaklıklarda kürlenmiş numunelerde, Kürlenme süresinin uzaması ve reaksiyonların ilerlemesiyle, hidratlanmamış YFC parçacıkları reaksiyona entegre olarak daha kompakt bir yapıya katkıda bulunmaktadır. Bu numunelerin 28 günlük sonuçlara kıyasla 90 günün sonunda yaklaşık %50 oranında bir dayanıklılık artışı göstermesi dikkat çekicidir [17,117]. 90 günlük numunelerdeki mikro çatlaklar her iki durumda da açıkça görülmüş ve bunun nedeni kuruma büzülmesine bağlanmıştır [60,118]. AAC örneğinin PC ile erken reaksiyondaki önemli sıcaklık farkı daha fazla termal strese neden olarak daha yoğun ve

daha geniş çatlaklar oluşmasına yol açmıştır [18]. Şekil 6.12’de sabit bir aktivatör modülünde PC içermeyen numunelerin mikro yapısındaki değişimler görülmektedir. AAC’de yaygın olarak görülen çatlaklar, her iki alkali dozajlı örnekte de belirgin şekilde görülmüştür [119,120].



Şekil 6.12. a) (M1.5/N5/P0) numunelerin mikro yapısındaki değişim
b) (M1.5/N9/P0) numunelerin mikro yapısındaki değişim

Alkali dozajının %5’ten %9’a yükseltilmesi, öncelikle yüksek büzülme deformasyonuna bağlanan çatlakların kapsamını belirgin şekilde artırmıştır [121]. Şekilde görüldüğü gibi, keskin kenarlı ve hidratlanmamış YFC parçacıkları, %9 alkali dozajlı M1.5/N9/P0 numunesinde de gözlenmiştir. Alkali dozajındaki artış, Al-O-Al çerçevesinin oluşumunu etkileyen daha fazla ağ kırıcı katyon sağlar. Bu durum nihayetinde Si türlerini barındırır. Sonuç olarak, bu alkali seviyesinde oluşan reaksiyon ürünlerinin, cüruf parçacıklarını sararak daha fazla reaksiyonu yeterince engellemesi beklenir [100].

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında; değişik oranlarda alkali ile aktif edilmiş YFC ve PC kullanılarak beton hamur karışımları hazırlanmış ve bu karışımlara düşük sıcaklıkta (2 °C) kürleme işlemleri yapılmıştır. Daha sonra 7, 28 ve 90. günler sonunda bu numunelere bazı deneyler yapılarak, düşük sıcaklık ortamlarının alkali – aktif YFC’ler ile üretilmiş beton hamur karışımları üzerindeki üretim parametreleri araştırılmıştır. Bu çalışmaların sonuçları aşağıda açıklanmıştır.

- Numunelerin, aktivatör modülü ve alkali dozajlarının değiştirilmesinin özellikle erken yaş basınç dayanımını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır.
- 7 günlük basınç dayanımları incelendiğinde; alkali modülünün ve alkali dozajının yüksek olduğu numunelere PC eklendiğinde, bu durumun 2°C’de kürlenene alkali – aktif YFC’li numunelerde büzülme çatlaklarına sebep olarak basınç dayanımını azalttığı sonucuna varıldı. Alkali modülünün, düşük sıcaklıklardaki kürleme koşullarının etkisi altında kaldıklarında AAC’nin erken yaştaki dayanımına belirgin bir etkisi olduğu görüldü.
- 28 günlük sonuçlara bakıldığında ise; 1.2 alkali modüle sahip numunelere PC ilave edildiğinde 28 günlük basınç dayanımında bir artış olduğu görülürken, 1.5 alkali modüle sahip numunelere PC ikamesi yapıldığında tam tersi basınç dayanımlarının genellikle daha düşük değerlerde kaldığı görüldü, bunun nedeni olarakta yüksek alkali dozajı ve PC ikamesinin özellikle çatlak oluşumuna bağlı dayanım azalmasına neden olduğu sonucuna varıldı.
- 90 günlük sonuçlar incelendiğinde; yine 28 günlük sonuçlara benzer şekilde alkali dozajının arttığı kombinasyonlarda daha iyi basınç dayanımı sonuçlarını, düşük PC içeren numuneler vermiştir.

- 90 günün sonunda en yüksek basınç dayanımına ulaşan numuneler; 1.2 aktivatör modülünde M1.2/N5/P10 (79.2MPa) numunesi olurken, 1.5 modüle sahip numuneler içinde M1.5/N5/P0 (69.5 MPa) numunesi en yüksek sonuca ulaşmıştır.
- UGH hızları; 7 ve 28. günlerde ölçülen basınç dayanımı ile güçlü bir korelasyon göstermiştir. Benzer numunelerde birbirine yakın artışlar görülmüştür. Öyle ki; bu iki önemli kriter için belirleme katsayısı sırasıyla 0,91 ve 0,89 olarak hesaplanmıştır.
- 90. gün sonundaki UGH hızları incelendiğinde; aktivatör modülünün 1.5 'e çıkarılması , alkali dozajının yükseltilmesi ve PC ilave edilmesi ile birlikte, numunelerde meydana gelen büzülme ve çatlakların etkisi nedeniyle, basınç dayanımlarındaki sonuçların ters istikametinde, UGH hızlarında büyük düşüşler görülmüştür. İki kriter için belirleme katsayısı 0,64'e kadar düşmüştür.
- Priz süresi tayini ile ilgili olarak; aynı alkali dozajına sahip, PC'nin olmadığı alkali modülünün 1.2 ve 1.5 olduğu numunelerde (M1.2/N5/P0) ve (M1.5/N5/P0), priz süresi çok daha ideal ve birbirine yakın değerlerde tespit edilmiştir. Öyle ki priz başlangıcı, 1.2 alkali modülünde 110 dakika olurken, 1.5 alkali modülünde ki numunede bu değer 101 dakika ölçülmüştür. Priz tamamlanma süreleri de yine birbirine çok yakın olan sırasıyla 285 ve 280 dakika olarak ölçülmüştür. Söz konusu numunelere sırasıyla %10 ve %20 PC eklenmesi sonrası priz başlangıç ve priz tamamlanma süreleri; PC'nin su ile girdiği kimyasal reaksiyonlar ve bu reaksiyonlarla oluşan ürünlerin neden olduğu bazı tepkimeler nedeniyle belirgin bir şekilde azalmıştır. M1.2/N5/P10 ve M1.2/N5/P20 için priz başlangıç süreleri sırasıyla 16 ve 5 dakikaya ; priz tamamlanma süreleri ise sırasıyla 47 ve 18 dakikaya kadar düşmüştür. M1.5/N5/P10 ve M1.5/N5/P20 numuneleri için ise priz başlangıç süreleri sırasıyla 10 ve 3 dakikaya, priz tamamlanma süreleri ise sırasıyla 32 ve 14 dakika gibi daha düşük seviyelere gelmiştir.
- Fır analizleri gerçekleştirmek için 90 günlük en yüksek basınç dayanımı gösteren PC ikameli M1.2/N5/P10 ve PC ikamesiz M1.5/N5/P0 karışımlarının 28 ve 90 günlük numuneleri incelendi. Bu fır spektrumlarında O – C – O bağlarının asimetrik gerilme modlarından kaynaklı $1405-1424\text{ cm}^{-1}$ aralığında karbonat izleri tespit edilmiştir. Ayrıca ilgili spektrumlarda C-S-H ve C-A-S-H jelinin oluşmasından kaynaklı olduğu düşünülen

960 cm^{-1} değerlerinde, Si-O bağıyla ilişkili en belirgin dalgalanma görülmüştür. Alkali modülü 1.5 olan numunede ki Si-O bağ bandının yoğunluğunun çok daha yüksek olmasının nedeni ise; bu numunenin, alkali modülü 1.2 olan numuneye göre çok daha yüksek bir C-S-H veya C-(A)-S-H konsantrasyonu olduğuna bağlanmıştır. Bu durumun sonucunda ise, alkali modülü 1.5 olan AAC'nin daha bol ve yoğun polimerize bir jel yapısına sahip olduğu kanısına varılmıştır. Yoğun ve kuvvetli bu jel yapısı 28. günde belirgin bir şekilde görülen mukavemet artışı ile ilişkilendirilmiştir.

- Sem analizlerini gerçekleştirmek içinde birçok farklı numune kullanılmıştır. İlk olarak 28 günlük numuneler incelendiğinde; M1.5/N5/P0 numunesinde M1.2/N5/P10 numunesine göre, çok daha keskin, hidratlanmamış YFC parçacıkları görülmüştür. Bunun nedeninin, bu numunenin PC içermemesinden dolayı kalsiyum oksit ve H_2O kombinasyonu ile artan hidrasyon ısısal salınımı ve kalsiyum konsantrasyonlarının gerçekleşmemesi olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, böyle daha düşük sıcaklıklarda kürleme işlemi gerçekleşen numunelerde özellikle CaO kaynağı kullanılmadığında, tepkimeye girmeyen parçacıklar daha fazla ve daha net bir şekilde görüldüğü kanısına varılmıştır.
- 90 günlük sem analizleri incelendiğinde ise; kuruma büzülmesine bağlı iki numunede de mikro çatlaklar görülmüştür. Yine PC'li numunede erken yaşta ki önemli sıcaklık farkının, daha geniş ve daha yoğun çatlaklar oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Alkali dozajının %5'ten %9'a çıkarıldığı numunelerde ise yüksek büzülme deformasyonuna bağlanan çatlakların belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca M1.5/N9/P0 numunesinde de hidratlanmamış YFC parçacıkları fazlasıyla görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Erdogan, TY., *Beton* 2003.
- [2] Lehne, J., Preston F. Making Concrete Change; *Innovation in Low-carbon Cement and Concrete*. Chatham House Rep 2018.
- [3] Olivier, JGJ., Janssens-Maenhout, G., Muntean, M. and Peters, J. Trends in Global CO₂ Emissions: 2016 Report; PBL Netherlands Environmental Assessment Agency: The Hague. PBL Netherlands Environ Assess Agency Eur Comm Jt Res Cent 2016.
- [4] Dener, M. Alkali- aktif yüksek fırın cürufu bağlayıcılı hafif agrega ile üretilen kendiliğinden yerleşen harçların mühendislik özellikleri. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi. 2022.
- [5] Andrew, RM. Global CO₂ emissions from cement production. *Earth Syst Sci Data Discuss* 2017:1–52. <https://doi.org/10.5194/essd-2017-77>.
- [6] Gartner, E. *Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements*. *Cem Concr Res* 2004;34:1489–98.
- [7] Provis, JL., Palomo, A. and Shi, C. *Advances in understanding alkali-activated materials*. *Cem Concr Res* 2015;78:110–25. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.13>.
- [8] Juenger, MCG., Winnefeld, F., Provis, JL. and Ideker, JH. *Advances in alternative cementitious binders*. *Cem Concr Res* 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.12>.
- [9] World Health Organization (2018). COP24 special report: *health and climate change*.
- [10] Provis, JL. *Alkali-activated materials*. *Cem Concr Res* 2018;114:40–8. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.09>.
- [11] Balun, B. The investigation of bitlis pumice based alkali activated hybrid binders production. PhD Thesis, University of Fırat. 2019.
- [12] Aydın, S. *Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcılı Lifli Kompozit Geliştirilmesi* 2010.

- [13] Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C. and Van Deventer, J.S.J. *The role of inorganic polymer technology in the development of “green concrete.”* Cem Concr Res 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.018>.
- [14] Alharbi, N., Varela, B. and Hailstone, R. *Alkali-activated slag characterization by scanning electron microscopy, X-ray microanalysis and nuclear magnetic resonance spectroscopy.* Mater Charact 2020;168:110504. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110504>.
- [15] Ju, C., Ye, R., Wu, Y., Sun, P., Liu, Y. and Yang, Y. *Effect of Alkali Cation on Performance of Alkali-Activated Slag Mortar in Cold Environments.* Separations 2022;9. <https://doi.org/10.3390/separations9120450>.
- [16] Yu, K., Jia, M., Yang, Y. and Liu, Y. *A clean strategy of concrete curing in cold climate: Solar thermal energy storage based on phase change material.* Appl Energy 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120375>.
- [17] Ju, C., Liu, Y., Jia, M., Yu, K., Yu, Z. and Yang, Y. *Effect of calcium oxide on mechanical properties and microstructure of alkali-activated slag composites at sub-zero temperature.* J Build Eng 2020;32:101561. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101561>.
- [18] Yang, K., Yang, Y., Deng, J., Xiong, D., Zhu, X. and Li, Q. *Et al. Using calcium-rich precursors to improve the early-compressive strength of alkali-activated slag cement at low temperature.* Struct Concr 2022. <https://doi.org/10.1002/suco.202100021>.
- [19] Angulo-Ramírez, D.E., Mejía de Gutiérrez, R. and Puertas, F. *Alkali-activated Portland blast-furnace slag cement: Mechanical properties and hydration.* Constr Build Mater 2017;140:119–28. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.092>.
- [20] Aydin, S. and Baradan, B. *Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars.* Compos Part B Eng 2014;57:166–72. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.001>.
- [21] Scrivener, K.L. and Kirkpatrick, R.J. *Innovation in use and research on cementitious material.* Cem Concr Res 2008;38:128–36.
- [22] Olivier, J.G.J. and Peters, J.A.H.W. *Janssens-Maenhout G. Trends in global CO2 emissions.* 2012 report 2012.
- [23] Taylor, M., Tam, C. and Gielen, D. *Energy efficiency and CO2 emissions from the global cement industry.* Korea 2006;50:61–7.
- [24] Davidovits, J. *Geopolymer chemistry and applications.* Geopolymer Institute; 2008.

- [25] Van Deventer, JSJ., Provis, JL. and Duxson, P. *Technical and commercial progress in the adoption of geopolymers cement*. Miner Eng 2012;29:89–104. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.009>.
- [26] Provis, JL. and van Deventer, JSJ. Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM. Springer 2014;13:388.
- [27] Boden, TA., Andres, RJ. and Marland, G. *Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2 Emissions (1751 - 2014)*. 2017.
- [28] Poponi, D., Bryant, T., Burnard, K., Cazzola, P., Dulac, J. and Pales, AF. *Et al. Energy technology perspectives 2016: towards sustainable urban energy systems*. International Energy Agency; 2016.
- [29] Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Irving, W. and Krug, T. *2006 IPCC - Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. 2006.
- [30] KUEHL, H. US900939 A 1908.
- [31] Chassevent, L. 17. Cong. Chem Ind 1937;147.
- [32] Feret, R. *Slags for the manufacture of cement*. Rev Mater Constr Tr Publ 1939:1–145.
- [33] PURDON. *The action of alkalis on blast-furnace slag*.pdf 1940:191–202.
- [34] Buchwald, A., Vanooteghem, M., Gruyaert, E., Hilbig, H. and De Belie, N. *Purdocement: application of alkali-activated slag cement in Belgium in the 1950s*. Mater Struct Constr 2015. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0200-8>.
- [35] Krivenko, P V. *Alkaline cements*. Pdf 1994:11–129.
- [36] Palomo, A., Krivenko, P., Garcia-Lodeiro, I., Kavalerova, E., Maltseva, O. and Fernández-Jiménez, A. *A review on alkaline activation: new analytical perspectives*. Mater Construcción 2014;64:e022. <https://doi.org/10.3989/mc.2014.00314>.
- [37] Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. and Jalali, S. *Alkali-activated binders: A review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products*. Constr Build Mater 2008;22 , 1305–14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.15>.
- [38] Sarıdemir, M. *Alkali İle Aktif Edilmiş Ögütülmüş Diatomitli Harçların Dayanım Özellikleri*. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim Derg 2016;5:124–34.
- [39] Provis, JL. and Bernal, SA. *Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials*. Annu Rev Mater Res 2014 ; 44 , 299–327. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515>.

- [40] Allen, AJ., Thomas, JJ. and Jennings, HM. *Composition and density of nanoscale calcium-silicate-hydrate in cement*. Nat Mater 2007. <https://doi.org/10.1038/nmat1871>.
- [41] Provis, JL., Lukey, GC. and Van Deventer, JSJ. *Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? a reexamination of existing results*. Chem Mater 2005. <https://doi.org/10.1021/cm050230i>.
- [42] Fernández-Jiménez, A. and Palomo, A. *Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements*. Fuel 2003. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00194-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00194-7).
- [43] Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., Sobrados, I. and Sanz, J. *The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes*. Microporous Mesoporous Mater 2006. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.11.015>.
- [44] Fernández-Jiménez, A., Puertas, F., Sobrados, I. and Sanz, J. *Structure of calcium silicate hydrates formed in alkaline-activated slag: Influence of the type of alkaline activator*. J Am Ceram Soc 2003 ;86:1389–94. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2003.tb03481.x>.
- [45] Bakharev, T. *Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing*. Cem Concr Res 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.031>.
- [46] Criado, M., Palomo, A. and Fernández-Jiménez, A. *Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products*. Fuel 2005. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.03.030>.
- [47] Duxson, P., Provis, JL., Lukey, GC., Mallicoat, SW., Kriven, WM. and Van Deventer, JSJ. *Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties*. Colloids Surfaces A Physicochem Eng Asp 2005. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.06.060>.
- [48] Committee ACI (2010) Guide to cold weather concreting “ACI 306R-10,.” Am Concr Inst Farmingt Hills Mich USA ;401:402.
- [49] Meteoroloji Genel Müdürlüğü n.d. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=ISTANBUL> (accessed August 19, 2021).
- [50] Alzaza, A., Ohenoja, K. and Illikainen, M. *One-part alkali-activated blast furnace slag for sustainable construction at subzero temperatures*. Constr Build Mater 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122026>.
- [51] Alzaza, A., Ohenoja, K., Langås, I., Arntsen, B., Poikelispää, M. and Illikainen, M. *Low-temperature (−10 °C) curing of Portland cement paste – Synergetic effects of chloride-free antifreeze admixture, C–S–H seeds, and room-temperature pre-curing*. Cem Concr Compos 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104319>.

- [52] Lin, F. and Meyer, C. *Hydration kinetics modeling of Portland cement considering the effects of curing temperature and applied pressure*. Cem Concr Res 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.01.014>.
- [53] Un, H. and Baradan, B. *The effect of curing temperature and relative humidity on the strength development of Portland cement mortar*. Sci Res Essays 2011.
- [54] Soriano, L., Monzó, J., Bonilla, M., Tashima, MM., Payá, J. and Borrachero, M V. *Effect of pozzolans on the hydration process of Portland cement cured at low temperatures*. Cem Concr Compos 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.05.07>.
- [55] Dai, J., Wang, Q., Lou, X., Bao, X., Zhang, B. and Wang, J, et al. *Solution calorimetry to assess effects of water-cement ratio and low temperature on hydration heat of cement*. Constr Build Mater 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121222>.
- [56] Zhao, H., Jiang, K., Di, Y., Xu, W., Li, W. and Tian, Q, et al. *Effects of curing temperature and superabsorbent polymers on hydration of early-age cement paste containing a CaO-based expansive additive*. Mater Struct Constr 2019. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1407-0>.
- [57] Sargam, Y. and Wang, K. *Hydration kinetics and activation energy of cement pastes containing various nanoparticles*. Compos Part B Eng 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108836>.
- [58] Bentz, DP. *Activation energies of high-volume fly ash ternary blends: Hydration and setting*. Cem Concr Compos 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.06.18>.
- [59] Korhonen, CJ. *Antifreeze admixtures for cold regions concreting: a literature review* 1990.
- [60] Zhang, H., Ai, J., Ren, Q., Zhu, X., He, B. and Jiang, Z. *Understanding the strength evolution of alkali-activated slag pastes cured at subzero temperature*. Cem Concr Compos 2023, 138:104993. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.104993>.
- [61] Hu, Y., Miao, G. and Xiong, Y. *Mechanical Properties and Hydration Characteristics of Concrete Subject to Subzero Temperature Condition*. Jianzhu Cailiao Xuebao/Journal Build Mater 2017. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9629.2017.06.24>.
- [62] Husem, M. and Gozütok, S. *The effects of low temperature curing on the compressive strength of ordinary and high performance concrete*. Constr Build Mater 2005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.33>.

- [63] Liu, Z., Lou, B., Barbieri, DM., Sha, A., Ye, T. and Li, Y. *Effects of pre-curing treatment and chemical accelerators on Portland cement mortars at low temperature (5 °C)*. Constr Build Mater 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117893>.
- [64] Liu, Z., Sha, A., Hu, L. and Zou, X. *A laboratory study of Portland cement hydration under low temperatures*. Road Mater Pavement Des 2017. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1329857>.
- [65] Shirani, S., Cuesta, A., Morales-Cantero, A., De la Torre, AG., Olbinado, MP. and Aranda, MAG. *Influence of curing temperature on belite cement hydration: A comparative study with Portland cement*. Cem Concr Res 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106499>.
- [66] Liu, Y., Sun, F., Yu, K. and Yang, Y. *Experimental and numerical research on development of synthetic heat storage form incorporating phase change materials to protect concrete in cold weather*. Renew Energy 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.142>.
- [67] Zhang, G., Yang, H., Ju, C. and Yang, Y. *Novel selection of environment-friendly cementitious materials for winter construction: Alkali-activated slag/Portland cement*. J Clean Prod 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120592>.
- [68] American Concrete Institute (ACI) (2016). ACI 306R-10. Am Concr Inst .
- [69] Korhonen, CJ. *Off-the-shelf antifreeze admixtures* 2002.
- [70] Alzaza, A., Ohenoja, K. and Illikainen, M. *Enhancing the mechanical and durability properties of subzero-cured one-part alkali-activated blast furnace slag mortar by using submicron metallurgical residue as an additive*. Cem Concr Compos 2021; 122 : 104128. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104128>.
- [71] Polat, R. *The effect of antifreeze additives on fresh concrete subjected to freezing and thawing cycles*. Cold Reg Sci Technol 2016. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.04.008>.
- [72] Demirboğa, R., Karagöl, F., Polat, Ri. and Kaygusuz, MA. *The effects of urea on strength gaining of fresh concrete under the cold weather conditions*. Constr Build Mater 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.008>.
- [73] Haque, MA. and Chen, B. *Research progresses on magnesium phosphate cement: A review*. Constr Build Mater 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.304>.
- [74] Wang, S., Jian, L., Shu, Z., Wang, J., Hua, X. and Chen, L. *Preparation, properties and hydration process of low temperature nano-composite cement slurry*. Constr Build Mater 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.049>.

- [75] Görhan, G. and Kürklü, G. *The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures*. Compos Part B Eng 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.082>.
- [76] Xie, T. and Özbakkaloglu, T. *Behavior of low-calcium fly and bottom ash-based geopolymer concrete cured at ambient temperature*. Ceram Int 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.01.031>.
- [77] Amer, I., Kohail, M., El-Feky, MS., Rashad, A. AND Khalaf, MA. *A review on alkali-activated slag concrete*. Ain Shams Eng J 2021;12:1475–99. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.12.003>.
- [78] Bakharev, T., Sanjayan, JG. and Cheng, YB. *Alkali activation of Australian slag cements*. Cem Concr Res 1999. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00170-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00170-7).
- [79] Xiang, J., He, Y., Liu, L., Zheng, H. and Cui, X. *Exothermic behavior and drying shrinkage of alkali-activated slag concrete by low temperature-preparation method*. Constr Build Mater 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120056>.
- [80] Ya-min, G., Yong-hao, F., Duo, Y., Yong-fan, G. and Chen-hui, Z. *Properties and microstructure of alkali-activated slag cement cured at below- And about-normal temperature*. Constr Build Mater 2015;79:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.068>.
- [81] Gebregziabihier, BS., Thomas, RJ. and Peethamparan, S. *Temperature and activator effect on early-age reaction kinetics of alkali-activated slag binders*. Constr Build Mater 2016;113:783–93. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.098>.
- [82] Altan, E. and Erdoğan, ST. *Alkali activation of a slag at ambient and elevated temperatures*. Cem Concr Compos 2012 ; 34:131 – 9.
- [83] Yang, K., Yang, C., Zhang, J., Pan, Q., Yu, L. and Bai, Y. *First structural use of site-cast, alkali-activated slag concrete in China*. Proc Inst Civ Eng Struct Build 2018. <https://doi.org/10.1680/jstbu.16.00193>.
- [84] Samantasinghar, S. and Singh, S. *Effects of curing environment on strength and microstructure of alkali-activated fly ash-slag binder*. Constr Build Mater 2020; 235 : 117481.
- [85] Wei, X., Li, D., Ming, F., Yang, C., Chen, L. and Liu, Y. *Influence of low-temperature curing on the mechanical strength, hydration process, and microstructure of alkali-activated fly ash and ground granulated blast furnace slag mortar*. Constr Build Mater 2021 ; 269 : 121811.
- [86] Chang, JJ. *A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes*. Cem Concr Res 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01096-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01096-7).

- [87] Elyamany, HE., Abd Elmoaty, M. and Elshaboury, AM. *Setting time and 7-day strength of geopolymer mortar with various binders*. Constr Build Mater 2018 ; 187 : 974–83.
- [88] Uygunoğlu, T. and Hocaoglu, İ. *Effect of electrical curing application on setting time of concrete with different stress intensity*. Constr Build Mater 2018 ; 162 : 298 – 305.
- [89] Guo, S., Zhang, Y., Wang, K., Bu, Y., Wang, C., Ma, C., et al. *Delaying the hydration of Portland cement by sodium silicate: Setting time and retarding mechanism*. Constr Build Mater 2019 ; 205 : 543 – 8.
- [90] Shi, C., Roy, D. and Krivenko, P. *Alkali-activated cements and concretes*. CRC press; 2003.
- [91] Granizo, ML., Alonso, S., Blanco-Varela, MT. and Palomo, A. *Alkaline activation of metakaolin: effect of calcium hydroxide in the products of reaction*. J Am Ceram Soc 2002 ; 85 : 225 – 31.
- [92] Garcia-Lodeiro, I., Fernandez-Jimenez, A. and Palomo, A. *Hydration kinetics in hybrid binders: Early reaction stages*. Cem Concr Compos 2013;39:82–92. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.25>.
- [93] Way, SJ. and Shayan, A. *Early hydration of a Portland cement in water and sodium hydroxide solutions: composition of solutions and nature of solid phases*. Cem Concr Res 1989 ; 19 : 759 – 69.
- [94] Türker, HT., Balçıkanlı, M., Durmuş, IH., Özbay, E. and Erdemir, M. *Microstructural alteration of alkali activated slag mortars depend on exposed high temperature level*. Constr Build Mater 2016 ; 104:169–80. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.70>.
- [95] ASTM Standard C191. Standard test methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. 2019.
- [96] ASTM C109/C109M A. Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in . or [50-mm] Cube Specimens) 1. Am Soc Test Mater 2007.
- [97] ASTM C597. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Am Soc Test Mater West Conshohocken, PA, USA 2016.
- [98] Nasr, D., Pakshir, AH. and Ghayour, H. *The influence of curing conditions and alkaline activator concentration on elevated temperature behavior of alkali activated slag (AAS) mortars*. Constr Build Mater 2018;190:108–19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.99>.

- [99] Fernández-Jiménez, A. and Puertas, F. *Effect of activator mix on the hydration and strength behaviour of alkali-activated slag cements*. Adv Cem Res 2003. <https://doi.org/10.1680/adcr.2003.15.3.129>.
- [100] Abubakr, AE., Soliman, AM. and Diab, SH. *Effect of activator nature on the impact behaviour of Alkali-Activated slag mortar*. Constr Build Mater 2020 ; 257 : 119531. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119531>.
- [101] Al Makhadmeh, W. and Soliman, A. *Effect of activator nature on property development of alkali-activated slag binders*. J Sustain Cem Mater 2020 ; 10 : 240– 56. <https://doi.org/10.1080/21650373.2020.1833256>.
- [102] Fang, S., Lam, ESS., Li, B. and Wu, B. *Effect of alkali contents, moduli and curing time on engineering properties of alkali activated slag*. Constr Build Mater 2020;249. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118799>.
- [103] Collins, F. and Sanjayan, JG. *Effect of pore size distribution on drying shrinking of alkali-activated slag concrete*. Cem Concr Res 2000 ; 30 : 1401 – 6.
- [104] Ye, H., Cartwright, C., Rajabipour, F. and Radlińska, A. *Understanding the drying shrinkage performance of alkali-activated slag mortars*. Cem Concr Compos 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.11.010>.
- [105] Bernal, SA. *Effect of the activator dose on the compressive strength and accelerated carbonation resistance of alkali silicate-activated slag/metakaolin blended materials*. Constr Build Mater 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.13>.
- [106] Živica, V. *Effects of type and dosage of alkaline activator and temperature on the properties of alkali-activated slag mixtures*. Constr Build Mater 2007. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.07.002>.
- [107] ASTM International. ASTM C595-17, Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. ASTM Int 2017.
- [108] Chen, W., Li, B., Wang, J. and Thom, N. *Effects of alkali dosage and silicate modulus on autogenous shrinkage of alkali-activated slag cement paste*. Cem Concr Res 2021;141. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106322>.
- [109] Balun, B. and Karataş, M. *Factors Affecting the Setting Times of Pumice Based Alkali-Activated Hybrid Cements*. Iran J Sci Technol Trans Civ Eng 2023;1–14.
- [110] Ibrahim, M., Megat Johari, MA., Rahman, MK. and Maslehuddin, M. *Effect of alkaline activators and binder content on the properties of natural pozzolan-based alkali activated concrete*. Constr Build Mater 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.163>.

- [111] Bernal, SA., Rodríguez, ED., De Gutiérrez, RM. and Provis, JL. *Performance at high temperature of alkali-activated slag pastes produced with silica fume and rice husk ash based activators*. Mater Constr 2015;65. <https://doi.org/10.3989/mc.2015.03114>.
- [112] Dener, M. *Mechanical and durability properties of alkali-activated slag/waste basalt powder mixtures*. Proc Inst Mech Eng Part L J Mater Des Appl 2023;14644207231193616.
- [113] Liu, L., Xu, Y., Liu, H., Xie, M., He, Y. and Shi, C. *Drying shrinkage and microstructure of alkali-activated slag with different mixing time at low temperatures (-5 to 5 °C)*. Constr Build Mater 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129529>.
- [114] Sakulich, AR., Miller, S. and Barsoum, MW. *Chemical and microstructural characterization of 20-month-old alkali-activated slag cements*. J Am Ceram Soc 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.03611.x>.
- [115] Sánchez, R., Palacios, M. and Puertas, F. *Characteristics and properties of oil-well cements additioned with blast furnace slag*. Mater Constr 2011. <https://doi.org/10.3989/mc.2010.54110>.
- [116] Rovnaník, P., Bayer, P. and Rovnaníková, P. *Characterization of alkali activated slag paste after exposure to high temperatures*. Constr Build Mater 2013;47:1479–87. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.070>.
- [117] El-Hassan, H. and Shehab, E. Al-Sallamin A. *Influence of Different Curing Regimes on the Performance and Microstructure of Alkali-Activated Slag Concrete*. J Mater Civ Eng 2018. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002436](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002436).
- [118] Puertas, F. and Torres-Carrasco, M. *Use of glass waste as an activator in the preparation of alkali-activated slag*. Mechanical strength and paste characterisation. Cem Concr Res 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.12.005>.
- [119] Lima, VME., Basto, PA., Henrique, MA., M. B. Almeida, Y. and De Melo Neto, AA. *Optimizing the concentration of Na₂O in alkaline activators to improve mechanical properties and reduce costs and CO₂ emissions in alkali-activated mixtures*. Constr Build Mater 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128185>.
- [120] Collins, F. and Sanjayan, JG. *Microcracking and strength development of alkali activated slag concrete*. Cem Concr Compos 2001. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00003-8).

- [121] Tran, TT. and Kwon, HM. *Influence of activator Na₂O concentration on residual strengths of alkali-activated slag mortar upon exposure to elevated temperatures*. Materials (Basel) 2018. <https://doi.org/10.3390/ma11081296>.