

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



**FARKLI C₃S İÇERİĞİNE SAHİP KLİNKERLERİN HİBRİT
ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ ÇİMENTO
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

MESUT TÜRKOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

OCAK - 2023
KASTAMONU

TEZ ONAYI

Mesut TÜRKOĞLU tarafından hazırlanan “**Farklı C₃S İçeriğine Sahip Klinkerlerin Hibrit Alkalilerle Aktive Edilmiş Çimento Özelliklerine Etkisi**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **19.01.2023** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Hasbi YAPRAK Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Gökhan KAPLAN Atatürk Üniversitesi	

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

Enstitü Müdürü V.

Doç. Dr. Osman ÇİÇEK

.....

TAAHHÜTNAME

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

Mesut TÜRKOĞLU

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI C₃S İÇERİĞİNE SAHİP KLİNKERLERİN HİBRİT ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ ÇİMENTO ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

MESUT TÜRKOĞLU

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DANIŞMAN:DR. ÖĞR. ÜYESİ OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

Yeni bir bağlayıcı için adaylardan biri %70'ten fazla ek çimento malzemesi (EÇM) ve eser miktarda bir alkali aktivatör içeren fakat %30'dan az Portland çimentosu içeren alkali hibrit çimentodur (AHÇ). Bu çimentomsu malzeme alkali ile aktive edilen malzemelerin (AAM) ve Portland çimentosunun faydalarına ek olarak yüksek erken dayanım, daha kompakt bir mikro yapı ve klorür penetrasyonuna ve sülfat saldırısına karşı olağanüstü direnç sunar. Bu çalışma, çimento klinker tipi, kütleme türü ve aktivatör dozajının tek bileşenli alkali ile aktifleştirilmiş hibrit klinker kompozitlerinin (AAHÇ) taze hal, mekanik, dayanıklılık ve mikroyapı özellikleri üzerindeki etkisini netleştirmeyi amaçlayan deneysel bir araştırmanın bulgularını sunmaktadır. Yayılma çapı, priz süresi, basınç dayanımı, kuru birim ağırlık, eğilme dayanımı, kuruma büzülmesi, kapilarite, taşıma özellikleri değerlendirilmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklık, sülfata maruz kalma, alkali-silika reaksiyonu (ASR) ve donma-çözülme (D-Ç) döngülerinde etkinliğinin araştırılması amaçlandı. 70/30 ve 90/10'luk iki YFC/Klinker oranı ve %10 ve %20 tek parça alkali aktifleştirici ilavesiyle toplam on iki AAHÇ karışımı yapıldı. Üç farklı çimento klinker tipi ve etüv kürü, su kürü ve buhar kürü olmak üzere üç kür şartı uygulandı. Sonuçlar, YFC/K3 oranı 90/10 olan ve %20 MS ile aktive edilen su ile kürlenmiş karışımın yaklaşık 65 MPa değerinde en yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu göstermiştir. YFC/K3 oranı 90/10 olan ve %10 MS ile aktive edilen buhar ve etüvde kürlenmiş karışımlar en iyi yüksek sıcaklık direncini göstermiştir. Buharda kürlenen aynı karışımlar ayrıca en iyi D-Ç direncine sahiptir.

ANAHTAR KELİMELE:Hibrit cüruf/klinker kompozitler; Tek parçalı alkali ile aktive edilmiş; Kütleme rejimi; Klinker tipi; Mekanik özellikler

Ocak 2023, 105 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

THE EFFECT OF CLINKERS WITH DIFFERENT C₃S CONTENT ON THE PROPERTIES OF HYBRID ALKALI-ACTIVATED CEMENT

MESUT TÜRKOĞLU

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

SUPERVISOR:ASSIST. PROF. OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

One candidate for a novel binder is alkaline hybrid cement (AHC), which has more than 70% supplemental cementitious materials (SCMs) and a trace amount of an alkali activator but less than 30% Portland cement. This cementitious material offers high early strength, a more compact microstructure, and outstanding resistance to chloride penetration and sulfate attack in addition to the benefits of alkali-activated materials (AAMs) and Portland cement. This study presents the findings of an experimental investigation that aims to clarify the effect of cement clinker type, curing regime and activator dosage on the fresh, mechanical, durability and microstructure properties of one-part alkali-activated hybrid slag/cement clinker composites (AAHC). Flow diameter, setting time, compressive strength, dry unit weight, flexural strength, drying shrinkage, sorptivity, transport properties were evaluated. It was also aimed to investigate its effectiveness at high temperatures, sulphate exposure, alkali-silica reaction (ASR) and freeze-thaw (F-T) cycles. A total of twelve AAHC mixtures were made with two GBFS/Clinker ratios of 70/30 and 90/10 and an external addition of 10% and 20% one-part alkali activator. Three different cement clinker types and three curing regimes including oven curing, water curing and steam curing were adopted. The results indicated that the water-cured mixture with GBFS/C₃ ratio of 90/10 and activated by 20%MS had greatest compressive strength of about 65 MPa. Steam and oven-cured mixtures with GBFS/C₃ ratio of 90/10 and activated by 10%MS performed the best high temperature resistance. The same mixtures cured in steam also had the best F-T resistance.

KEYWORDS:Hybrid slag/clinker composites, One-part alkali-activated, Curing regime, Clinker type, Mechanical properties

January 2023, 105 Page

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca danışmanlığını yapan, engin bilgi birikimiyle çalışmama ışık tutan çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR'a şükranlarımı sunarım. Tez jürime katılan sayın Prof. Dr. Hasbi YAPRAK hocama ve sayın Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN hocama teşekkür ederim. Eğitim hayatım süresince desteklerini hiç esirgemeyen kıymetli aileme minnettarım. Yaptığım tez çalışmasının, bilim dünyasına yararlı olmasını temenni ederim.

MESUT TÜRKOĞLU

Kastamonu, 2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI	i
TAAHHÜTNAME	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	4
2.1 Çimento.....	4
2.1.1 Çimentonun Tanımı	4
2.1.2 Çimentonun Tarihçesi	5
2.1.3 Çimentonun Ana Hammaddeleri	7
2.1.3.1 Kalker	8
2.1.3.2 Kil.....	8
2.1.3.3 Marn	8
2.1.3.4 Alçıtaşı	9
2.1.4 Çimentonun Hammadde Kompozisyonu.....	9
2.1.4.1 Kireç doygunluk faktörü	10
2.1.4.2 Silikat modülü	11
2.1.4.3 Hidrolik modülü	11
2.1.4.4 Alümin modülü	12
2.1.5 Portland Çimentoları.....	12
2.1.6 Portland Çimentosunun Üretimi	13
2.1.7 Portland Çimentosunun Mekanik ve Fiziksel Özellikleri.....	14
2.1.8 Portland Çimentosunun Kimyasal Özellikleri	15
2.1.9 Portland Çimentosunu Oluşturan Ana Bileşenler ve Yapıları	16
2.1.9.1 C ₃ S.....	16
2.1.9.2 C ₂ S.....	16
2.1.9.3 C ₃ A.....	17
2.1.9.4 C ₄ AF.....	17
2.1.10 Çimento Hidratasyonu	18
2.1.10.1 C ₃ A Anabileşeninin hidratasyonu	19
2.1.10.2 C ₄ AF anabileşeninin hidratasyonu	20
2.1.10.3 C ₃ S ve C ₂ S anabileşeninin hidratasyonu.....	21
2.1.10.4 Hidratasyon ısısı ve priz.....	22
2.1.11 Hibrit Çimentolar	25
3. DENEYSEL PROGRAM	27
3.1 Malzemeler	27
3.2 Hibrit Çimento ve Harçların Hazırlanması	28
3.3 Jeopolimer Karışımın Dökümü ve Kürlenmesi	29
3.4 Test Prosedürü	30

4. SONUÇ VE TARTIŞMALAR	31
4.1 Taze Hal Özellikleri.....	31
4.2 Basınç Dayanımı.....	33
4.3 Eğilme Dayanımı	38
4.4 Kuru Birim Ağırlık	42
4.5 Gözeneklilik ve Su Emme	45
4.6 Kuruma Büzülmesi	48
4.7 Kapilarite	51
4.8 AAHÇ Karışımlarının Mikro Yapıları.....	54
4.8.1 Farklı Kür Koşullarındaki AAHÇ Karışımları	54
4.9 Alkali Silika Reaksiyonu (ASR).....	57
4.10 Magnezyum Sülfat (MgSO ₄) Dayanıklılığı	60
4.10.1 MgSO ₄ 'e Maruz Kalan AAHÇ Karışımlarının Mikro Yapıları ...	63
4.10.2 AAHÇ Karışımlarının XRD Analizi.....	66
4.11 Yüksek Sıcaklık Direnci	67
4.11.1 Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonrası Basınç Dayanımı	68
4.11.2 Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonrası Eğilme Dayanımı	73
4.11.3 Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonrası Kütle Kaybı	78
4.12 Donma-Çözülme Dayanıklılığı.....	80
4.12.1 D-Ç Sonrası Basınç Dayanımı.....	80
4.12.2 D-Ç Sonrası Eğilme Dayanımı	86
4.12.3 D-Ç Sonrası Kütle Kaybı.....	90
5. SONUÇLAR.....	93
KAYNAKLAR.....	95
ÖZGEÇMİŞ.....	105

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1 Kompozitlerin üretim aşamaları	28
Şekil 4.1 Klinker tipinin ve MS içeriğinin AAHÇ karışımlarının yayılma ve priz süresi üzerindeki etkisi (a, b) yayılma tablosu test sonuçları (c).....	33
Şekil 4.2 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin AAHÇ karışımlarının basınç dayanımı üzerindeki etkisi.....	37
Şekil 4.3 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin eğilme dayanımı (a, b, c) üzerindeki etkisi, basınç ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki (d).....	42
Şekil 4.4 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin kuru birim ağırlık (a, b, c) üzerindeki etkisi	44
Şekil 4.5 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin gözeneklilik ve su emme (a, b, c), basınç dayanımına karşı gözeneklilik ve birim ağırlık (d) üzerindeki etkisi	48
Şekil 4.6 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin AAHÇ numunelerinin kuruma büzülmesi üzerindeki etkisi (a, b, c)	51
Şekil 4.7 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin AAHÇ numunelerinin kapilaritesi üzerindeki etkisi (a, b, c)	53
Şekil 4.8 Etüv, buhar ve su kürrü ile AAHÇ karışımlarının mikro yapıları.....	57
Şekil 4.9 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin AAHÇ numunelerinin (a, b, c) ASR genleşmesi üzerindeki etkisi	60
Şekil 4.10 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin numunelerin MgSO ₄ genleşmesi üzerindeki etkisi (a, b, c)	62
Şekil 4.11 MgSO ₄ saldırısında AAHÇ mikro yapıları	66
Şekil 4.12 AAHÇ karışımlarının XRD deseni	67
Şekil 4.13 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin yüksek sıcaklıkta basınç dayanımı üzerindeki etkisi (a, b, c).....	70
Şekil 4.14 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin yüksek sıcaklıkta basınç dayanımı değişimi üzerindeki etkisi (a, b, c)	72
Şekil 4.15 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin yüksek sıcaklıkta (a, b, c) eğilme dayanımı üzerindeki etkisi	75
Şekil 4.16 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin yüksek sıcaklıkta (a, b, c) eğilme dayanımı değişimi üzerindeki etkisi	77
Şekil 4.17 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin yüksek sıcaklıkta kütle kaybına etkisi (a, b, c)	80
Şekil 4.18 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin D-Ç döngülerindeki (a, b, c)	83
Şekil 4.19 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin D-Ç döngülerindeki (a, b, c) basınç dayanımı değişikliği üzerindeki etkisi	85
Şekil 4. 20 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin D-Ç döngülerindeki (a, b, c) bükülme dayanımı üzerindeki etkisi	87
Şekil 4.21 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin D-Ç döngülerindeki (a, b, c) bükülme dayanımı değişimi	

üzerindeki etkisi	89
Şekil 4.22 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin D-Ç	
döngülerindeki kütle kaybı üzerindeki etkisi (a, b, c)	92



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 Çimentonun mekanik ve fiziksel özellikleri (EN 197-1).....	15
Tablo 3.1 YFC ve çimento klinkerlerinin (K1, K2 ve K3) kimyasal özellikleri ve ana bileşenleri	27
Tablo 3.2 Hibrit çimentonun içerik özellikleri.....	29
Tablo 3.3 Karışımların moleküler oranları.....	29
Tablo 3.4 AAHÇ için karışım oranları (kg/m ³)	29
Tablo 3.5 Gerçekleştirilen testler, numunelerin boyutu ve test standartları.	30

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al_2O_3	: Alüminyum Oksit
CO_2	: Karbondioksit
Ca	: Kalsium
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	: Kalsiyum hidroksit
C	: Karbon
Fe_2O_3	: Demir (III) Oksit
SiO_2	: Silikon Dioksit

Kısaltmalar

AAB	: Alkali ile aktifleşmiş beton
AAHÇ	: Alkali ile aktif olan hibrid çimento
AAM	: Alkali ile aktifleşmiş malzeme
ASR	: Alkali silika reaksiyonu
D-Ç	: Donma - Çözülme
EÇM	: Ek çimento malzemeleri
HM	: Hidrolik modül
K	: Klinker
KDF	: Kireç doygunluk faktörü
MK	: Metakaolin
M.Ö	: Milattan önce
MS	: Meta silikat
PÇ	: Portland çimento
UK	: Uçucu Kül
YFC	: Yüksek fırın cürufu

1. GİRİŞ

İklim felaketleri, insanlığın karşı karşıya olduğu en önemli sorunlardan biridir ve öncelikle tesislerden kaynaklanan atmosfere salınan endüstriyel sera gazı emisyonlarından kaynaklanmaktadır (Sasui vd., 2021; Xue vd., 2021b). Atmosferik CO₂ emisyonlarının önemli bir kaynağı, inşaat için sıradan beton ve harç imalatıdır. Portland çimentosunun (PÇ) üretimi ve yaygın kullanımı çevre üzerinde önemli bir zararlı etkiye sahiptir. Dünyadaki CO₂ emisyonlarının yaklaşık %8'i PÇ üretiminden kaynaklanmaktadır. Geleneksel PÇ betonunun olumsuz sonuçlarını azaltmak için, PÇ muadillerini bulmak ve CO₂ emisyonlarını azaltmak çok önemlidir. Uçucu kül (UK), Yüksek fırın cürufu (YFC) ve silis dumanı (SD) o zamanlar PÇ'nin yerine kullanılıyordu. Bu malzemelerin PÇ pastasından daha dayanımlı olduğu ve daha iyi fiziksel nitelikler ürettiği iddia edilmektedir (Bayraktar, Kaplan, vd., 2023; Benli, 2019; Colangelo vd., 2017; Rafeet vd., 2019; Xie vd., 2019). Malzemenin mekanik davranışının ve finansal maliyetinin sentetik değerlendirmesine dayanan beton karışımları için, PÇ'nin bu bileşenlerle tamamen ikame edilmesi uygun değildir.

Çimento üretim sürecinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını azaltmaya yönelik önemli girişimlere rağmen, yıllık olarak üretilen büyük hacimli çimento, alkali ile aktive edilen malzemeler (AAM) gibi ek ve alternatif bağlayıcı seçeneklerine ihtiyaç duyar. AAM'ler, PÇ esaslı malzemelerden daha çevre dostu olduklarından ve büyük CO₂ emisyonlarını ve aşırı enerji kullanımını azaltmak için evsel ve endüstriyel atıkların ham madde olarak kullanılmasına izin verdiğinden, çalışmalarda daha fazla ilgi çekmektedir (Bayraktar vd., 2023; Jamieson vd., 2015; Yadollahi vd., 2015b, 2015a, 2017; Yadollahi ve Benli, 2017). AAM'lerin veya metakaolin, UK, silis dumanı, YFC ve doğal puzolanlar (volkanik tuf, zeolit ve diatomit) gibi jeopolimerlerin üretimi için bağlayıcı olarak endüstriyel yan ürünlerin ve doğal puzolanik malzemelerin kullanımı oldukça başarılıdır (Brough vd., 2001; Burciaga-Díaz ve Escalante-García, 2017; Hu vd., 2009). Alkali ile aktifleştirilmiş malzemeler düşük CO₂ emisyonuna ek olarak erken yaş dayanımı, sülfat ve asit saldırı direnci, olağanüstü termal direnç ve klorür geçirgenliği açısından PÇ'den üstündür (Aiken vd., 2017; Brough ve Atkinson, 2002). Daha yeşil malzemeler olarak görülmesine rağmen, AAM'ler gerçek inşaat

uygulamalarında kullanıldığında alkali silika reaksiyonu potansiyeli, önemli ölçüde büzülme ve inanılmaz derecede hızlı sertleşme ve çiçeklenme gibi belirli sorunlara sahiptir. Ek olarak, ısıl kürlenme gerekliliği ve büyük miktarlarda viskoz ve kostik alkali çözeltilerin kullanılması, daha geniş ticari kullanımını engellemektedir (Askarian vd., 2018; Škvára vd., 2009; Xue vd., 2021b; Zhang vd., 2017). %70'ten fazla EÇM'leri ve %30'dan az portland çimentosunu birleştiren ve bunları az miktarda alkali aktivatörle aktive eden yeni bir bağlayıcı türü, yakın zamanda yukarıda belirtilen sorunları ele almak için önerilmiştir (ASTM C1260, 2014). Özellikle Paloma önerisini yaptıktan sonra, bazı uzmanlar alkali ile aktive olan hibrit çimentolar (AAHÇ) olarak bilinen bu yeni bağlayıcı malzemeyi önerdiler (Garcia-Lodeiro vd., 2013; Palomo vd., 2007; Shi vd., 2011). Son yıllarda HAAÇ'ler, sanayileşmedeki basitlikleri ve AAM'ler ve PÇ'ye göre avantajları nedeniyle araştırmacılardan ve çimento endüstrisinden giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bununla birlikte, çeşitli bilim adamları, alkali agrega reaksiyonu, büzülme, korozyon, termal özellikler ve karbonatlaşma dahil olmak üzere uzun süredir devam eden bazı dayanıklılık zorluklarını tam olarak anlamak için daha fazla çalışmanın gerekli olduğunu iddia etmektedirler (Askarian vd., 2018; Bernal ve Provis, 2014). Alkali aktivatör olarak farklı oranlarda öğütülmüş pirinç kabuğu külü, PÇ ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ çözeltisi ile yapılan betonun mekanik özellikleri Saloni vd. (2021) tarafından incelenmiştir. Toplam bağlayıcı içeriğindeki PÇ ikame yüzdeleri, %5, 10, 15, 20, 25 ve %30'luk artışlarla %0-30 olmuştur. PÇ içeriği %0'dan %15'e çıkarıldığında basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarının arttığı gözlemlenmiştir. Nath ve Sarker (2015) çeşitli yüzdelerde PÇ ikamesi ile yapılmış hem harç hem de betonun basınç dayanımındaki artışta yaşlanmanın etkisini incelenmiştir. Yazarlar, basınç dayanımındaki artışın genç yaşlarda ileri yaşlara göre daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Harç ve betonun basınç dayanımı hızla 28 güne kadar yükselirken, 56 ve 90 kür gününde düşüş göstermiştir. %80 pomza, %20 PÇ ve alkali aktivatör olarak Na_2SiO_3 ve potasyum hidroksit kombinasyonundan oluşan hibrit sistemin performansını artırmak için Balun ve Karataş (2021) kürlenme sıcaklığının ve termal kürlenme süresinin etkilerini araştırmıştır. 20°C ile 120°C arasında değişen çeşitli kür sıcaklıklarında ve kür sürelerinde (24, 48, 72 ve 96 saat), macunla hazırlanan küp numunelerin basınç dayanımı incelenmiştir. Belirli bir sıcaklığa kadar, kür sıcaklığındaki artışlar dayanımda bir artışa neden olmuştur. Dener vd. (2021) bir, iki ve altı ay süreyle %5 Na_2SO_4 ve %5 MgSO_4 çözeltilerine maruz bırakılan hibrit alkali

çimento harcının davranışını incelemiştir. Harç %15 PÇ, %85 YFC ve %5 Na₂SO₃ + %5 NaOH alkali çözeltisinden oluşuyordu. Çalışma, Na₂SO₄ çözeltisine daha uzun süre maruz kaldığında, basınç dayanımının MgSO₄ çözeltisi altında düşerken arttığını buldu. CASH jelinin kirecinin çözülmesi ve silikat polimerizasyonu, MgSO₄'e maruz kaldıktan sonra çözeltinin zayıflamasından sorumlu olabilir. Silika jel veya MASH, bu CASH jelinin dönüşümünden gelebilir. Tek bileşenli "basitçe su ilave edilen" jeopolimer karışımları, yakın zamanda oluşturulmuş bir jeopolimer sınıfıdır ve geleneksel PÇ betonuna oldukça benzer bir şekilde üretilirler. Tek parçalı jeopolimerlerin oluşturulması, inşaat sektöründe daha kapsamlı jeopolimer kullanımını amaçlıyor. Alüminosilikat ve katı aktivatörler, en yeni tek bileşenli karışımları oluşturmak için birleştirildi ve katı kombinasyona su eklendiğinde reaksiyonlar başladı (Askarian vd., 2018; Hajimohammadi vd., 2008).

Bildiğimiz kadarıyla, çimento klinker tipi, kürlenme türü ve aktivatör dozajının tek bileşenli alkali ile aktifleştirilmiş hibrit YFC/K kompozitlerinin (AAHÇ) taze, mekanik, dayanıklılık ve mikroyapı özellikleri üzerindeki etkisi yeterince araştırılmamıştır. Yayılma çapı, priz süresi, basınç dayanımı, kuru birim ağırlık, eğilme dayanımı, kapilarite, kuruma büzülmesi, taşıma özellikleri değerlendirilmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklık, sülfat maruziyeti, alkali-silika reaksiyonu (ASR) ve donma-çözülme (D-Ç) döngülerinde etkinliğinin araştırılması amaçlanmıştır. 70/30 ve 90/10'luk iki YFC/Klinker oranı ve %10-%20 tek parça alkali etkinleştirici harici ilavesiyle toplam on iki AAHÇ karışımı yapıldı. Üç farklı çimento klinker tipi ve etüv kürü, su kürü ve buhar kürü olmak üzere üç kür türü benimsenmiştir. AAHÇ'lerin mikro yapısını değerlendirmek için bir elektron mikroskobu taraması (SEM) araştırması da yapılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Çimento

Bu bölüm, çimento hakkında genel bir bilgi, ana bileşenleri ile bunların kompozisyon içerisindeki dağılımı, nasıl üretildiği ve hidratasyonu konularında ayrıntılı bilgi içermektedir.

2.1.1 Çimentonun Tanımı

Çimento, uygun oranlarda kalker ve kil hammaddelerinin birleştirilerek 1500°C civarlarında pişirilmesi ile elde edilen klinkerin içerisine, alçıtaşı ilave ederek toz haline getirilmesiyle üretilen inorganik, hidrolik bağlayıcı yapı malzemesidir. Çimento genellikle gri renklidir. Bunun sebebi yapısında yer alan hammaddelerden kaynaklı demir oksittir (Erdoğan, 2013).

Çimento su ile bir araya geldiğinde bir takım hidratasyon reaksiyonları meydana gelir. Bunun sonucunda oluşan hamur priz alarak sertleşir. Sertleşme işlemi tamamlandıktan sonra suyun altında bile formunu, dayanım ve dayanıklılığını korumaya devam eder (TS EN 197-1, 2012). Ayrıca su ile çimento arasındaki kimyasal tepkimeler, ortamdaki nem ve sıcaklık durumu uygun olduğu sürece devam etmekte ve dayanım kazanmasını sürdürmektedir (Erdoğan, 2013).

Çimentonun standartlara uygun olarak üretilmesi için üretilen klinkerin bileşimi ve devamındaki ısısal işlemlerin sağlıklı ve doğru biçimde yapılması önemlidir. Buna ek olarak üretimde kullanılan yakıtın cinsi ve bu yakıtın ortaya çıkardığı kül de klinkerin bileşimini etkileyecektir (Koçak, 2008).

Çimento üretimi, teknolojik olarak yüksek donanıma sahip büyük tesislerde yapılabilen karmaşık bir işlemdir. Kil ve kireç taşı çimentonun ana hammaddeleridir. Kilin yapısında bulunan silisyum, alümin ve demir oksit ile bileşime girebilir. Çimento üretiminde istenen, bu ürünleri belirli miktarlarda bir araya getirip 1350-1500°C’de pişirerek kimyasal olarak değişikliğe uğratmaktır. Pişirme işlemi sonrası kilden

Silisyum dioksit (SiO_2), Alüminyum oksit (Al_2O_3), Demir oksit (Fe_2O_3) ve kireç taşından Kalsiyum oksit (CaO) oluşur. Elde edilen bu ürünlere tekrar yüksek sıcaklık uygulandığında silikat ve alüminat adı verilen ve çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandıran yeni ürünler oluşur (Dayı, 2006; Özgür, 1996).

Çimento üretiminde hammaddelere ek olarak alçı taşı ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) kullanılır. Alçı taşının kullanımı klinker içerisinde %3-6 oranında sınırlı tutulur. Bu ürünün eklenmesinin sebebi priz süresini ayarlamaktır. Bunun yanı sıra klinkerden daha yumuşak bir yapısı olduğundan, daha iri vaziyette olan klinker tanelerinin aralarındaki boşlukları alçı taşı doldurur. Böylece çimentonun dayanım ve işlenebilme özellikleri iyileştirilir (Dayı, 2006).

2.1.2 Çimentonun Tarihçesi

Tarihin en eski çağlarından beri toplumlar çevrenin olumsuz etkilerinden korunabilmek için çeşitli malzemeleri bir arada tutacak araçlar geliştirmeye çalışmıştır. Böyle bir malzemenin keşfi sayesinde yapılara şekil verme ve fonksiyonellik özelliklerinin kazandırılması amaçlanmıştır (Koçak, 2008; Özdemir, 2020). Bunun ilk örnekleri, çamur ile bitkisel lifleri bir araya getirip, kalıplanıp, pişirilerek ortaya çıkarılmıştır. Bilinen en eski antik yapılarda, bu şekilde üretilen yapı malzemelerinin yanı sıra kesme taş yapılara da rastlanmaktadır. Bu malzemeleri bir arada tutabilmek için sönmüş kireç ve alçı kullanılmıştır. Sönmüş kireç kullanımına dair ilk örnekleri Hititlere (M.Ö. 2000-1100) ve Fenikelilere (M.Ö. 3000-60) ait eserlerde görebilmekteyiz. Buna ilaveten puzolanı ilk defa Romalıların kullandığı genel kanı olsa da keşfi Hititliler ve Giritliler tarafından yapılmıştır (Koçak, 2008).

Çimento kelime anlamı bakımından latince yontulmuş kırıntı taş anlamındaki caementum kelimesinden türemiş ve günümüzde bağlayıcı olarak kabul görmüştür. Tarihi süreç içerisinde tüm dünyada bilinen Çin Seddi, Mısır piramitleri, kaleler gibi farklı zaman dilimlerinde inşa edilen yapılarda birbirinden farklı birçok bağlayıcı kullanılmıştır. Günümüzden 2000 yıl önce Romalılar, volkanik külleri söndürülmüş kireç ile, ilerleyen süreçte de pişirdikleri tuğlalardan elde ettikleri tozlarla günümüzde kullanılan çimentoya benzer bir bağlayıcı kullanmışlardır. Antik Yunanlılarda

Santorini Adasından elde ettikleri volkanik tuf veya killi kalkerler ile kireci karıştırarak bir çeşit kireçli hidrolik bağlayıcı olan su kirecini elde etmişlerdir. Hem Antik Yunanlılar hem de Romalılar kirecin ve puzolanların hidrolik bağlayıcı olarak katkı sağladığının farkına varmalarına rağmen bu durumu kimyasal olarak açıklayamamışlardır (URL-1, 2022).

Romalılar bağlayıcı konusunda gelişimleri sürecinde, pozzolana adını verdikleri Napoli de Vezuv yanardağı çevresinden temin edilen koyu renkli malzemeyi kullanmışlardır. Bu malzeme ile günümüze kadar kalmayı başaran Pantheon, Colosseum, Basilica Constantine eserlerini inşa etmişlerdir (Atar, 2006).

Geçen zaman içerisinde İngiltere'nin Leeds şehrinde, Joseph Aspdin isimli bir duvar ustası tarafından ilk defa ince yapılı kalker ve kil karışımı pişirilip öğütülmüş ve bir numune elde edilmiştir. Bu numune su ve agrega ile karıştırıldığında sertleşmekte ve Portland isimli küçük bir adadan getirilen taşlara benzemektedir. Bu yüzden Joseph Aspdin yaptığı patent başvurusu ile bu malzemenin adını Portland çimentosu koymuş ve 1824 yılında tescilletmiştir. Tescillenmesinin hemen ardından Avrupa ve Kuzey Amerika'da hızlı bir şekilde kullanılmaya başlamış ve ilerleyen süreçte üretim için ekipman geliştirilmesi hız kazanmıştır (Koçak, 2008).

İngiltere'de 1877 yılında döner fırınları geliştirme çalışmaları başlamıştır. Fredrick Ransome, bunu ilk defa 1885 yılında ürüne dönüştürüp, uygulayarak patent alabilen kişidir. Bu fırın çok verimli çalışmamıştır fakat mevcut devir için önemli bir gelişme olmuştur. Amerikalı birçok mühendis döner fırınlar üzerine çalışmalarına devam ettiler ve yıllar sonra Atlas Çimento Şirketi'nden Hurry ve Seaman'ın geliştirdiği ekonomik ve verimli fırın 1895 yılında çalışmaya başlamıştır (Koçak, 2008).

PÇ'nin tüm dünyada kabul görmesine bağlı olarak, standartlaşması için deney yöntemleri hakkında çalışmalar hız kazanmıştır. 19. yüzyılın başlarında hemen hemen tüm deneyler standart hale getirilmiştir. Bu deneyler ve standartlar günümüze kadar revize edilerek güncelliğini korumuş ve tüm dünyada halen uygulanmaya devam etmektedir (Koçak, 2008).

Dünyada ilk çimento üretim ve satışı 1878 yılında olmuştur. Ancak ülkemizde ne yazık ki Osmanlı İmparatorluğunun çöküş dönemlerine rast gelmesinden dolayı çimento üretimine başlanması 34 yıl gecikme ile sağlanabilmiştir. Türkiye’de ilk çimento fabrikası 1912 yılında özel bir girişim tarafından kurulan Aslan Osmanlı Anonim Şirketi Darıca Eskişehir Portland Çimento ve Su Kireci Fabrikası olmuştur. Bu tarihten sonra üretim, hızla gelişimini sürdürmeye devam etmiştir (Koçak, 2008). Ülkemizde 2018 yılı verileri baz alındığında üretimimizin yıllık 73 milyon tona ulaştığı görülmektedir (URL-2, 2022).

2.1.3 Çimentonun Ana Hammaddeleri

Çimento üretim teknolojisinde, jeolojide sedimenter kayaç ismi verilen kalker (kireçtaşı), kil veya marn ana hammadde olarak kullanılır. Temel anlamda klinkeri elde edebilmek için iki kaynak malzeme göze çarpar. Bunlar kalker ve kildir. Kalkerden CaO ve kilden de SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 elde edilir. Eğer CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 oranları standartlara uygun ise malzeme çimento üretiminde kullanılır. Malzemenin kimyasal analizleri yapıldığında Fe_2O_3 miktarında bir düşüklük görülürse ilavesi yapılabilir. Çimento üretim sürecinde uygun hammaddelerin gerekli oranda kullanılması son derece önemlidir (Akan, 2019). Ancak standart oranlarda bir içerik dağılımı genellikle çok az rastlanan bir durumdur. Bunun için yüksek kireç içerikli kalker ve yüksek silis içerikli kil kullanımı uygun olmaktadır. Bunun yanı sıra kalker, marn, pozolonik malzemeler ve öğütülmesi aşamasında alçıtaşı da kullanılmaktadır (Koçak, 2008).

Çimento teknolojisinde standardın korunabilmesi için hammaddelerin bileşim oranlarının olabildiğince aynı kalması sağlanmaya çalışılır. Genel kompozisyona bakıldığında CaCO_3 (Kalsiyum karbonat) içeriği %75-79 arasında kalması gerekir. Bunun sebebi CaCO_3 oranının değişmesine bağlı olarak oluşacak olan dikalsiyum Silikat (C_2S) ve Trikalsiyum Silikat (C_3S) yüzde oranının da değişmesidir. Bu oranların değişimi çimento dayanım değerlerini ciddi manada değiştirebilir (Yalçın ve Gürü, 2006).

2.1.3.1 Kalker

Doğada kalsiyum karbonat adıyla bulunan ve bileşiminde kimyasal olarak en az %90 oranında CaCO_3 ve mineral yapısında da kalsiti %90 oranında bulunduran kayalara kalker ya da kireç taşı denir (DPT, 1996). Doğada saf olarak bulunan haline kalsit denir. Kalker yapısı çok ince olan ve ağırlıkla kalsitten oluşan yapılardır. Rengi ham hali ile beyazdır ancak doğada hiç saf olarak bulunmadıkları için yapısında bulunan farklı materyallere göre açık sarıdan kahverengiye kadar değişen renklerde bulunabilir. Setlik derecesi 3, özgül ağırlığı ise $2,5-2,7 \text{ g/cm}^3$ civarlarındadır. Kalkerler incelendiğinde aragonit ve kalsit kristallerinden oluşmuş bir yapı olduğu görülür. Bunun yanında dolomit olarak da bilinen yapıya rastlanılmaktadır (Akan, 2019; Koçak, 2008).

2.1.3.2 Kil

Çimento üretim sisteminde en önemli ikinci hammadde kildir. Kil birçok endüstri alanında kullanılan, bileşiminde %90 oranında kil mineralleri barındıran kayadır. Aslında kili oluşturan sulu alüminyum silikatlarıdır. Killer, yapısında kaolin, illit gibi kaolinit sınıfından kil minerallerinin yanında demir oksit, demir sülfür, kum, kalsit ve kil dışı mineraller ile düşük oranda organik madde bulundurur. Killer safken beyazdır. Fakat yapısında bulunan demirin miktarına ve özelliklerine bağlı olarak renk değiştirir. Çimento üretiminde kullanılacak olan killer birtakım analizlerden geçirilerek uygunluklarına karar verilir. Bu analizlerde SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O , Na_2O , SO_3 ve kızdırma kaybı yüzdeleri tespit edilerek değerlendirilir. Bunların dışında mineralojik analizlerle de kil minerali dışında kalan yabancı materyallerin yüzdelik oranları belirlenir (Akan, 2019; Koçak, 2008).

2.1.3.3 Marn

Yapısında %50-70 oranında kalker olarak ifade edilen CaO veya CaCO_3 bulunduran ve %30-50 civarında kil içeriğinde malzemelerden oluşan bir kayadır. Tatlı su ortamında oluşur ve killere kıyasla bir miktar daha az kırılıgandır (Koçak, 2008; Oytaç, 2012). CaCO_3 ve kil birlikte sedimantasyona uğradığında meydana gelmektedir (DPT, 1996). Doğada bol miktarda bulunduğu ve yapısında değişik oranlarda kuvars, kil,

demir oksit, kalker gibi çimento teknolojisinde gerekli materyalleri bulundurduğu için çimento hammadde olarak çok tercih edilir. Marn hammadde olarak kil kalker dağılımı açısından çok idealdir. Ayrıca yumuşak yapısı sayesinde kırma, küçültme, öğütme gibi işlemler kolaylaşarak üretimde ekonomik kazanç sağlanmaktadır (Koçak, 2008).

2.1.3.4 Alçıtaşı

Alçı taşları çok kurak ortamlarda, yapısındaki deniz suyunun buharlaşması ile oluşan ve yeryüzünde yaygın olarak bulunan tortul kayaçlardır. Doğada iki şekilde bulunurlar. Bunlardan birincisi jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) olarak bilinir ve bileşiminde 2 mol su bulunur. İkincisi ise susuz kalsiyum sülfat anhidrit mineralidir. Bu her iki tür alçıtaşı doğada saf halde bulunmamakla birlikte kararsız durumlarından dolayı birbirlerine dönüşümleri olabilir. Alçı taşı çimento üretiminde %5 oranını geçmeyecek şekilde, priz süresini ayarlayabilmek için kullanılmaktadır (Karakaş, 2006; Koçak, 2008).

2.1.4 Çimentonun Hammadde Kompozisyonu

Çimento üretim teknolojisinde üretilecek olan çimentonun, fiziksel ve durabilite ile ilgili değerlerinin olumlu olabilmesi, kullanılan farinin kimyasal bileşimi ile doğru orantılıdır. Farin, çimento üretimi için fırına verilmeye hazırlanmış hammadde karışımına verilen isimdir. Bu karışım genel olarak CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 olmak üzere dört çeşit bileşeni içerir. Üretim zincirinde, kalker ve kilin standartlara uygun oranlarda karıştırılması ve akabinde çok az miktarda düzenleyici malzemeler karıştırılarak, çimento üretimi için hammadde elde edilmiş olur (Aydın, 2019; Erdoğan, 2013).

Çimento üretimi için gerekli hammaddeyi, doğada tek bir üründe bulabilmemiz mümkün değildir. Bunun yanı sıra üretim süreci için daha ekonomik ve sürdürülebilir bir tedarik sağlanabilmesi için olabildiğince az çeşitte malzeme ile çalışılması bir gerekliliktir. Bu sebeple yapı itibarı ile daha çok kalker, marn ve kil karışımı içeren malzemeler oranları da standartlara uygun olduğu sürece tercih edilmektedir. Bu aşamada yapılacak olan analizler, döner fırından çıkan klinkerin de uygun kimyasal ve mineral özelliklerde olmasını sağlayacaktır. Söz konusu bu hammadde karışımlarının

düzgün bir şekilde yapılabilmesi için bir takım kimyasal modüllere ihtiyaç duyulur (Targan, 2002).

Döner fırına işlemek için gönderilen farin, çimentonun fiziksel özelliklerini, dayanım ve dayanıklılık değerlerini doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden bileşenlerin yüzde oranlarının doğru ayarlanması ciddi önem arz etmektedir. Klinkerin yapısındaki ana bileşenlerin oranları kireç doygunluk faktörü (KDF), silikat modülü (SM), hidrolik modül (HM) ve alümin modülü (AM) ile tespit edilir (Yalçın ve Gürü, 2006). Bu kimyasal modüller aşağıda detaylandırılacaktır.

2.1.4.1 Kireç doygunluk faktörü

PÇ üretimi için kullanılacak olan klinkerin içeriğinde hangi oranda CaO olması gerektiğinin hesaplanarak bulunması mümkündür. Bu noktada elde edilen çimento içerisindeki tüm SiO_2 'nin, C_3S şeklinde; Fe_2O_3 'de aynı miktarda Al_2O_3 ve tetrakalsiyum alüminaferrit (C_4AF) olarak ve buradan artan Al_2O_3 'ünde trikalsiyum alüminat (C_3A) şeklinde birbiri ile bağlandığı varsayılırsa kullandığımız klinkerdeki kireç doygunluğunun sağlanması işlemi tamamlanmış olur. Mevcut bu durumdan hareketle çimento içeriğindeki SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 ile bağlanan en yüksek CaO oranı ortaya çıkabilmektedir (Koçak, 2008).

KDF'nin üretime uygun kabul edilebilmesi için 0,85;0,90 değerleri aralığında olması gerekir. Bu değer 1'in üzerinde olduğunda malzemede serbest kirecin bulunduğuna işaret eder. Bu durum oluşacak olan alit (C_3S) ile belitin (C_2S) miktarlarını değiştirecektir. Serbest kireç değeri sabitken buna karşılık KDF değeri artıyorsa belit, azalırken alit miktarının arttığı görülür (Koçak, 2008).

Çimento üretiminde kullanılacak olan malzemenin kabul edilebilir olması için dikkat edilecek en önemli kısıtlardan bir tanesi CaO'dur. Bunun yanında kaliteli bir çimentoda C_3S miktarı da yüksek olmak zorundadır. Bu gerekliliğin sağlanabilmesi karışımdaki CaO miktarının son derece özenli bir şekilde belirlenmesi ile ilgilidir (Korkmaz, 2019).

KDF'nin yüksekliđi veya dūřuklūđu birēok farklı geliřime sebep olmaktadır. Bu yūzden KDF'nin hesaplamaları ēok dikkatli yapılmalıdır. KDF deđerı dūřuk olduđu zaman malzemenin piřirme iřlemi ēok kolay olmakta, ayrıca C_3S oluřumu az, C_2S fazla olmaktadır. Bu durum erken dayanım deđerlerinin beklendiđi gibi olmamasına sebebiyet vermektedir. Buna karřılık yūksek olması durumunda ise hammadde daha zor ve uzun zamanda piřtiđi iēin yakıt tūketimini arttırmaktadır. Ayrıca serbest kireē miktarını da arttıracaktır. Bu durum genleřme problemlerinin ortaya ēıkmasına yol aēmaktadır. Tūm bu sonuēlara ek olarak KDF oranı yūksek olan ēimentolarda ilk gūn dayanımları yūksek olmakta fakat nihai dayanımdan istenen verim alınamamaktadır (DPT, 2001).

2.1.4.2 Silikat modūlū

SM, fırın iēerisine verilen karışımdaki Al_2O_3 ve Fe_2O_3 miktarının toplamının SiO_2 'ye ağırlık cinsinden oranı olarak ifade edilebilir. Bir başka değerle katı fazın sıvı faza oranı da denilebilir (Aydın, 2019; Gencel vd., 2022; Koēak, 2008).

Bu modūl iēin net bir deđer vermek mūmkūn olmasa da kullanılan hammaddeye bađlı olarak 1,2-4 deđerleri arasında deđerışim gōstermektedir. Ancak 2 ile 2,5 arasındaki deđerler ideal olarak kabul edilmektedir. SM, klinkerin őzelliklerini ve fırındaki durumunu etkileyen őnemli bir parametredir. SM deđerinin yūkseklīđi, klinkerin piřirilmesini zorlařtırır bu da fırın iēerisindeki yanma durumunun yetersizliđine iřaret eder. Dolayısı ile yakıt tūketimini arttırarak, ekonomik zarar oluřumu gerēekleřir. Ayrıca sinterleřme zorlařarak daha yūksek sıcaklıklarda piřirme zorunluluđu oluřur. Bu durum ēimentonun priz almasını ve dayanım kazanmasını geciktirecektir (Aydın, 2019; Koēak, 2008). Bahsedilen bu durumun tersine SM'nin sōz edilen ideal oran aralıđında ve daha dūřuk deđerlerde olması durumunda, sinterleřme daha kolay olacak bōylece priz sūresi ve dayanım daha hızlı bir řekilde gerēekleřecektir (DPT, 2001).

2.1.4.3 Hidrolik modūlū

Hidrolik molekūlū (HM), Pē'lerde bazik őzellikteki oksitler ile asit őzellikli oksitler arasında kurulan bir bađıntıdır. ēimentonun bazik oksit kaynađı kireē ve asit oksit kaynađı SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 'tūr (Koēak, 2008).

Kaliteli bir PÇ’de HM açısından bazı değerlere dikkat edilmelidir. Genellikle bileşim oranı düzgün olan çimentolarda bu değer 2 civarındadır. Fakat 1,7 ile 2,3 değerleri arası kabul edilebilir sınırlardır. Yapılan araştırmalar HM’nin 1,7 değerinin altına düştüğünde mukavemet değerlerinin beklenenin altında olduğunu buna karşılık 2,4 değerinin üstüne çıktığında ise durabilite ve genleşme noktasında sorunlar oluştuğunu göstermiştir (Targan, 2002).

HM değerinin yükselmesi sebebiyle klinker pişirme sıcaklık değeri yükselmekte bu da çimento erken dayanım ve hidratasyon ısılarını yükseltmek suretiyle kimyasal olaylara karşı dayanımı azaltmaktadır. Aksine HM değerlerindeki düşüklük ise dayanımı negatif yönde etkilemektedir (Mumcu, 2005).

2.1.4.4 Alümin modülü

PÇ’nin içeriğindeki Al_2O_3 yüzde oranının Fe_2O_3 yüzdesine oranı olarak tanımlanan bir modüldür (Koçak, 2008).

İdeal bir klinker üretebilmek ve imalat aşamasında ekonomik sinterleşme sağlayabilmek için bu modülün değeri 1,3-1,6 arasında tutulması gerekir. AM’nin yüksek olması durumunda klinkerin pişirmesi zorlaştığı için yakıt tüketimi artmaktadır. Bu duruma karşın modül değerinin düşüklüğü ters etki yaparak, çimento bileşikleri daha kolay ve düşük sıcaklıklarda oluşumu gerçekleşir. Böylece daha ekonomik bir üretim gerçekleşir (Koçak, 2008).

Klinker içerisindeki demir, bileşiklerin oluşumuna katkı sağlamasına rağmen demir oranındaki yükseklik, klinkerin daha sert bir yapıda olmasına sebep olur. Dolayısı ile bu durum üretimde fazla maliyet oluşturmaktadır (Koçak, 2008; Mumcu, 2005). Ayrıca AM düşük ve kullanılan hammadde serbest silis ihtiva ediyorsa klinkerde topaklanma olması beklenir (Kazan ve Kılıç, 2016).

2.1.5 Portland Çimentoları

Çimentolar esas itibari ile beton içerisinde bulunan agregaları belli bir şekilde tutabilmek için kullanılan silis ve kalker içeren, bir yapı bağlayıcı malzemesidir. Beton

üretiminde kullanılan çimentolar su içerisinde bile sertleşebilme özelliği sebebiyle hidrolik bağlayıcı olarak adlandırılırlar. Hidrolik çimento denildiğinde akla ilk gelen PÇ'dir (Gündeşli, 2008).

PÇ, öncelikle 1350 ile 1500°C sıcaklık altında, kalker ve kilden oluşan hammaddenin pişirilmesi ile klinker olarak adlandırılan katı parçacıklar şeklinde elde edilir. Daha sonra içerisine %3-6 oranında alçı taşı ilave edilerek öğütülür ve ürün haline dönüşür. PÇ'nin özgül ağırlığı 3,10; 3,15 g/cm³ aralığındadır. Genel itibari ile 1-200 mm inceliğinde gri renkte toz şeklindedir (Erdoğan, 2013; Koçak, 2008; Yalçın ve Gürü, 2006).

Su ile bir araya geldiği zaman hidrolik bağlama özelliği kazanan PÇ, su altında bile priz alan ve çözünmeyen bir malzemedir. Bu tür bağlayıcılara hidrolik bağlayıcı ismi verilmektedir. Ancak alçı ve kireç, bağlayıcı özelliklerinin bulunmasına karşın hidrolik bağlayıcılık gösterememektedir (Erdoğan, 2013; Koçak, 2008).

Çimento ile suyun birleşimi ile birlikte kimyasal reaksiyonlar başlar ve yıllar boyunca devam eder. Bu olaya hidrasyon denir. Hidrasyonun devam ettiği süreçte çimento hamuru ilk etapta yumuşak ve şekil verilebilir halde iken reaksiyonların devamı ile katılaşır ve sertleşerek son şeklini alır. Bu işlemler dizisine priz alma denir. Çimento hamurunun katılaşmasından sonraki hali sertleşmiş çimento hamurudur. Bu andan sonra ortam şartları uygun olduğu sürece yani uygun nem ve sıcaklık sağlandığı takdirde reaksiyonlar ve dayanım kazanımı devam edecektir. Bununla birlikte kazanılan dayanım ve reaksiyonların devamı çimentonun ana bileşenleri ile doğru orantılı olarak değişecektir (Erdoğan, 2013; Koçak, 2008).

2.1.6 Portland Çimentosunun Üretimi

Çimento üretimi çok disiplinli bir süreçtir. Üretim aşamalarına göz atıldığında maden, jeoloji, kimya ve fizik gibi birçok bilim dalının komplike bir şekilde doğru yorumlanması ile başarılı bir sonuca ulaşılabilir. Genel olarak değerlendirildiğinde hammaddelerin üretilmesi ve hazırlanması, pişirilmesi ve öğütülmesi akabinde de paketlenmesi ile üretim süreci tamamlanır (Koçak, 2008).

Çimento üretilirken oldukça yüksek enerjiye ve dolayısı ile yakıta ihtiyaç duyulur. Bu ihtiyaç toplam üretim maliyetinin yaklaşık %40'ı kadardır. Bu yüzden enerji maliyetlerini düşürmek için alternatif yöntem geliştirme çabaları sürmektedir (Koçak, 2008).

Ana hatları ile çimento üretim prosesini sıralayacak olursak;

Hammadde ocağından elde edilen kalker, kil veya marn kırıcılara sevk edilir. Kırıcıda istenen boyutlara getirilen hammadde stok edilir.

Stoktan gelen kırılmış malzeme değirmenlere alınarak öğütülür. Belirli standart kil ve kalker içerikli malzeme öğütülerek işlem görmüş hammadde hali farin olarak isimlendirilir.

Silolarda depolanan farin akabinde ısı değiştiricilerden geçirilerek döner fırına gönderilir.

Farin döner fırında 1400-1450°C'de pişirilerek klinker denilen ürün elde edilir. Elde edilen klinker soğutucu kısma sevk edilir ve işlem tamamlandığında yine depolama alanına alınır.

Ardından klinkerin içerisine alçı taşı ilavesi yapıp değirmenlerde öğütüldükten sonra çimentonun üretimi tamamlanmış olur.

Pompalarla silolara aktarılan çimento torbalanarak satışı yapılır (Yıldırım, 2007).

2.1.7 Portland Çimentosunun Mekanik ve Fiziksel Özellikleri

PÇ'lerin standart olarak literatürde yer alan mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 2.1'de sunulmuştur (Özgür, 1996).

Tablo 2.1 Çimentonun mekanik ve fiziksel özellikleri (EN 197-1)

Dayanım Sınıfı	Basınç Dayanımı (MPa)				Priz başlama Süresi (dakika)	Genleşme (mm)
	Erken Dayanım		Standart Dayanım			
	2 Günlük	7 Günlük	28 Günlük			
32,5 N	-	≥ 16	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 N	≥ 10	-				
42,5 N	≥ 10	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 N	≥ 20	-				
52,5 N	≥ 20	-	≥ 52,5	-	≥ 45	
52,5 N	≥ 30	-				

2.1.8 Portland Çimentosunun Kimyasal Özellikleri

Çimentoların standart kimyasal analizleri yapılırken bir takım tepe ve taban değerleri belirlenmiştir. Bunun amacı çimentonun yeterli dayanım dayanıklılık ve kalite özelliklerini sağlayabilmektir. Çimento için yapılan kimyasal analizlerde içerikte bulunan oksit yüzdelерinin yanı sıra çözünmemiş kalıntılar ve çimentoda meydana gelebilecek kızdırma kaybı oranlarına bakılır. Bahsi geçen kızdırma kaybı çimentonun nem alıp almadığı rutubet durumu karbonatlaşma ve ön hidrasyon gibi problemlerin olup olmadığı hakkında öngörü oluşabilmesini sağlayacaktır. Çözünmeyen kalıntı tanımı ise mineral katkı oranı, içerikte olması mümkün ancak istenmeyen ürünler, pişirme sıcaklığının uygunluğu gibi kriterlerin anlaşılmasına yarar sağlar (Koçak, 2008).

Daha öncede değinildiği gibi kalker ve kil çimentonun ana hammaddesidir ve bu hammaddelerin içeriğinde saf olmayan maddeler de bulunmaktadır. Minerolojik yapısı incelendiğinde neredeyse çimentonun %90-95'ini CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 'ün oluşturduğu tespit edilmiştir. Bunlara ilaveten MgO ve SO_3 (Kükürt anhidriti) gibi alkali oksitler ve çimentonun hidrasyonuna katkı sağlamayan minör bileşenlerin de olduğu görülür. Bu noktada önemli bir detay tabloda görülen ancak klinkerin bileşiminde bulunmayan SO_3 'tür. SO_3 çimentonun üretimi sırasında ilave edilen alçı taşından gelerek analizlerde yerini almaktadır. Ayrıca tabloda yer alan alkaliler ve magnezinin çimento için faydalı bir özelliği yoktur. Ancak yüksek miktarda bulundukları zaman genleşme gibi zararlı durumların artmasına sebep olacağı için kontrolü önemli olacaktır (Aydın, 2019; Erdoğan, 2013; Koçak, 2008; Yaras vd., 2022).

2.1.9 Portland Çimentosunu Oluşturan Ana Bileşenler ve Yapıları

Çimento üretiminde, klinkerin oluşması sırasında CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi temel bileşenlerin aralarında değişik oranlarda tepkimeleri ile C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF fazları meydana gelmektedir (Aydın, 2019).

Söz konusu bu fazların oluşumu ile çimentonun dayanım kazanması ve priz süresine etkileri değişiklik göstermektedir. Bu yüzden fazların kimyasal gelişiminin teferruatlı olarak incelenmesi yerinde olacaktır (Yalçın ve Gürü, 2006).

Çimento üretimi döner fırında devam ederken sıcaklığın artmasına bağlı olarak ilk etapta kalsiyum alüminatlar akabinde de kalsiyum silikatların (CS) oluştuğunu görmekteyiz. Fakat sıcaklığın yüksek olmasının da getirdiği sebeplerden iç yapılarında tam bir kimyasal stabilite oluşmamaktadır. İlaveten ana bileşenlerin kristal yapılarındaki farklılık ve klinker içerisindeki yabancı maddeler dengesizliği desteklemektedir. Aşağıda ana bileşenlerin yapıları detaylandırılacaktır (Koçak, 2008).

2.1.9.1 C_3S

Alit ismini de alan en önemli klinker bileşenlerinden birisidir. Kübik mikrokristal ve aynı zamanda köşeli bir yapıya sahiptir. Yüksek enerjiye sahip olup belite kıyasla daha reaktif olduğu gözlemlenir (Özgür, 1996). Bileşiğin 20°C 'den 1100°C aralığında altı çeşit allotropik kristal yapısı bulunur. Bu kristallerin en önemli özelliği tamamının su ile reaksiyona girmesi ve priz alabilmesidir (Aydın, 2019).

2.1.9.2 C_2S

Belit olarak da bilinen çimentonun nihai dayanımı için önemli olan bir fazdır. İlk günlerde dayanıma katkısı sınırlı olmakla birlikte ileri dönemlerde C_3S ile benzer dayanım değerleri görülür. Klinkerin yapısında C_3S 'den sonra en çok yer alan bileşiktir. Polimorfolojik bir özelliği vardır. Formu yuvarlak ve açık renkli tanecikler

biçiminde izlenir. Hidratasyon tepkime hızı C_3S 'ye kıyasla daha yavaş ve hidratasyon ısısı açısından düşüktür (Koçak, 2008; URL-3, 2022).

Genellikle (β) C_2S şeklindedir. Ancak burada önemli bir özelliği (β) silikatının (γ) silikatına tek yönlü olarak değişim gösterebilmesidir. Böylece (γ) silikatı kendi başına priz yapmamakta ve klinkerin içerisindeki (γ) silikat oranını azaltmaktadır. Bu bağlamda döner fırının pişirme alanından ayrılmakta olan klinker yapısındaki C_2S (β) kristal yapısından (γ) kristali yapısına değişimi gerçekleşmeden sıcaklık derecesi hızlı bir şekilde düşürülmektedir (Aydın, 2019).

2.1.9.3 C_3A

Klinkerin yapısında çeşitli kalsiyum aluminatlar bulunur. Ancak bunlar arasında en ön planda olanı trikalsiyum alüminattır. Köşeli, prizma görünümünde, kristal, açık gri renkte ve kısmi olarak amorf bir yapıya sahiptir (Koçak, 2008). Klinkerin içeriğinde %5-10 arasında bulunur. Nihai dayanıma etkisi çok azdır. Buna karşılık C_3A 'nın artması erken dayanımı yükselttiği bilinmektedir (URL-3, 2022). Kalsiyum alümina hidratın kararsız bir yapısı vardır. Bu yüzden hızlı bir şekilde kristal yapıya geçip kararlı duruma geçme eğilimi fazladır. Söz konusu bu reaksiyonların çok seri olarak gerçekleşmesine bağlı olarak ısı açığa çıkmaktadır. Bu durumun sonucu olarak yalancı priz olarak bilinen ani katılaşma görülür. Çimentoda istenmeyen bu sonucu ortadan kaldırmak için klinkerin pişirilmesinin ardından, öğütülme aşamasında bir miktar alçı eklenerek işleme devam edilir (Akan, 2019).

2.1.9.4 C_4AF

Klinker içeriğindeki hammaddeler kendi aralarında ikili olarak bir araya gelerek ürünleri meydana getirirler. Sıcaklık seviyesi belirli bir noktaya getirildiğinde üçlü olarak birleşimler de sağlanmış olur. C_4AF klinkerin önemli bileşiklerinden birisidir (Aydın, 2019). Aslında C_2A ile C_4AF katı eriyiğinin yapısına benzerlik göstermektedir (Koçak, 2008). C_3A hidratasyonu yavaş ilerleyen bir süreçtir. C_4AF hidratasyonu C_3A hidratasyonuna benzerlik göstermektedir. Mukavemet değerleri üzerinde çok etkili olduğu söylenemez (Yalçın ve Gürü, 2006).

Hidratasyon boyunca klinker içeriğindeki ana bileşenler oluşumları bakımından değişiklikler gösterirler. Bu yüzden hem PÇ hem de klinkerdeki ana bileşenlerin oranının tespitini kolaylaştırabilmek için üç çeşit yöntem geliştirilmiştir (Koçak, 2008).

2.1.10 Çimento Hidratasyonu

Betonu meydana getiren bileşenler, bir araya getirilmelerini takip eden birkaç saat içerisinde katılarak plastik yapısını kaybederler. Bu durumun temel sebebi su ile bir araya gelen çimentonun bir takım kimyasal tepkimeler meydana getirmesidir. Bu tepkimeler dizisinin tamamı hidratasyon olarak ifade edilmektedir. Hidratasyon gelişiminin istenen düzeyde olabilmesi su ve sıcaklıkla doğrudan ilişkilidir. Reaksiyonlar sırasında açığa çıkan ısı hem üretim hem de sahada önemli sonuçlara sebep olmaktadır. Bu yüzden oluşacak bu reaksiyonların iyi kavranması tüm süreci olumlu yönde etkileyecektir (Akçansa, 2004).

Çimentonun tane çapı oldukça iridir. Bu yüzden su ile bir araya geldiğinde yavaş yavaş çözünme gerçekleşir. Çimento hidrate olarak taneciklerin yüzeyini jel yapısında çevrelemektedir. Bu durumun bir sonucu olarak reaksiyona girmeyen klinkerlerin su ile irtibatı engellenmiş olur. Buna ilaveten oluşan çözeltiye dahil olan klinker bileşiklerinin su ile temas etmesi engellenmektedir. Klinker bileşiklerinin tamamen doymuş duruma gelmesi ile çözünme hızı düşmekte ve hidratasyon hızı zaman ile ters orantılı bir şekilde azalmaktadır (Nas, 2012). Bileşiklerin hidratasyonunun tamamen gerçekleşmesi uzun bir periyotta oluşmaktadır. Bu duruma örnek verecek olursak 28. hidratasyon gününde 4 µm olan penetrasyon değeri, birinci yılını dolduran bir numune için 8 µm değerine ulaşabilmektedir. Bu bilgiler çerçevesinde 50 µm tane çapında bir klinker 5 yılda tamamen hidrate olabilmektedir (Koksal vd., 2022; Yalçın ve Gürü, 2006).

Hidratasyon işlemi başladığında ilk etapta plastik bir kıvamda çimento hamuru oluşmaktadır. Zaman ilerledikçe oluşan hamur, priz başlangıç noktasında plastikliğini kaybeder ardından priz sonu süresine ulaştığında da sertleşerek dayanım kazanmaya başlamakta ve bu durumu sürdürmektedir (Koçak, 2008).

Çimento su ile bir araya getirilmesinin hemen ardından hamur hale gelir ve çok akışkan bir form alır. Çimento taneleri suyun içerisinde askıda kalmış durumdadır. Karışım suyu oranına bağlı olarak taneler arası mesafe değişiklik göstermektedir. Su ile çimentonun birleşimini takip eden birkaç saat sonra hamurun akışkanlığı azalmış buna karşın işlenebilirliği devam etmektedir. Etrenjit adı verilen çubuk formundaki yapılar ve C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) jelleri iğne şeklinde çimento tanelerinin yüzeyinde oluşmuş durumdadır. Hidratasyonun ilk gününün sonunda çimento hamuru tümüyle prizini tamamlamış ve plastik özelliğini kaybederek sertleşmiş bir hamur halini almıştır. Hidratasyonun üçüncü günü tamamlanmıştır. Artık çimento hamuru önemli derecede dayanımın kazanmıştır. Hamur zaman ilerledikçe, yoğunlaşmaya uzun bir süreç içerisinde devam edecektir (Erdoğan, 2006).

Çimento hidratasyon tepkimeleri başladığında her bileşen su ile ayrı ayrı tepkimelere girmektedir. Oluşan bu reaksiyonların sonucu sırasıyla C_3A , C_4AF , C_3S ve C_2S oluşmaktadır. Bunlar aşağıda ayrıntılı olarak anlatılacaktır (Koçak, 2008).

2.1.10.1 C_3A Anabileşeninin hidratasyonu

Su ile en seri şekilde reaksiyona giren çimento bileşeni C_3A 'dır. Bu reaksiyon sonucunda açığa çıkan ısı çok yüksektir. İlk aşamalarda C_4AH_{14} ve C_2AH_8 gibi ürünler meydana gelmekle birlikte elde edilen bu ürünler kararlı olmadığından dolayı $C_3A + 6H \rightarrow C_3AH_6$ ürününe dönüşebilir. Bu durum işlenebilirlik özelliğinin de kaybedilmesine sebebiyet veren ani priz ile sonlanmaktadır. Plastik kıvamını kaybederek sertleşmekte olan betonda, çatlaklara ve dayanım problemlerine sebep olan bu durumun ortadan kaldırılabilmesi ve ani priz mekanizmasını yavaşlatabilmek için bir miktar alçı taşı klinker içerisine, öğütme aşamasında dahil edilmektedir (Erdoğan, 2006; Koçak, 2008; Yeğinbalı, 2003).

Mevcut durumda ortamda alçı bulunmaktadır ve C_3A ile hidratasyonu sonucu etrenjit olarak bilinen $C_3A + 3CSH + 26H \rightarrow C_6AS_3H_{32}$ kimyasal tepkimesi gerçekleşir. Etrenjit, yapı ve görünüm olarak kısa iğne şeklinde kristalleşmektedir. Bu durum çimento hamurunda hacim genişlemesi sonucunu doğurmaktadır. Süreç ilerledikçe ortamdaki sülfat miktarı düşmekte bununla birlikte devam eden C_3A hidratasyonu

neticesinde etrenjit, monosülfat hidrata ($C_6A \cdot S_3H_{32} + 2C_3A + 4H \rightarrow 3C_4A \cdot SH_{12}$) dönüşmektedir (Özdemir, 2020).

Çimento yapısında, hidratasyonun ileri günlerinde monosülfat bulunmaktadır. Etrenjitin oluşumu esnasında bir miktar hacim genişmesi görülür. Ancak bu hal çimento hamurunun şekil verilebilir olan plastik kıvamı sırasında olduğu için herhangi bir sakınca doğurmamaktadır. Buna karşılık sülfat, beton sertleşmesini tamamladıktan sonra ortama dahil olur ve monosülfat hidrat, etrenjite geri dönüş yaparsa genişleme meydana gelerek betonda çatlamalara sebep olmaktadır (Koçak, 2008).

2.1.10.2 C₄AF anabileşeninin hidratasyonu

Felit olarak isimlendirilen ve $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ formülü ile ifade edilen bu bileşen çimento klinkerinde oldukça etkilidir. C₄AF'nin çimento yapısındaki miktarı arttıkça çimentonun rengi de koyulaşmaktadır. Ancak C₄AF'nin dayanıma katkısı önemsiz miktarda azdır (Özdemir, 2020).

C₄AF hidratasyonu için C₂A ve C₂F eriyiklerinin bileşiği olduğu söylenebilir. C₃A'nın hidratasyonuna benzemesine rağmen hızı daha düşüktür. Bunun yanında yapıdaki bir miktar alüminanın yerine demir oksit geçmektedir. Bu reaksiyonların bitiminde alçı çimento içeriğinde olmaz veya minimum seviyenin altında kaldığı durumlarda hidrogarnet ($C_4AF + (6+n)H \rightarrow C_3AH_6 + CFH_2$) olarak tanımlanan kimyasal tepkime ortaya çıkmaktadır. Bu aşamanın akabinde alçı ortama dahil edildiğinde sülfat miktarı ile doğru orantılı olarak $C_4AF + 3C_3S \cdot H + 26H \rightarrow C_6A(F) \cdot S_3 \cdot H_{32}$ ve $C_4AF + C_2S \cdot H + 26H \rightarrow C_4A(F) \cdot SH_{18}$ tepkimede öncelikle etrenjit ve monosülfat hidrat görünümünde bileşikler oluşmaktadır (Nas, 2012).

Çimento üretiminde alçı kullanımı daha öncede belirtildiği üzere son derece önemlidir. Alçı taşının hiç kullanılmadığı veya kullanılması gereken miktarın altında kullanılarak üretilen çimentolarda C₃A'ya göre C₄AF'nin hidratasyonu daha az şiddetli olsa da hidratasyon hızı bakımından oldukça etkili olduğu söylenebilir. Bu durumda yüksek miktarda ısı açığa çıkacaktır (Koçak, 2008).

Betonların sülfat saldırılarına dayanıklı olmasının gerekli olduğu durumlarda C_4AF oranı yüksek, C_3A oranı düşük çimentoların daha verimli olduğu görülmüştür. Ancak bunun sebebi tespit edilememekle birlikte yapısında demir iyonu bulunan kalsiyum-alümino-monosülfat ürünleri, etrenjit şekline sülfatlı ortamlarda dönüşmemesi şeklinde yorumlanmaktadır (Erdoğan, 2006).

2.1.10.3 C_3S ve C_2S anabileşenin hidratasyonu

Silikatlar prizini almış olan çimentonun iskeleti olarak tanımlanabilir (Çavuş, 2008). CS 'ler çimento yapısının yaklaşık olarak %75'ini oluşturmaktadır. Silikatların hidratasyonuna bağlı olarak oluşan bir grup hidrat örgü şeklinde veya lifli düzensiz bir şekilde görülebilmektedir. Söz konusu bu hidratlar fiziksel olarak boşluklu ve şeklini koruyabilen bir jele benzemekle birlikte bu durum kristal suyu miktarları ve CaO/SiO_2 oranlarına göre değişebilmektedir. Bu yapılar $C-S-H$ veya Tobermorit jeli ismi ile tanımlanmaktadır (Koçak, 2008). Söz konusu jeller tipik olarak $1 \times 0,1 \times 0,01 \mu m$ çapından daha küçük, kristal yapısı bakımından zayıf, lif şeklinde ve düzensiz dağılım gösteren kolloidal bir yapıdadır (Erdoğan, 2006). Tobermorit jellerine görsel olarak SEM cihazı ile bakıldığında bir kese üzerine küçük iğneciklerin yerleşmesi ile oluşmuş gibi görülür. Kolloidal kısımda hapsolmuş bir su tabakası yer almaktadır. Asılı vaziyette bulunan katı taneciklerden oluşan tabakalar arasında oldukça küçük boyutlu jel boşlukları da yer almaktadır (Erdoğan, 2013; Koçak, 2008).

Klinkerin ana unsurlarından olan ve kısaca alit olarak isimlendirilen C_3S çimentonun dayanım kazanabilmesi için son derece önemlidir (Erdoğan, 2006). C_3S , standart bir PÇ klinkerinde %58-64 oranları arasında mevcut olması beklenir. Ancak bu oran %65 değerini aştığında çimentonun mukavemetinin düşük olmasına sebep olmakla birlikte pişirme zorlukları oluşturmaktadır (Kula, 2000). Alit kristalleri pişirme süresi ile doğru orantılı olarak büyümektedir. Bu durum dayanım kazanmayı, hidratasyonu ve öğütmeyi olumsuz yönde etkilemektedir (Erdoğan, 2006).

Alit'in, çimento hidratasyonu başladıktan sonra hem ilk hem de son günlerde mukavemete katkısı fazladır. Ancak ilk günlerde çok fazla etkili değildir. C_3S hidratasyonun ilk günlerinde, priz açısından en etkili bileşendir. Hidratasyonun devam

etmesi ile yüksek miktarda CH (kalsiyum hidroksit, Ca(OH)_2) oluşmaktadır. C_3S ve C_2S çimentolarda bağlayıcılık özelliğini kazandıran bileşenlerdir (Erdoğan, 2006). Ancak C_3S oranı yüksek olan çimentolar daha erken dayanım kazanabilmektedirler (Özmal, 2005). Hidratasyon reaksiyonları sırasında hem C_3S hem de C_2S kireç açığa çıkarır. Açığa çıkan bu kireç, alit’de daha fazladır ve çelik donatının paslanmasını geciktirdiği için önemli bir yarar sağlamaktadır. Ancak zamanla gelişen dış tesirlerle yıkanarak yerinin boş kalması sebebiyle, boşluklu bir yapı oluşup, geçirimli bir beton ortaya çıkmasına sebebiyet verecektir (Çavuş, 2008).

Belit olarak isimlendirilen, 2CaO.SiO_2 şeklinde formülize edilen bileşen C_2S ’dir. PÇ’lerde klinkerin yaklaşık %25’ini teşkil etmekte ve çimento üzerinde oldukça etkili bir bileşik olarak bilinmektedir (Erdoğan, 2006). C_2S , C_3S ’den daha yavaş sertlik kazanmasına rağmen nihai dayanım noktasında alit’in mukavemetine erişmektedir. Bu bağlamda, belit’in bağlayıcılığa katkısı hidratasyonun ilk günlerinde düşük iken ilerleyen günlerde oldukça yükseldiği söylenebilir (Kula, 2000). Hidratasyonun önemli ve dikkatle incelenmesi gereken sonuçlarından birisi de ısı açığa çıkarma durumudur. C_2S , C_3S ’nin aksine reaksiyona daha yavaş girmekte ve böylece daha geç hidratasyonunu tamamlayarak daha az oranda ısı açığa çıkardığı görülmektedir (Erdoğan, 2006).

Genel olarak toparlayacak olursak; C_3S reaksiyonu C_2S ’ye göre daha hızlıdır ve bu sebepten C_3S erken dayanım, C_2S ’de geç dayanım açısından daha etkilidir. Su ile alit arasında gerçekleşen reaksiyon $2\text{C}_3\text{S}+6\text{H}\rightarrow\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3+3\text{CH}$ şeklindedir. Aynı şekilde belit ile gerçekleşen reaksiyon ise $2\text{C}_2\text{S}+4\text{H}\rightarrow\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3+\text{CH}$ olarak ortaya çıkmaktadır (Erdoğan, 2013). Çimentolarda bağlayıcılık değerlendirmesinde en önemli kıstas olan C-S-H’a ek olarak formüllerde görüleceği üzere CH’da açığa çıkmaktadır. Böylece bu bileşenlerin hidratasyonu ile yaklaşık %65 civarında C-S-H jeli ve %20 kadar CH elde edilmiş olacaktır (Koçak, 2008).

2.1.10.4 Hidratasyon ısısı ve priz

Çimentonun su ile bir araya gelmesiyle başlayan ve bileşenler arasında oluşan reaksiyonlar dizisiyle ortaya çıkan ısıların tamamı hidratasyon ısısı olarak tanımlanır.

cal/g veya J/g birimleri ile belirlenen bu ısı değeri, standart bir PÇ’de ortalama 120 cal/g veya 500 J/g civarlarındadır (Erdoğan, 2006).

Çimento bileşenlerinin su ile girdikleri reaksiyonlarda kimyasal olarak tam bir denge oluşmadan plastik özelliklerini kaybederek katılaştıkları için yüksek miktarda enerji içerirler ve bu durum ortama hidrasyon ısı olarak yansır. Hidrasyon sürecinde bileşenler birbirinden ayrı olarak değerlendirilemez. Çimentonun bileşimi ile ilişkili olarak priz süresi, ısı yayılımı gibi değerlerde farklılıklar oluşmaktadır. Örneklendirilecek olursa sülfat iyonları kalsiyum CS’lerin hidrasyonunu hızlandırırken, kalsiyum alüminatların reaksiyonlarını yavaşlatmaktadır. Ancak hidrasyonun ilk birkaç gününde oluş hızına göre hızlıdan yavaş tepkimeleri sıralayacak olursak C_3A , C_3S , C_4AF ve C_2S şeklinde olduğu görülür (Yeğinbalı, 2003).

Hidrasyon ısısının yayılma sürecine bakıldığında ilk aşamada çimento taneleri su içerisinde kolloidal bir şekilde kalarak su almaya başlayacaktır. Bileşenlerden alüminat ve sülfatlar hidrate olacak ve yüksek hidrasyon ısı ortama çıkararak etrenjit kristallerinin oluştuğu görülecektir. Akabinde serbest kalan kalsiyum ve hidroksit iyonları ile hidroliz oluşmaya başlamaktadır. Sülfatlı ortamda alüminatların çözünürlüğünün düşümüne bağlı olarak açığa çıkan ısıda hızlı bir şekilde düşmektedir. İkinci aşamaya geçildiğinde ise artık ısı yayılımı daha dengeli bir hale gelmiştir. Hidrolizin devam etmesi ile birlikte iyon yoğunlukları kristalleşmeye yetecek değere ulaşarak, priz başlangıç noktasına ulaşılmaktadır. İkinci aşamanın tamamlanması ile başlayan üçüncü aşamada tekrar ısı açığa çıkışı artmaktadır. C_3S ile C-S-H kristalleşmesi başlamakta ve CH kristalleri yapı içerisinde görülebilmektedir. Ayrıca C_3A ’da etrenjit oluşumu sürmektedir. Jel halindeki çimento tümüyle katılaşmaya başlamaktadır. Grafikte elde edilen tepe noktası, priz bitiş noktası olarak değerlendirilmektedir. Dördüncü aşamaya geçildiğinde artık taneler ile su arasında bir mesafe oluşmaktadır. Bunun sebebi C_3S taneleri üzerindeki C-S-H ve C_3A taneleri üzerindeki etrenjittir. Oluşan bu mesafe hidrasyonu yavaşlatmakta ve buna bağlı olarak da ısı açığa çıkma miktarı zamanla düşmektedir. Ortamdaki sülfatın tükenmesi ile artık C_3A ’dan oluşan etrenjitin yerini monosülfatın aldığı görülebilir. Çimentonun erken dayanım kazanmadaki hızı bu aşamada ortaya çıkar. Son aşamada hidrasyon

ve ısı açığa çıkma durumu oldukça yavaşlamaktadır. Bunun sebebi, çimento taneleri arasındaki C-S-H tabakası giderek kalınlaşmış ve suyun, hidrate olmamış bölgenin iç kısımlarına girebilmesi ancak difüzyon yolu ile sağlanabilecek olmasıdır. Bunun yanında hidrasyon çok daha uzun bir periyotta devam edecektir (Koçak, 2008).

Hidrasyon ısısının beton üretim prosesi içerisinde birçok pozitif ve negatif etkisinin olduğu bilinmektedir. Hava sıcaklığının yüksek olduğu ortamlarda betonda kıvam kayıpları görülmekte ve buna bağlı olarak da iç ısı gerilmelere ve çatlamalara sebep olmaktadır. Bu durumun aksine hava sıcaklığı düşükse açığa çıkan bu ısı, kimyasal reaksiyonlara etki ederek priz ve dayanımın olması gereken sürelerde gerçekleşmesine yardımcı olur (Koçak, 2008).

Geniş alanlarda beton dökümü işlemleri, daha küçük alanlardaki beton dökümlerine kıyasla daha seri bir şekilde gerçekleşebilmektedir. Bu durum beton yapısındaki sıcaklığı yükseltmektedir. Böylece beton dış yüzeyi ortam koşulları ile temas ederek soğurken, iç kısım sıcaklığını daha geç kaybetmektedir. Neticede iç gerilmeler ve büzülmeler meydana gelmektedir (Yeğinobalı, 2003).

Hidrasyon tüm bu iç yapı özelliklerinin yanında bazı dış etkilere de farklı tepkimeler geliştirebilmektedir. Bu noktada birkaç örnek verecek olursak, araştırmacılara göre 25 µm'den daha iri taneli çimentoların, üzerinden yıllar geçmesine karşın hidrate olmadığı ve bu bağlamda çimento inceliğinin, hidrasyon üzerinde önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. Üretim aşamasında kullanılan kıvam suyunun ihtiyaçtan fazla kullanılması priz alma, dayanım kazanma özelliklerini ve sürelerini olumsuz yönde etkilemektedir. Artan veya düşen sıcaklıkların yanında çimento tazeliği gibi faktörler hidrasyon gelişim sürecini değiştirebilmektedir. Betonun priz alması sırasında görülebilecek bir diğer durum yalancı prizdir. Bunun sebebi, klinkerin uygun sıcaklığa inmeden alçı taşının ilave edilerek birlikte öğütülmesi esnasında kristal suyunu kaybedip normal alçıya dönüşmesidir. Çimento hamuru katılaşıyor ancak karıştırılınca yeniden plastik özelliğine dönebiliyorsa bunun yalancı priz olduğu söylenebilir ve teknik olarak herhangi bir mahsuru yoktur (Koçak, 2008).

Çimento hamurunda tüm dünyada kabul görmekte olan Vicat deney metodu uygulanması noktasında bir ortak görüş oluşmuştur. Çünkü priz başlangıç ve bitiş süreleri önemli ancak deney metodu ve deneyi yapan kişinin tecrübesine bağlı olarak göreceli değerler elde edilebilmektedir. Taze beton, priz başlangıcı ile işlenebilirliğini yitirir ve priz sonlanma süresini zamanında tamamlayarak dayanım kazanması gerekir. Bu konu hakkında genel kanı taze bir beton için priz en erken 45-60 dakika sonra başlamalı ve en geç 8-10 saat içerisinde sonlanmalıdır (Koçak, 2008).

2.1.11 Hibrit Çimentolar

Hibrit alkali çimentolar, reaksiyon ürünleri farklı jellerin karmaşık karışımları olan (oluşan ürünün türü büyük ölçüde reaksiyon koşullarına bağlıdır), başlangıçta %20 civarında CaO , SiO_2 ve Al_2O_3 içeren karmaşık çimentolu karışımlardır (García-Lodeiro vd., 2012).

En sık çalışılan hibrit çimentolu sistemler şunlardır:

- Portland çimentosu - yüksek fırın cürufu karışımları
- Portland çimentosu - fosforlu cüruf karışımları
- Portland çimentosu - UK karışımları
- Portland çimentosu - çelikhane ve yüksek fırın cürufu karışımları
- Portland çimentosu - UK - yüksek fırın cürufu karışımları
- Çok bileşenli çimento karışımları

2005 yılında Yip vd. (2005) cüruf ve metakaolin karışımlarının alkali aktivasyonunun erken reaksiyon aşamalarında jeopolimerik jel ve kalsiyum silikat hidratın bir arada var olduğunu gözlemlemiştir. Bu iki fazın bir arada bulunması alkali aktivatörün alkalinitesine ve MK/YFC kütle oranına bağlıdır. Jeopolimerik jel ile birlikte C-S-H jel oluşumu sadece düşük alkalinitedeki bir sistemde meydana gelirken, yüksek NaOH

konsantrasyonlarının varlığında, jeopolimerik jel, bağlayıcı içinde dağılmış küçük kalsiyum çökeltileri ile oluşan baskın faz olmuştur (García-Lodeiro vd., 2012).

2007 yılında Palomo vd. (2007) %30 Portland çimentosu klinkeri ve %70 UK içeren hibrit çimentolar üzerine yaptıkları araştırmanın sonuçlarını rapor etmişlerdir. Sertleşmiş matrislerin karakterizasyon çalışmaları, tüm durumlarda reaksiyon ürünlerinin amorf jellerin (C-S-H + N-A-S-H) bir karışımından oluştuğunu göstermiştir. Bu yazarlar, Portland çimentosu hidratasyonunun OH⁻ konsantrasyonuna ve ortamdaki çözünebilir silikanın varlığına bağlı olarak farklı yollar izlediği sonucuna varmışlardır. Bu yazarların bir diğer dikkat çekici bulgusu da ortam sıcaklıklarında UK aktivasyonunun Portland çimentosunun varlığıyla hızlanmasıdır (García-Lodeiro vd., 2012).

Portland çimentosunun varlığının ortam sıcaklığında kül aktivasyonu üzerindeki olumlu etkisi, OPC hidratasyon reaksiyonu sırasında açığa çıkan ısı ile açıklanabilir; bu ısıdan kaynaklanan enerji de UK'nin yüksek alkali ortamda priz almasını ve sertleşmesini sağlayan kimyasal reaksiyonları harekete geçirecektir (García-Lodeiro vd., 2012).

Özetle, önceki çalışmalar bu iki jelin hibrit çimentolarda birlikte çökmesinin mümkün olduğunu göstermiştir (Palomo vd., 2007; Yip vd., 2005), ancak son araştırmalar iki ürünün iki ayrı jel olarak ayrı ayrı gelişmediğini, ancak etkileşime girdiklerini ve bu süreçte yapısal ve bileşimsel değişime uğradıklarını ortaya koymuştur (Garcia-Lodeiro vd., 2011).

3. DENEYSEL PROGRAM

3.1 Malzemeler

Bu çalışmada alkali ile aktifleştirilmiş hibrit çimento kompozitlerinin hazırlanmasında farklı fabrikalardan temin edilen öğütülmüş yüksek etüv cürufu (YFC) ve üç adet ticari çimento klinkeri (K1, K2 ve K3) kullanılmıştır. YFC'nin özgül ağırlığı 2,83 ve özgül yüzey alanı (Blaine yöntemi) 4250 cm²/g'dir. YFC ve klinkerlerin kimyasal özellikleri Tablo 3.1'de gösterilmektedir. Klinkerlerin kimyasal özellikleri XRF yöntemi ile belirlenmiştir. Klinkerlerin ana bileşikleri XRD yöntemi (Rietveld yöntemi) ile ölçülmüştür. Ayrıca Şekil 3.1 YFC'nin yüksek bir camsı faza sahip olduğunu göstermektedir. Klinker ve YFC'den oluşan hibrit çimentoyu etkinleştirmek için sodyum metasilikat tozu kullanılmıştır. Sodyum metasilikat %51,6 Na₂O, %44,8 SiO₂ ve %3,9 H₂O'dan oluşur. Sodyum metasilikat beyaz renklidir ve %98 saflığa sahiptir.

Tablo 3.1 YFC ve çimento klinkerlerinin (K1, K2 ve K3) kimyasal özellikleri ve ana bileşenleri

Miktar (%)	YFC	K1	K2	K3
CaO	40,7	61,7	62,3	63,3
SiO ₂	34,9	28,2	27,7	28,1
Al ₂ O ₃	11,1	4	4,1	3,8
Fe ₂ O ₃	0,9	3,3	3,6	3
MgO	9,1	1,6	1	1,5
SO ₃	0,2	0,9	1,7	1,6
Na ₂ O	0,5	1,8	1	0,9
K ₂ O	0,7	0,7	0,8	0,9
Cl	-	<0,1	<0,1	<0,1
TiO ₂	-	0,2	0,2	0,2
K ₃ S	-	54,6	60,2	64,9
C ₂ S	-	26,1	19,0	15,5
K ₃ A	-	4,8	4,6	4,8
C ₄ AF	-	10,0	10,9	9,1
K ₃ S/C ₂ S	-	2,1	3,2	4,2
(K ₃ S+C ₂ S)/(K ₃ A+C ₄ AF)	-	5,4	5,1	5,8

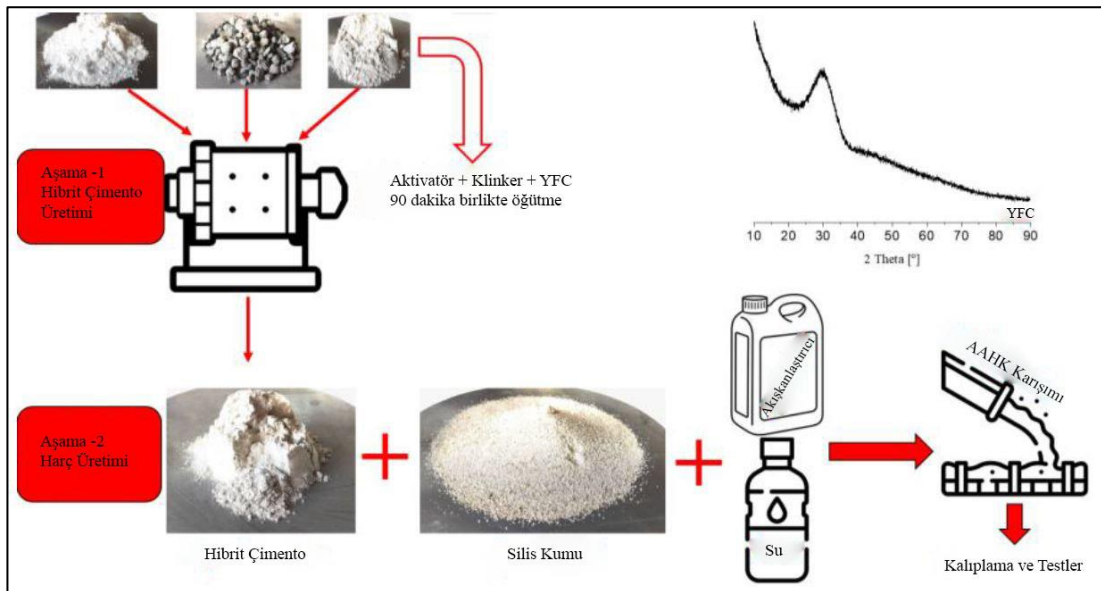
Hibrit çimento kullanılarak hazırlanan harçlarda silis kumu kullanılmıştır. Silis kumunun özgül ağırlığı 2,77 ve su emmesi %1,9'dur. Silis kumunun elek açıklığı 0-2 mm ve incelik modülü 2,9'dur. Ayrıca harçların hazırlanmasında işlenebilirliği

arttırmak için yeni nesil polikarboksilik eter bazlı süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Plastikleştiricinin özgül ağırlığı 1,09'dur ve katı içeriği %38'dir.

3.2 Hibrit Çimento ve Harçların Hazırlanması

Bu çalışma kapsamında hazırlanan kompozitler iki aşamada üretilmiştir. İlk olarak klinker, YFC ve alkali aktivatörün öğütülmesi ile hibrit çimento elde edilmiştir. Daha sonra hibrit çimento ve silis kumundan harçlar üretilmiştir. Çalışma kapsamında kompozitlerin elde edilme aşamaları Şekil 3.1'de verilmiştir.

Hibrit çimentonun hazırlanmasında klinker YFC yerine %10 ve %30 oranlarında kullanılmıştır. YFC aktivasyonu için bilyalı değirmene %10 ve %20 oranında sodyum metasilikat ilave edilmiştir. Bilyalı değirmene 5 kg partiler halinde YFC ve klinker yüklenmiştir. Daha sonra YFC ve klinkerin (5 kg) ağırlıkça %10 ve %20'sinde sodyum metasilikat (MS) ilave edilmiştir. Bu şekilde tüm toz malzemeler 90 dakika birlikte öğütülmüştür. Değirmen için hazırlanan parti özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Tablo 3.3 karışımların moleküler oranlarını göstermektedir. Bilyalı değirmen yardımıyla hibrit çimento hazırlandıktan sonra Tablo 3.4'te verilen karışım oranları ile harçlar hazırlanmıştır. Aşama-2 çalışmasında üretilen harçlarda yüksek basınç dayanımı hedeflendiğinden düşük s/ç oranı tercih edilmiştir.



Şekil 3.1 Kompozitlerin üretim aşamaları

Tablo 3.2 Hibrit çimentonun içerik özellikleri

Karışım ID	İçerik oranları (%)			Ağırlık (g)			
	Klinker tipi	YFC	Klinker	MS	YFC	Klinker	MS
K1-30M10	K1	70	30	10	3500	1500	500
K2-30M10	K2	70	30	10	3500	1500	500
K3-30M10	K3	70	30	10	3500	1500	500
K1-10M10	K1	90	10	10	4500	500	500
K2-10M10	K2	90	10	10	4500	500	500
K3-10M10	K3	90	10	10	4500	500	500
K1-30M20	K1	70	30	20	3500	1500	1000
K2-30M20	K2	70	30	20	3500	1500	1000
K3-30M20	K3	70	30	20	3500	1500	1000
K1-10M20	K1	90	10	20	4500	500	1000
K2-10M20	K2	90	10	20	4500	500	1000
K3-10M20	K3	90	10	20	4500	500	1000

Tablo 3.3 Karışımların moleküler oranları

Moleküler oran	MS=10%						MS=20%					
	YFC/K=70/30			YFC/K=90/10			YFC/K=70/30			YFC/K=90/10		
	K1	C2	K3	K1	C2	K3	K1	C2	K3	K1	C2	K3
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3,73	4,17	4,16	4,67	3,72	4,14	4,15	4,63	3,73	4,19	4,16	4,69
Na ₂ O/SiO ₂	0,15	0,16	0,25	0,27	0,15	0,16	0,25	0,26	0,15	0,15	0,25	0,26
Na ₂ O/Al ₂ O ₃	0,56	0,67	1,05	1,25	0,55	0,65	1,05	1,22	0,55	0,65	1,05	1,23
CaO/SiO ₂	1,11	1,26	0,99	1,12	1,11	1,27	0,99	1,13	1,11	1,27	0,99	1,14

Tablo 3.4 AAHÇ için karışım oranları (kg/m³)

Bileşenler	Hibrit Çimento	Su	Silis Kumu	Yayılma kanılaştırıcı**	s/ç
Ağırlık (kg)	750	225	1306 ± 25*	37,5	0,30

*Agrega ağırlığı çimentonun özgül ağırlığına göre değişir

**hibrit çimento ağırlığının %5'i

3.3 Jeopolimer Karışımın Dökümü ve Kürlenmesi

Bu çalışmada harçları hazırlamak için 5lt kapasiteli bir Hobart karıştırıcı kullanılmıştır. İlk olarak hibrit çimento ve agrega 140 rpm'de 1 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra kuru karışıma suyun yarısı ve akışkanlaştırıcı ilave edilmiştir. Yarı-ıslak karışım 140 rpm'de 1 dakika ve 285 rpm'de 3 dakika karıştırılmıştır. Karışım yaklaşık 2 dakika dinlendirilmiştir. Daha sonra kalan su ve akışkanlaştırıcı karışıma ilave edilerek 145 devirde 1 dakika karıştırılmıştır. Son aşamada ıslak karışım 280 rpm de 5 dakika karıştırılmıştır. Yayılma çapı yeterli olan karışımlar kalıplarına yerleştirilmiştir. Hibrit çimento ile üretilen harçlar 24 saat sonra kalıplarından çıkarılarak kür işlemine geçilmiştir. Bu çalışmada sertleşen harçlar üzerinde etüv,

buhar ve standart su olmak üzere üç farklı kür işlemi gerçekleştirilmiştir. Etüv ve buhar kürleri 24 saat süreyle 80°C uygulandı. Numuneler, kürleşme süresinin bitiminden sonra deney gününe kadar laboratuvar ortamında tutuldu. Etüv ve buhar kürü, 10°C/dk ısıtma adımına sahip laboratuvar tipi bir etüv kullandı. Buhar küründe, numuneler plastik kaplara yerleştirilmiş ve nemi sağlamak için kapların içine numune hacimlerine göre su ilave edilmiştir. Numuneler standart su küründe test gününe kadar suda bekletilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada 36 farklı karışım üretilmiştir.

3.4 Test Prosedürü

Karışımların taze hal, dayanıklılık, fiziksel, mekanik ve mikroyapısal özelliklerini incelemek için bu çalışmada çeşitli testler kullanılmıştır. Tablo 3.5, gerçekleştirilen testleri, her test için hazırlanan örneklerin büyüklüklerini ve test standartlarını listeler.

Tablo 3.5 Gerçekleştirilen testler, numunelerin boyutu ve test standartları.

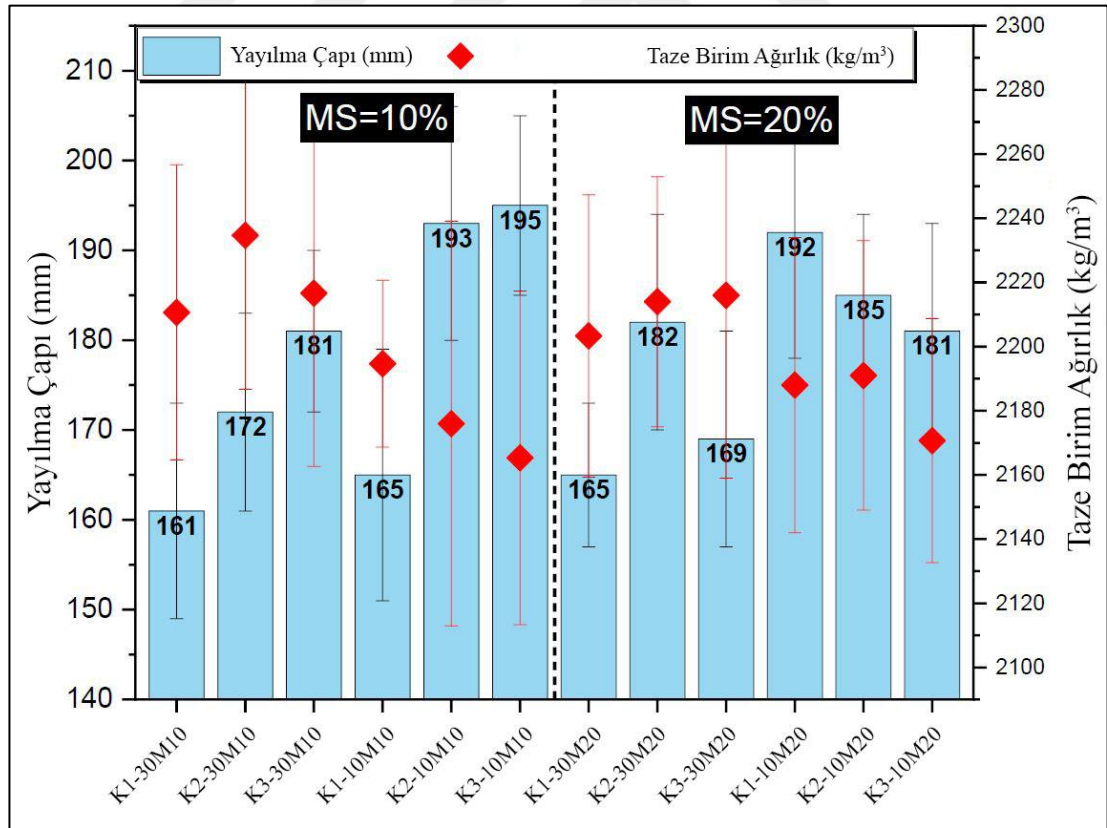
Test	Standart	Örnek boyut (mm)	Test günleri
Yayılma Çapı	ASTM K1437[30]	Taze harç	
Porozite	ASTM C642[31]	50x50x50	91-gün
Su emme			
Etüv kurusu birim ağırlığı			
Basınç dayanımı	ASTM K349[32]	40x40x160	7-28-91 gün
Eğilme dayanımı	ASTM K348[33]	40x40x160	7-28-91 gün
Kapilarite	ASTM K1585[34]	50x50x50	91 gün
Kuruma büzülmesi	ASTM C596[35]	25x25x285	91. güne kadar
Sülfat direnci	ASTM K1012[36]	25x25x285	91. güne kadar
Alkali silika reaksiyonu	ASTM K1260[37]	25x25x285	56. güne kadar
Donma-çözülme direnci	ASTM C666[38]	40x40x160	60-100 döngü
Yüksek sıcaklık direnci		40x40x160	300-600-900°C

4. SONUÇ VE TARTIŞMALAR

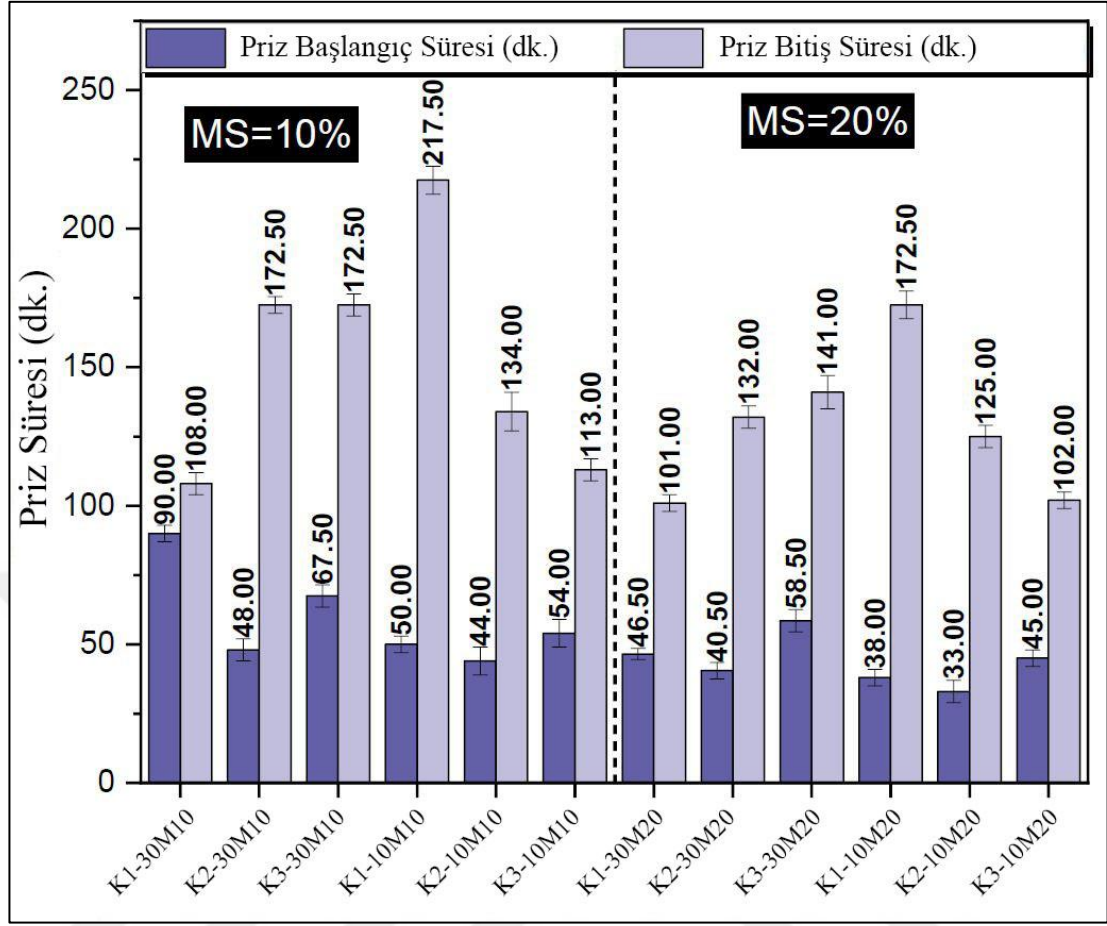
4.1 Taze Hal Özellikleri

Şekil 4.1a, çimento klinker tipi ve MS içeriğinin alkali ile aktive edilmiş hibrit YFC/K kompozitlerinin (AAHÇ) kıvamı (çökme) üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 4.1b klinker tipi ve MS içeriğinin AAHÇ'nin priz süresi üzerindeki etkisini göstermektedir. AAHÇ kullanılarak yapılan taze harç ve betonun işlenebilirliği, PÇ konsantrasyonu, malzemelerin türü ve miktarı, alkali aktivatörlerin türü ve içeriği ve aktivatör/bağlayıcı oranı gibi bir dizi faktöre bağlıdır (Amer vd., 2021; Mohapatra ve Pradhan, 2022). Şekil 4.1'te gösterilen tüm AAHÇ karışımları için çökme değerleri 161 mm ile 195 mm arasında değişmektedir. %10MS ile aktive edilen AAHÇ karışımları için işlenebilirlik (yayılma çapı olarak) klinker tipine göre değişmiştir. En düşük çökme K1 kodlu klinker tipine sahip AAHÇ karışımı için, en yüksek çökme ise 70/30 ve 90/10 YFC/Klinker (K) oranlarının her ikisinde de K3 kodlu klinker tipine sahip AAHÇ karışımı için ölçülmüştür. Tüm tiplerde düşük klinker içeriği içeren AAHÇ karışımları için daha yüksek yayılma değerleri belirlenmiştir. Klinkerin alkali aktivatörlerin varlığında hızlı priz almasına neden olan hızlı kimyasal reaksiyonu, klinker konsantrasyonundaki artışla birlikte yayılma değerindeki düşüşün nedeni olabilir (Amer vd., 2021; Askarian vd., 2018). Öte yandan, %20 MS alkali dozajındaki artışla birlikte, klinker tipine ve AAHÇ karışımlarındaki içeriğe bağlı olarak yayılma değerleri artmış veya azalmıştır. YDC/K oranı 90/10 olan AAHÇ karışımları için akış değerlerinde ters bir davranış gözlenmiştir. Şekil 4.1b, klinker tipi ve MS içeriğinin AAHÇ karışımlarının priz süresi üzerindeki etkisini göstermektedir. AAHÇ karışımlarının ilk ve son priz süresini etkileyen ana faktörler Şekil 4.1b'de görüldüğü gibi klinker tipi ve içeriği ile alkali dozajıdır. Alkali aktivatörlerinin varlığı klinkerin hidratasyonunu hızlandırarak AAHÇ'nin priz alması için gereken süreyi azaltmıştır (Suwan ve Fan, 2014). Klinker miktarı arttığında, AAHÇ'nin priz süresinin azaldığı kaydedilmiştir (Askarian vd., 2018; Xue vd., 2021a). %10MS içeren AAHÇ karışımlarının minimum başlangıç ve maksimum nihai priz süreleri sırasıyla 44 ve 217 dakika olmuştur. En düşük ve en yüksek priz süreleri %10C ve %90 YFC içeren AAHÇ karışımları için ölçülmüştür. Klinker tipi K1 olan karışım, daha düşük C₃S

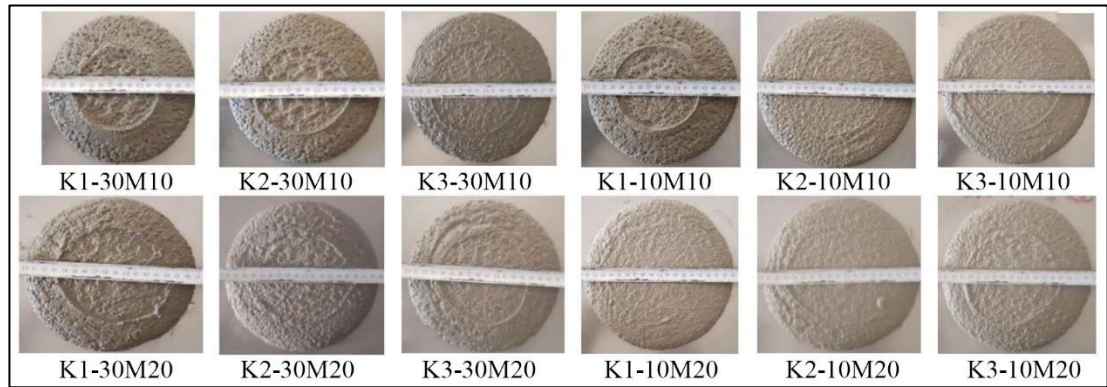
içeriği nedeniyle en yüksek nihai prizi gösterirken, klinker tipi K2 olan karışım en düşük başlangıç prizini göstermektedir. Daha yüksek alkali dozajı olan %20MS içeren AAHÇ karışımları, %10MS içeren karışımlara kıyasla daha düşük başlangıç ve son priz göstermektedir. Alkali içeriğindeki artışla birlikte ilk ve son priz süreleri önemli ölçüde kısalmaktadır, bu da alkali ile aktive edilmiş cüruflu çimentonun davranışıyla tutarlıdır. Artan alkali dozuyla birlikte su camı ve NaOH'deki artış bu düşüşe neden olmaktadır. Sodyum meta silikatın yükseltilmesiyle daha büyük bir $[\text{SiO}_4]^{-4}$ konsantrasyonu üretilir ve bunu reaksiyon hızındaki artış izlemektedir. Bu arada daha yüksek bir NaOH içeriği, cüruftan Ca^{+2} salınımını artırarak süreci hızlandırmıştır (Chang, 2003). %20MS içeren karışımlar için çok benzer ancak daha düşük ilk ve son priz süreleri gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, klinker tipi K1 olan karışım daha düşük C_3S içeriği nedeniyle en yüksek nihai prizi sunarken, klinker tipi K2 olan karışım Şekil 4.1'de gösterildiği gibi en düşük ilk prizi göstermektedir. Şekil 4.1c akış tablosu test resimlerini göstermektedir.



a)



b)



c)

Şekil 4.1 Klinker tipinin ve MS içeriğinin AAHÇ karışımlarının yayılma ve priz süresi üzerindeki etkisi (a, b) yayılma tablosu test sonuçları (c)

4.2 Basınç Dayanımı

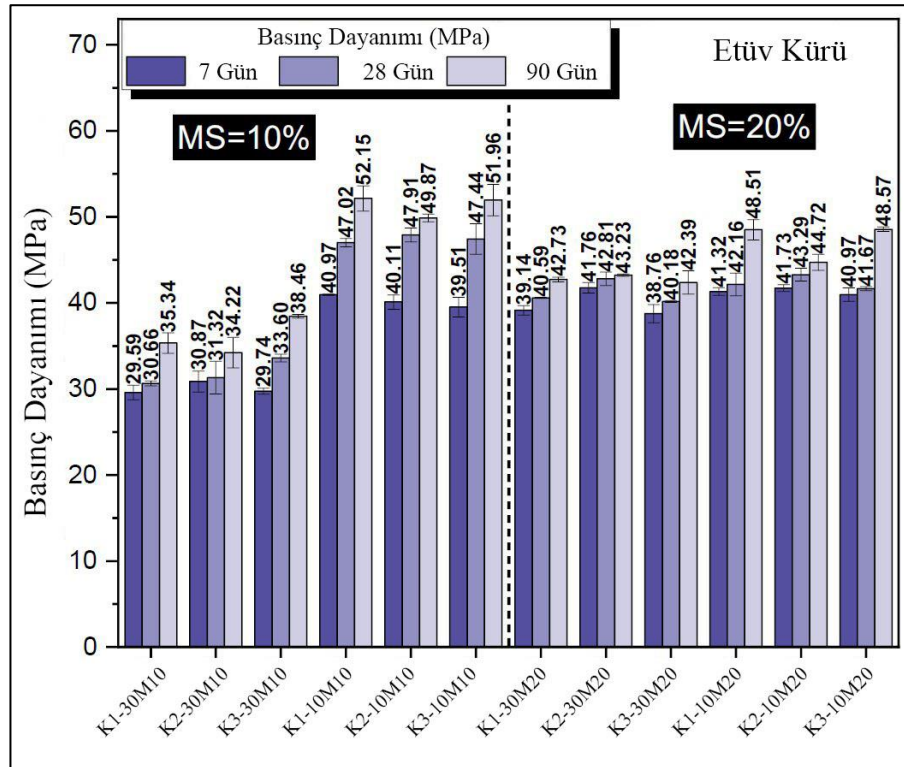
Çimento klinker tipinin, kürlenme rejimlerinin yani etüv kürü, su kürü ve buhar kürü ve aktivatör dozajının AAHÇ karışımlarının basınç dayanımı sonuçları üzerindeki etkisi

Şekil 4.2'te gösterilmektedir. Etüv kürü AAHÇ karışımlarının basınç dayanımı için AAHÇ sistemlerinde Şekil 4.2a'da gösterilmektedir. AAHÇ sistemlerinde, kullanılan aktivatörlerin türü, bileşimi (yüksek Ca veya düşük Ca) ve kürleme rejimlerinin tümü, reaksiyon ürünlerinin mikro yapısı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. %10 MS ile aktive edilen etüv kürü AAHÇ karışımları dikkate alındığında, 7 ile 91 gün için 29 ile 38 MPa aralığında basınç dayanımına sahip olan %10 klinker içerikli karışımlara kıyasla %30 klinker içerikli karışımlarda 7 ile 91 gün için 39 ile 52 MPa aralığında daha düşük basınç dayanımı elde edilmiştir. Alkali bir çözeltide, PÇ'nin hidratasyon reaksiyonu uzar, bu da susuz silikat hidrat hidratasyonunun derecesini azaltır ve çökmek için daha az C-S-H jeli üretir, bu da dayanımın gelişimini azaltır (Duchesne ve Reardon, 1995; Martinez-Ramirez ve Palomo, 2001). %30 klinker içeriğine sahip AAHÇ'nin 7 ile 91 günlük kür yaşlarında basınç dayanımı değerlerinde büyük bir fark olmadığı anlaşılmaktadır. Önceki dayanım testlerinin sonuçları, sıvı sodyum silikat ile aktive edilen çimentosuz YFC harcının, YFC/K karışımından daha yüksek basınç ve eğilme dayanımına sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bir alkali aktivatörün Portland çimentosunun hidratasyonu üzerindeki etkisinden kaynaklanabilir, bu da daha az yoğun olduğu gösterilen büyük miktarda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve Na-ikameli C-S-H (N-C-S-H) gelişimine yol açar ve çimento ve suyun hidratasyon ürününden daha zayıftır (Bilim ve Atış, 2012; Way ve Shayan, 1989). Ek olarak matris, tamamen veya tamamen reaksiyona girmemiş bazı PÇ ve bağlayıcı toz malzemeler içerir. C-A-S-H jeli, susuz çimento parçacıklarının çevresinde koruyucu, yarı geçirgen bir kabuk oluşturarak difüzyonu önleyebilir ve reaksiyonun gelişimini yavaşlatabilir. AAHÇ sisteminde bulunan reaksiyona girmemiş veya kısmen reaksiyona girmiş PÇ partiküllerinin nedeni bu olabilir (García-Lodeiro vd., 2013). Ayrıca PÇ'nin her yaşta dayanımın %20'ye varan oranda artmasına ve sonrasında azalmasına neden olduğu tespit edilmiştir. %20'nin üzerindeki PÇ içeriği ile dayanımdaki kayıp, daha yüksek PÇ konsantrasyonlarında kalsiyum içeriğindeki artıştan kaynaklanabilir, bu da silis ve alümina seviyelerini düşürür ve dolayısıyla polimerizasyon kapsamını ve jeopolimer ürünlerin üretimini azaltır (Mehta ve Siddique, 2017). Şekil 4.2a'da gösterildiği gibi 90/10 YFC/K oranı içeren etüv kürü uygulanmış AAHÇ karışımları dikkate alındığında, Şekil 4.2a'da gösterildiği gibi 70/30 YFC/K oranı içeren karışımlara kıyasla 7, 28 ve 91 günlük yaşlar için sırasıyla yaklaşık %33, %51 ve %42 dayanım artışı ölçülmüştür. %20 MS ile aktive edilen etüv kürü uygulanmış AAHÇ karışımları

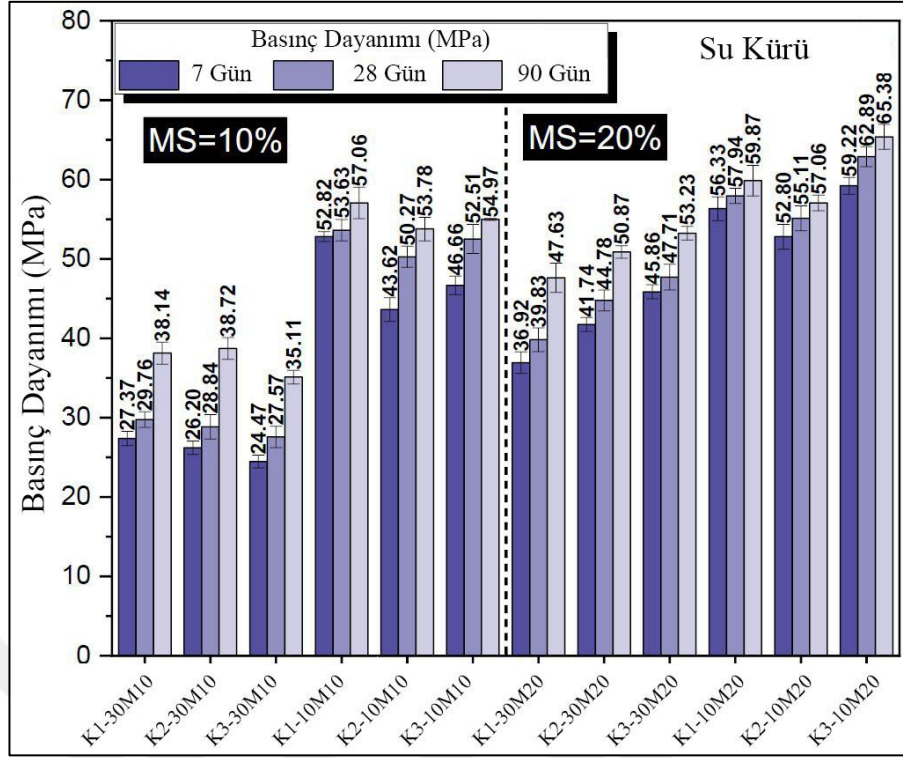
dikkate alındığında, basınç dayanımı beklendiği gibi yaşla birlikte artmış ve MS içeriğindeki artışla birlikte, Şekil 4.2a'da gösterildiği gibi hızlandırılmış aktivasyon süreçlerine bağlı olarak basınç dayanımı değerleri artmıştır (Bilim ve Atış, 2012) ve %10MS ile aktive edilen karışımlara kıyasla 7, 28 ve 91 günlük tüm kürlenme yaşlarında YFC/K oranı 70/30 olan karışımlar için yaklaşık 10 MPa daha yüksek dayanım elde edilmiş ve 7, 28 ve 91 günlük kürlenme yaşları arasında çok az dayanım farkı görülmüştür. Bu durumu açıklamak için puzolanik reaksiyon kullanılabilir. Artan MS içeriği, sulu çözeltinin pH'ının yükselmesine neden olur, bu da cürufun çözünmesini hızlandırır ve belirgin şekilde daha güçlü reaktivite, daha kompakt ve daha yoğun matris ile sonuçlanır (Xue vd., 2021a). Öte yandan, %20 MS ile aktive edilen YFC/K oranı 90/10 olan karışımlar, %10 ile aktive edilen karışımlara kıyasla 7 günlük erken yaşta çok hafif bir dayanım artışına sahipken, 28 ve 91 günde biraz daha düşük dayanım göstermiştir. Alkali ortamdaki bir artış, PÇ'nin hidratasyon sürecini geciktirerek daha az anhidrit silikat hidrat hidratasyonu ve daha az C-S-H jel çökmesi ile sonuçlanarak dayanım gelişimini azaltır (Duchesne ve Reardon, 1995; Martinez-Ramirez ve Palomo, 2001). Şekil 4.2b, su ile kürlenmiş AAHÇ karışımlarının basınç dayanımı sonuçlarını göstermektedir. %10 MS ile aktive edilen AAHÇ karışımları dikkate alındığında, %30 klinker içeriğine sahip karışımlar, 7 ve 28 günlük erken yaşlarda dayanımda çok az düşüş sergilerken, 91 günde karşılık gelen etüv kürü karışımlarına göre daha yüksek dayanım sergilemiştir. Öte yandan, %10 klinker içeren karışımlar 7, 28 ve 91 günlük tüm kürlenme yaşlarında daha yüksek basınç dayanımı göstermiş ve YFC/K1 oranı 90/10 olan %10MS ile aktive edilen karışımlar için en yüksek dayanım sonuçlarını ortaya koymuştur.

Sonuçlar, %10MS ile aktive edilen su kürlü karışımların, %10MS ile aktive edilen etüv kürlü karışımlara kıyasla daha iyi basınç dayanımı performansına sahip olduğunu doğrulamıştır. Şekil 3b'de gösterildiği gibi %20MS ile aktive edilen su ile kürlenmiş AAHÇ karışımları göz önüne alındığında, tüm karışımlar, özellikle 91 günlük daha geç yaşlarda, etüvde kürlenmiş karışımlara kıyasla en yüksek basınç dayanımı sonuçlarını sergilemiştir. En etkili kür tipinin, daha önceki çalışmalarda bildirildiği gibi kuru birim ağırlığı ve basınç dayanımını artırırken porozite ve kapilariteyi azaltan su kürü olduğu keşfedilmiştir (El-Hassan vd., 2018; Niş ve Altındal, 2021). Su kürü, reaksiyona girmemiş bileşenlerin hidratasyon reaksiyonlarının numunelerde devam

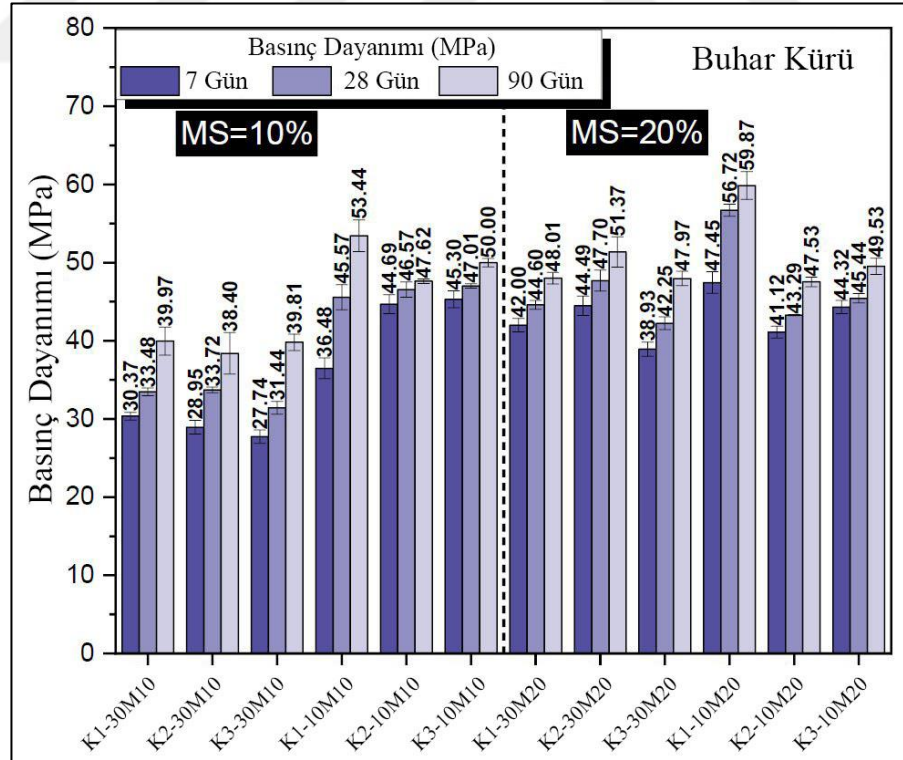
etmesine izin vererek hidrasyon ürünleriyle sonuçlanmış ve mekanik performansı artırmıştır. Alkali aktivasyonu ve hidrasyon ürünlerinin su ile kürlenene numunelerin matrisinde bir arada bulunarak daha yüksek dayanıma sahip AAHÇ oluşturabileceği açıktır. YFC/K3 oranı 90/10 olan karışım 7, 28 ve 91 günlük yaşlarda sırasıyla 59.22, 62.89 ve 65.38 MPa ile en yüksek basınç dayanımını sergilemiştir. Şekil 4.2c'de buharla kürlenene AAHÇ karışımlarının basınç dayanımı sonuçları gösterilmektedir. %10MS ile aktive edilen buhar kürlü AAHÇ karışımları göz önüne alındığında, %30 klinker içeren karışımlar, ilgili etüv ve su kürlü karışımlara kıyasla özellikle 28 ve 91 günlerde biraz daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir. Ancak 7 günlük erken yaşta, etüv kürlü karışımlardan biraz daha düşük ve su kürlü karışımlardan daha yüksektir. %10 klinker içeren karışımlar, etüv ve su ile kürlenene karışımlara kıyasla biraz daha düşük veya daha yüksek benzer basınç dayanımı davranışı göstermiştir. %20MS ile aktive edilen buhar kürlü AAHÇ karışımları dikkate alındığında, YFC/K1 oranı 90/10 olan karışım buhar ve etüv kürlü karışımlar arasında 47,45; 56,72 ve 59,87MPa ile en yüksek basınç dayanımını elde etmiştir. Üç kür tipine maruz kalan AAHÇ karışımlarının tüm basınç dayanımı sonuçları dikkate alındığında, su ve buhar kürü en yüksek basınç dayanımına neden olmuştur.



a)



b)



c)

Şekil 4.2 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin AAHÇ karışımlarının basınç dayanımı üzerindeki etkisi

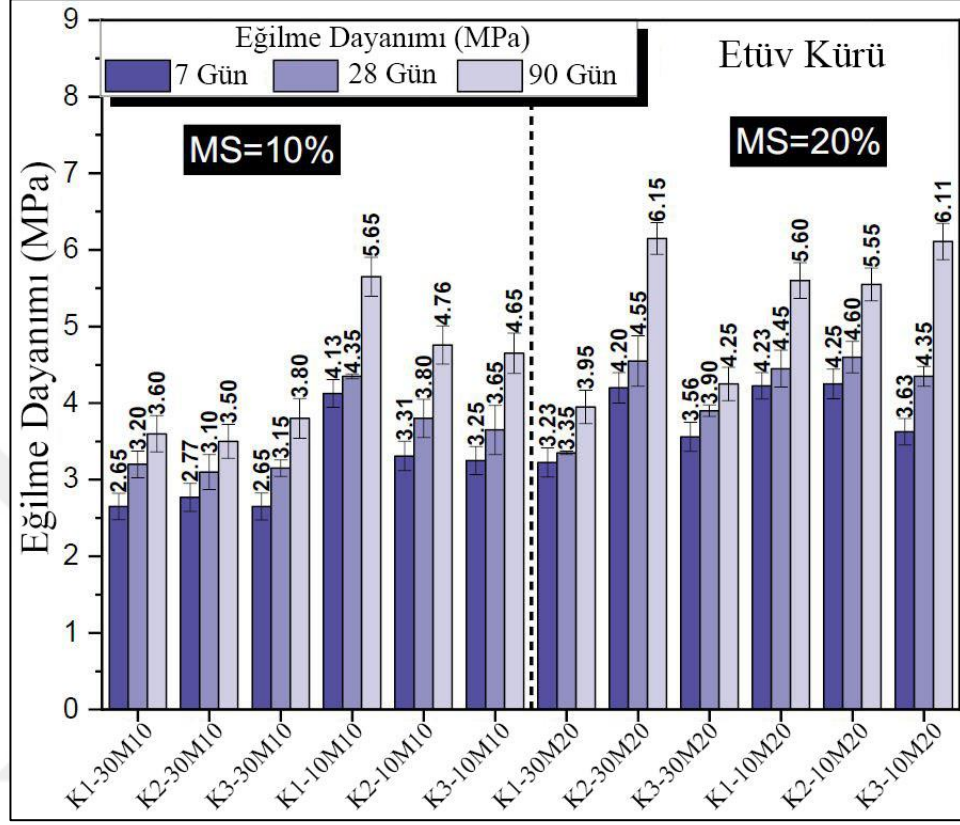
4.3 Eğilme Dayanımı

Çimento klinker tipinin, etüv kürü, su kürü ve buhar kürü olarak adlandırılan kür tiplerinin ve aktivatör dozajının AAHÇ karışımlarının eğilme dayanımı sonuçları üzerindeki etkisi Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Beklendiği gibi, kür tipinden bağımsız olarak tüm AAHÇ karışımlarının eğilme dayanımı kürleme süresiyle birlikte artmıştır. Ayrıca, hızlandırılmış aktivasyon olaylarına bağlı olarak, eğilme dayanımı değerleri MS içeriği arttıkça artmıştır. Şekil 4.3a, etüvde kürlenmiş AAHÇ karışımlarının eğilme dayanımı sonuçlarını sunmaktadır. %10MS ile aktive edilen etüv kürü uygulanmış AAHÇ karışımları dikkate alındığında, basınç dayanımı sonuçlarına benzer şekilde, YFC/K oranı 70/30 olan her üç karışım da 7, 28 ve 91 günlük yaşlarda 2,65 ve 3,80 MPa aralığında çok benzer eğilme dayanımı sonuçlarına sahipken, YFC/K oranı 90/10 olan karışımlar YFC/K oranı 70/30 olan karışımlardan daha yüksek eğilme dayanımı göstermiş ve YFC/K1 oranı 90/10 olan karışım %10MS ile aktive edilen karışımlar içinde en yüksek eğilme dayanımına sahip olmuştur. Fernandez-Jimenez vd. (2014) tarafından elde edilen sonuçlar, uygun bir alkali aktivatör uygulandığında, düşük çimento veya klinker oranlarına sahip karışımların iyi çimentolu özelliklere sahip malzemeler üretebileceğini göstermektedir. Şekil 4.3b'de su ile kürlenmiş AAHÇ karışımlarının eğilme dayanımı sonuçları gösterilmektedir. %10MS veya %20MS ile aktive edilen su ile kürlenmiş AAHÇ karışımları, basınç dayanımı durumunda da gözlemlendiği gibi, kür tipinden bağımsız olarak tüm karışımlar arasında en yüksek eğilme dayanımını göstermiştir. Kuru birim ağırlığı, eğilme ve basınç dayanımını artırırken porozite ve kapilariteyi azaltan su kürü en etkili kürleme yöntemi olarak bulunmuştur (Suwan ve Fan, 2014; Xue vd., 2021a). Su ile kürlendikten sonra, reaksiyona girmemiş bileşenler numunelerde hidrasyon reaksiyonlarına girmeye devam ederek hidrasyon ürünleri üretebilir ve mekanik özellikleri geliştirebilir. Su ve buharla kürlenmiş numunelerin matrisinde, alkali aktivasyonu ve hidrasyon ürünlerinin bir arada bulunarak gelişmiş dayanıma sahip AAHÇ oluşturabileceği açıktır. Alkali aktivasyonu ve hidrasyon ürünlerinin, su ile kürlenmiş numunelerin matrisinde daha yüksek dayanıma sahip AAHÇ üretmek için bir arada bulunabileceği açıktır (El-Hassan vd., 2018; Niş ve Altındal, 2021). Aynı zamanda en yüksek basınç dayanımına sahip olan 90/10 oranındaki YFC/K3 karışımı, 7, 28 ve 91 günlük yaşlarda sırasıyla 5,55; 5,55 ve 7,55 MPa'lık en yüksek eğilme dayanımını sergilemiştir. Saloni

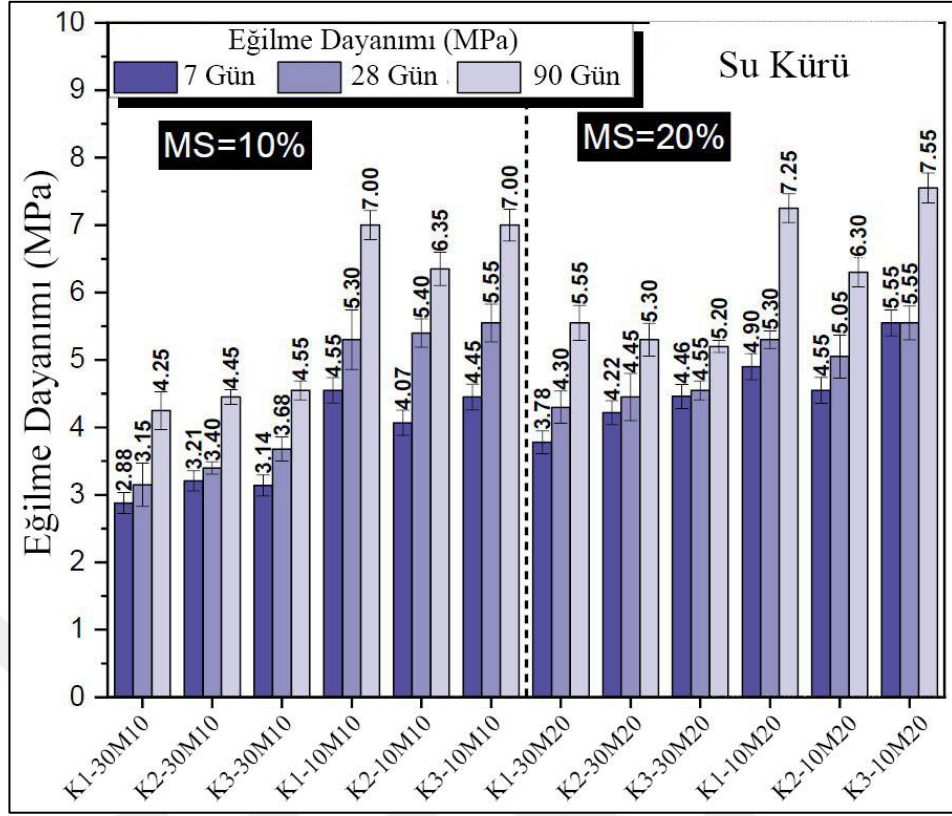
ve diğerlerine göre (Lim ve Pham, 2021), PÇ içeriğinin %0'dan %15'e çıkarılması eğilme, yarmada çekme ve basınç dayanımını iyileştirmiştir. N-A-S-H, C-A-S-H ve C-S-H jellerinin sistemde bir arada bulunması, matris boşluklarını doldurarak gözenek yapısının iyileştirilmesine ve yoğunlaşmaya yardımcı olması, dayanımdaki artış için kredilendirilebilir. En yüksek dayanıma %15 ikame seviyelerinde ulaşılmış olup, %5, %10 ve %15 PÇ ikame seviyelerinin karşılaştırılmasına göre daha düşük PÇ ikame seviyeleri daha yüksek ikame seviyelerine göre daha az dayanım kazanımı göstermiştir. Bu durum daha az yoğun mikroyapıya atfedilebilir çünkü daha düşük PÇ ikamesinde daha yüksek ikameye göre tüm matris boşluklarını tamamen kaplamak için yetersiz jel üretilmiştir. Ayrıca, PÇ içeriği %15'i aştığında dayanım artışı olumsuz bir etki göstermiştir. PÇ'nin hidratasyonu, PÇ ikame seviyesi ideal değeri aştığında (>% 15 PÇ) aşırı ısı oluşmasına neden olmuştur. Daha fazla ısı salınımının bir sonucu olarak matriste mikro çatlaklar oluşmuş, bu da matrisi daha az yoğun ve zayıf hale getirmiştir. Matriste daha düşük silika ve alümina konsantrasyonu ve daha yüksek PÇ ikame seviyeleri, dayanımdaki düşüşün diğer iki açıklamasıdır. Bu faktörler polimerizasyon sürecini yavaşlatır ve daha az jeopolimer ürün üretir [54]. Basınç dayanımı davranışından farklı olarak, özellikle YFC/K oranı 90/10 olan ve su ve buhar kürüne maruz kalan karışımlar için 91 günde daha fazla eğilme dayanımı gelişimi sağlandığı görülmektedir.

Bu bulgular, Şekil 4.3d'de gösterildiği gibi 91 günlük basınç ve eğilme dayanımı arasındaki 0,62'lik korelasyon oranının 7 ve 28 günlük yaşlardan daha düşük olmasıyla da doğrulanmıştır. Şekil 4c'de gösterildiği gibi %10 MS ile aktive edilen buhar kürlü AAHÇ karışımları göz önüne alındığında, %30 klinker içeriği (90/10 oranında YFC/K) içeren karışımlar 91 günde etüv ve su kürü karışım sonuçları arasında orta düzeyde dayanım gelişimi sergilemiştir. Ayrıca, %10 MS ile aktive edilen 90/10 oranındaki YFC/K2 ve YFC/K3'ün buharla kürlenmiş AAHÇ karışımları tüm kürlenme yaşlarında daha yüksek eğilme dayanımı göstermiştir. Öte yandan, %20MS ile aktive edilen bazı etüvde kürlenmiş AAHÇ karışımları daha iyi eğilme dayanımı sergilerken, bazı karışımlar daha düşük dayanıma sahip olmuştur. Şekil 4.3d'de 7, 28 ve 91 günlük basınç ve eğilme dayanımı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Sırasıyla 7 ve 28 günlük basınç ve eğilme dayanımı sonuçları arasında 0,84; 0,70 korelasyon oranı R^2 ile çok

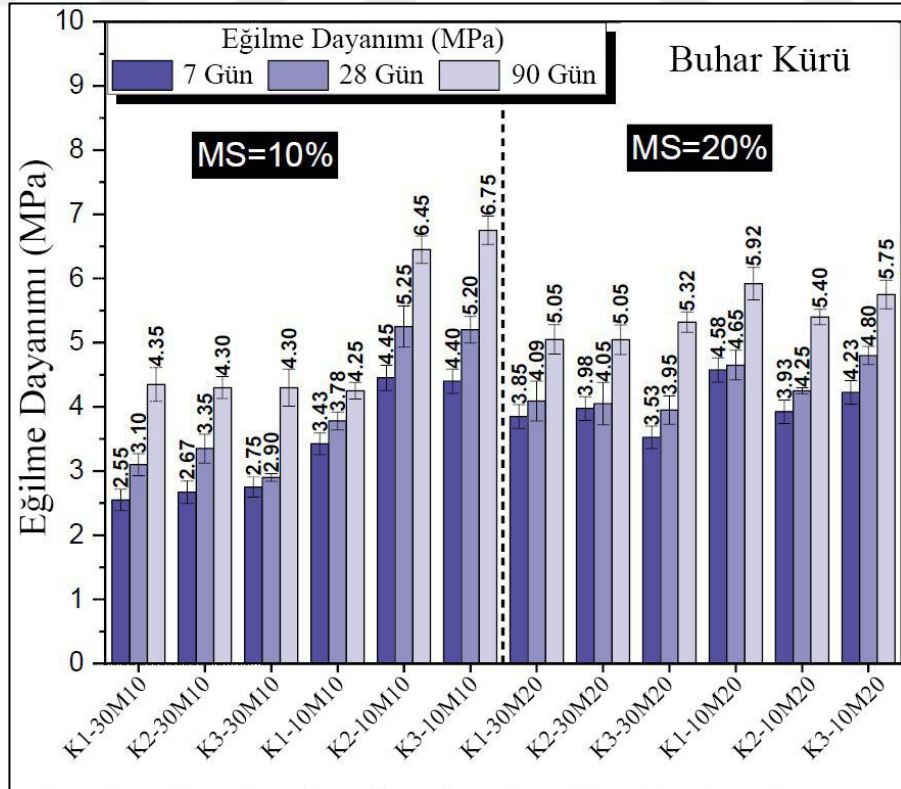
yüksek bir ilişki vardır. 91. günde 0,62'lik R^2 korelasyon oranı iki değer arasındaki en iyi ilişki bulunmuştur.



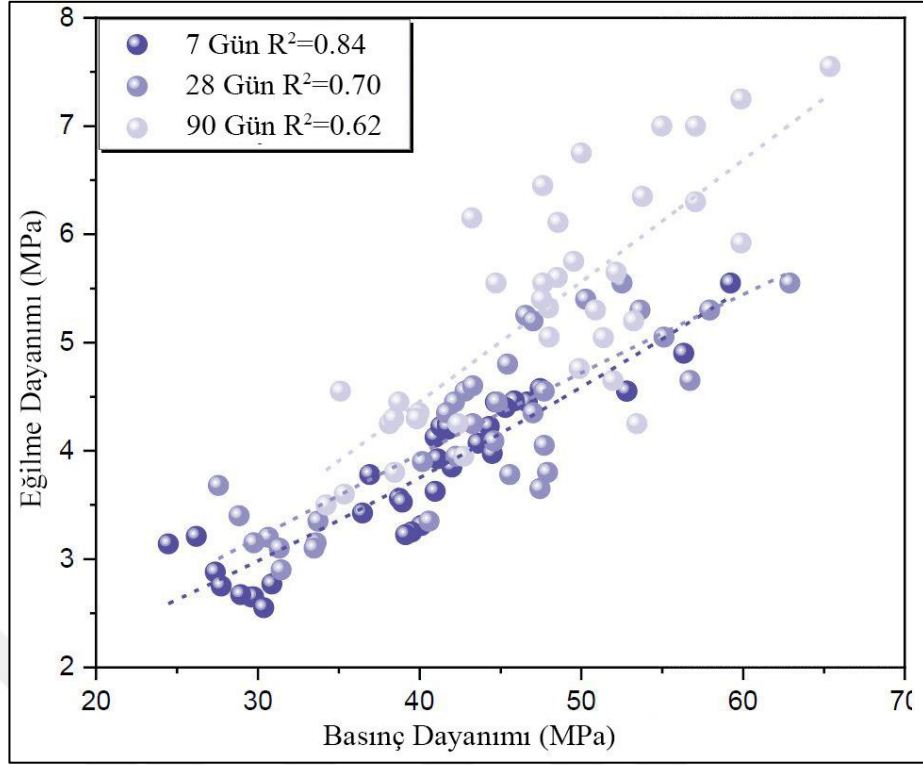
a)



b)



c)



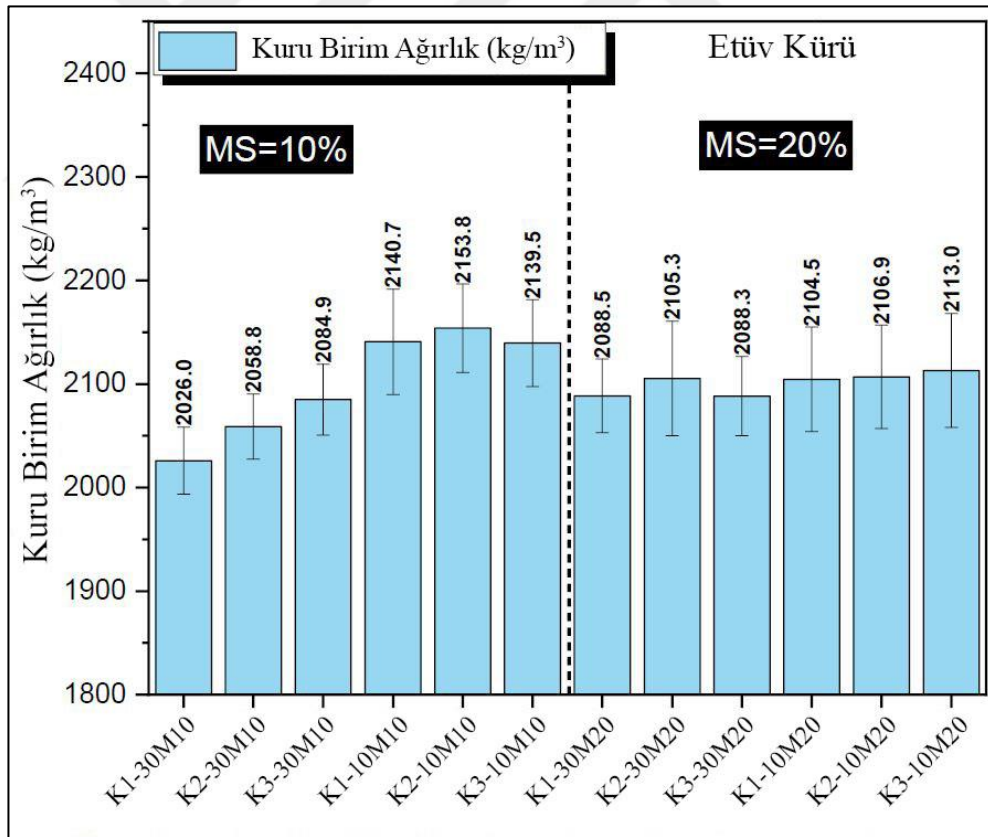
d)

Şekil 4.3 Klinker tipinin, kürlenme rejimlerinin ve MS içeriğinin eğilme dayanımı (a, b, c) üzerindeki etkisi, basınç ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki (d)

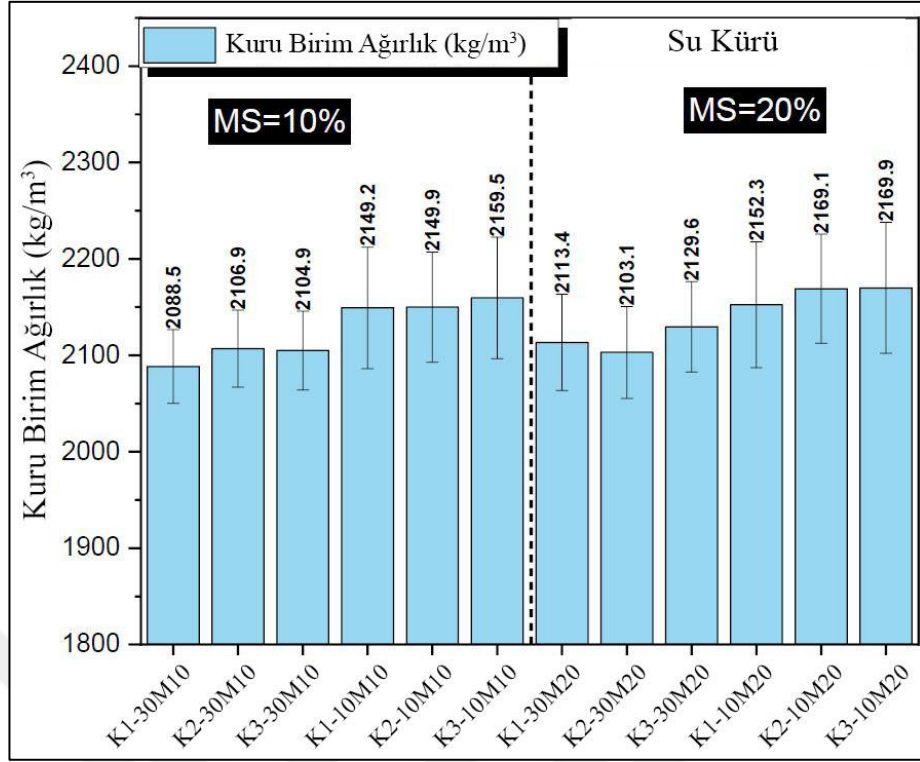
4.4 Kuru Birim Ağırlık

Çimento klinker tipinin, etüv kürü, su kürü ve buhar kürü olarak adlandırılan kür tiplerinin ve aktivatör dozajının 91 gün sonra AAHÇ karışımlarının kuru birim ağırlık sonuçları üzerindeki etkisi Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Şekil 4.4a, etüvde kürlenmiş AAHÇ karışımlarının kuru birim ağırlık sonuçlarını sunmaktadır. Birim ağırlık sonuçları, %10MS ile aktive edilen etüvde kürlenmiş AAHÇ karışımları analiz edilirken karışımların kuru birim ağırlığında 2026 ila 2154 kg/m³ arasında değişen küçük bir fark olduğunu göstermiştir. Basınç dayanımı davranışına uygun olarak, 90/10 oranında YFC/K içeren karışımlar, 90/10 oranında YFC/K içeren karışımlardan marjinal olarak daha büyük bir birim ağırlık göstermiştir. Birim ağırlık sonuçları ayrıca, %20MS ile aktive edilen etüvde kürlenmiş AAHÇ karışımları analiz edilirken karışımların kuru birim ağırlığında 2088 ila 2113 kg/m³ arasında değişen çok küçük bir fark olduğunu göstermiştir. Şekil 4.4a'da gösterildiği gibi %20MS ile aktive edilen etüvde kürlenmiş AAHÇ kombinasyonları değerlendirilirken, birim ağırlık sonuçları karışımların kuru birim ağırlığında 2088 ila 2113 kg/m³ arasında değişen son derece küçük farklılıklar

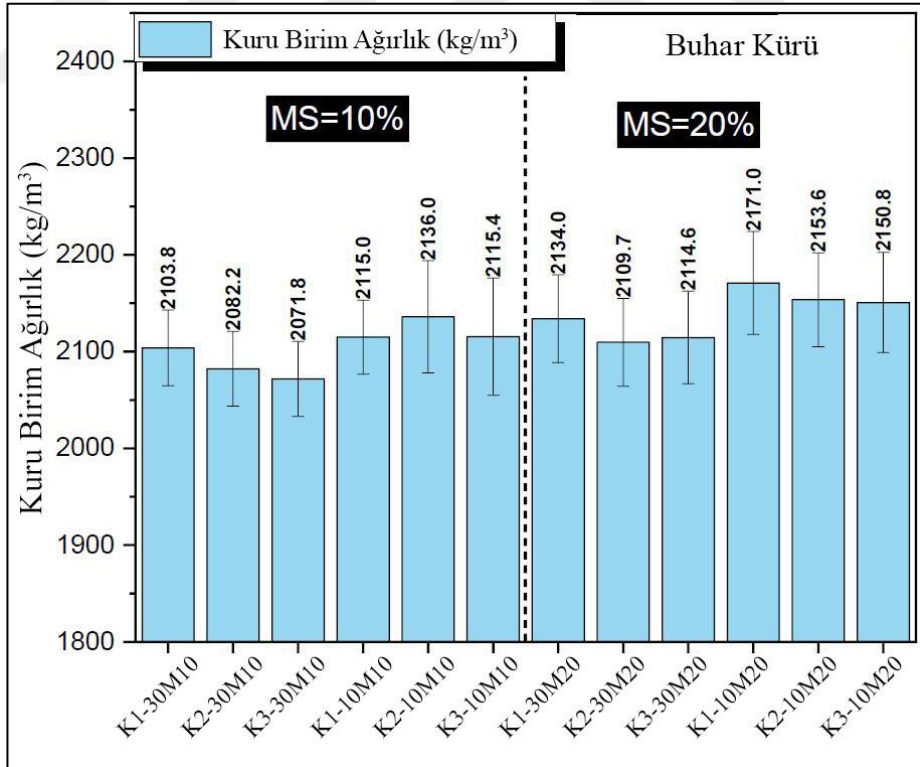
göstermiştir. Şekil 4.4b ve 4.4c'de gösterildiği gibi su ve buharla kürlenmiş AAHC kombinasyonları analiz edildiğinde, birim ağırlık sonuçları karışımların kuru birim ağırlığında çok küçük değişimler ortaya koymuştur. Su ve buhar küreğine maruz kalan 90/10 oranında YFC/K içeren karışımlar için daha yüksek birim ağırlık sonuçları da gözlemlenmiştir. En yüksek birim ağırlık değerleri, su ve buhar küreğine maruz bırakılan 90/10 oranında YFC/K içeren karışımlar için belirlenmiştir. Kuru birim ağırlığı ve basınç dayanımını artırırken porozite ve kapilariteyi azaltan su küreği en etkili kür yöntemi olarak bulunmuştur (El-Hassan vd., 2018; Niş ve Altındal, 2021). Su ile küreldikten sonra, reaksiyona girmemiş bileşenler numunelerde hidrasyon reaksiyonlarına girmeye devam ederek hidrasyon ürünleri üretebilir ve mekanik özellikleri geliştirebilir. Su ve buharla kürlenmiş numunelerin matrisinde, alkali aktivasyonu ve hidrasyon ürünlerinin bir arada bulunarak Şekil 4.4b ve c'de gösterildiği gibi gelişmiş dayanıma sahip AAHC oluşturabileceği açıktır.



a)



b)



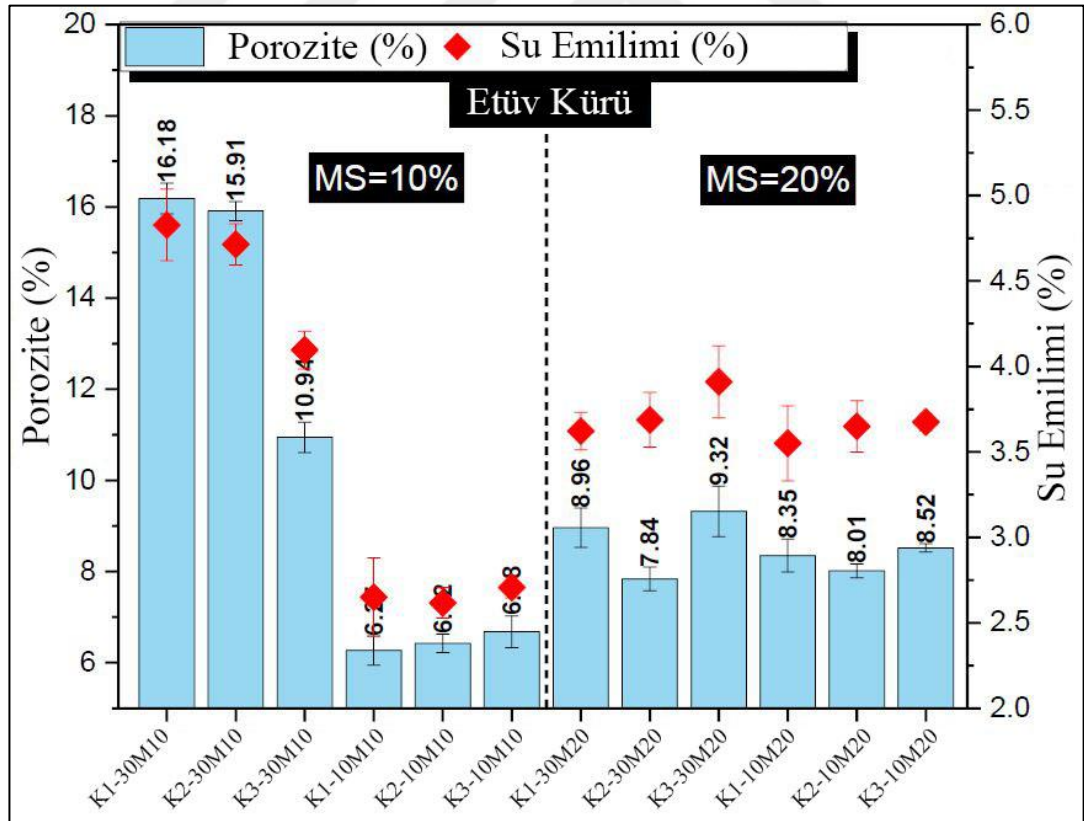
c)

Şekil 4.4 Klinker tipinin, kürlenme rejimlerinin ve MS içeriğinin kuru birim ağırlık (a, b, c) üzerindeki etkisi

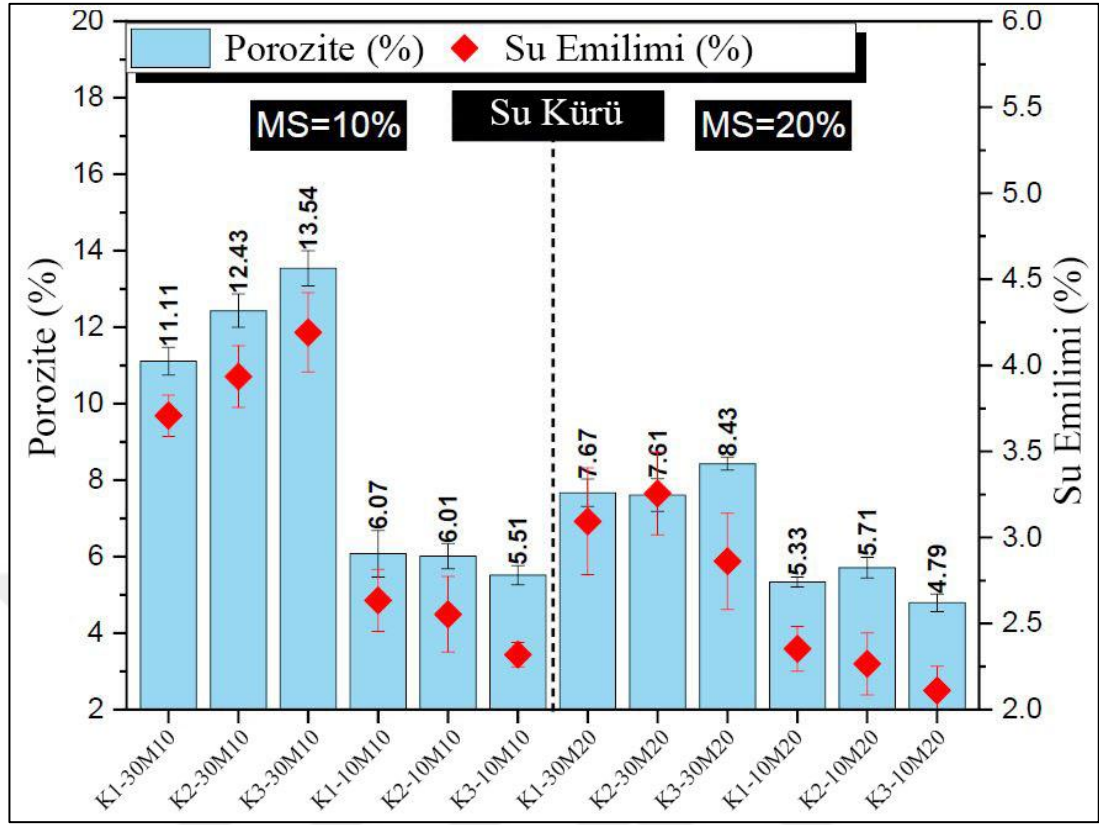
4.5 Gözeneklilik ve Su Emme

Şekil 4.5, çimento klinker tipinin, etüv, su ve buhar kürü dahil olmak üzere kür yöntemlerinin ve aktivatör dozajının 91 gün sonra AAHÇ kombinasyonlarının porozite ve su emme sonuçları üzerindeki etkisini göstermektedir. Beklendiği ve Şekil 4.5'da görüldüğü gibi, YFC/K oranı 70/30 olan tüm AAHÇ karışımları, YFC/K oranı 90/10 olan karışımlardan daha yüksek porozite ve su emme sonuçları sergilemiştir. Kürleme koşulları veya alkali aktivatörü ne olursa olsun, yüksek konsantrasyonda YFC içeren hibrit alkali aktivasyonlu harçlar hem genç hem de ileri yaşlarda daha iyi basınç dayanımına sahiptir. Bunun nedeni, YFC'nin yüksek CaO konsantrasyonuna ve camsı özelliklere sahip olması, bunun da C-A-S-H jellerinin oluşturulmasını kolaylaştırması ve mikro yapıyı geliştirirken gözenekliliği azaltması olabilir (Coppola vd., 2019). Geçirgen boşluklar ve mikro çatlaklar %10 klinker içeriği ile tıkanarak kapilarite, porozite ve su emilimi azaltılmıştır. Kalsiyumdaki artış ve %30'luk daha yüksek klinker içeriğinin neden olduğu alümina ve silikadaki azalma, önemli ölçüde daha zayıf bir jeopolimer matrisine ve dayanıklılığı etkileyen gelişmiş geçirgenliğe yol açmıştır (Jindal, 2019; Yip vd., 2005). %20MS ile aktive edilen tüm karışımlar, sodyum silikattaki artışın genel gözenekliliği azaltması nedeniyle ilgili karışımlara kıyasla daha düşük gözeneklilik göstermiştir; bu durum muhtemelen çalışmada rapor edilen termo gravimetrik analizde gösterildiği gibi sodyum silikattaki artışı takip eden daha şiddetli hidrasyonun bir sonucudur (Neto vd., 2008). Şekil 4.5a'da gösterildiği gibi etüvde kürlenmiş AAHÇ kombinasyonları değerlendirilirken, en yüksek ve en düşük gözeneklilik ve su emme sonuçları sırasıyla 70/30 ve 90/10 YFC/K oranına sahip %10MS ile aktive edilen karışımlar için belirlenmiştir. YFC/K oranı 70/30 olan ve %10MS ile aktive edilen karışımlarla karşılaştırıldığında, %20 MS ile aktive edilen etüv kürlü karışımlar için MS içeriğindeki artışla basınç dayanımı değerleri artmış ve porozite azalmıştır; porozite değerleri hızlandırılmış aktivasyon olaylarına bağlı olarak %7,84 ile %9,32 arasında değişmektedir (Bilim ve Atış, 2012). Şekil 4.5b'de gösterildiği gibi suda kürlenmiş AAHÇ karışımları değerlendirildiğinde, etüvde kürlenmiş karışımlara benzer şekilde, YFC/K oranı 70/30 olan ve %10 MS ile aktive edilen karışımlar en yüksek porozite ve su emme sonuçlarını sergilemiş ve sonuçlar, azalan belit (C_2S) içeriği nedeniyle etüvde kürlenmiş karışımların aksine YFC/K1'den YFC/K3'e doğru artmıştır. Öte yandan, YFC/K oranı 70/30 olan ve %20 MS ile aktive

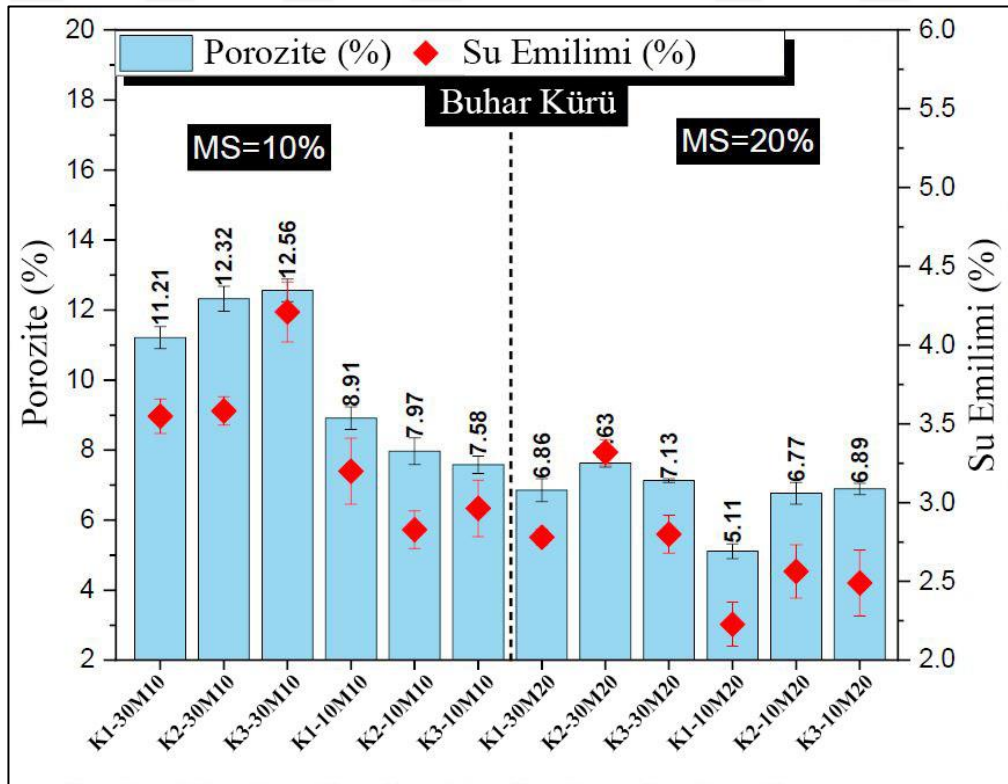
edilen karışımlarda, artan MS içeriğine bağlı olarak hızlanan aktivasyon reaksiyonları ile porozite ve su emme sonuçları azalmıştır. YFC/K oranı 90/10 olan ve %10 veya %20 MS ile aktive edilen karışımlarda daha düşük sonuçlar elde edilmiş ve tüm karışımlar arasında en yüksek basınç dayanımı sergileyen YFC/K3 oranı 90/10 olan karışımlar Şekil 4.5b'de görüldüğü gibi en düşük porozite ve emilim değerlerine ulaşmıştır. Şekil 4.5c'de gösterildiği gibi buharla kürlen AAHÇ karışımları değerlendirildiğinde, su ile kürlen AAHÇ karışımları için elde edilen sonuçlara çok benzer porozite ve su emme sonuçları, ancak su ile kürlen AAHÇ karışımları için elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında biraz daha yüksek değerler tespit edilmiştir. Şekil 4.5'da görülebileceği gibi, porozite değerleri kombinasyonların ne kadar su emdiğini doğrudan etkilemiştir. AAHÇ karışımlarının basınç dayanımı ve gözenekliliği arasında 0,88'lik bir R^2 regresyon katsayısı ile bir korelasyon olduğunu belirtmek önemlidir. Şekil 4.5d'de basınç dayanımı ve kuru birim ağırlık arasındaki ilişki incelendiğinde, 0,71'lik R^2 korelasyon katsayısı fark edilebilir.



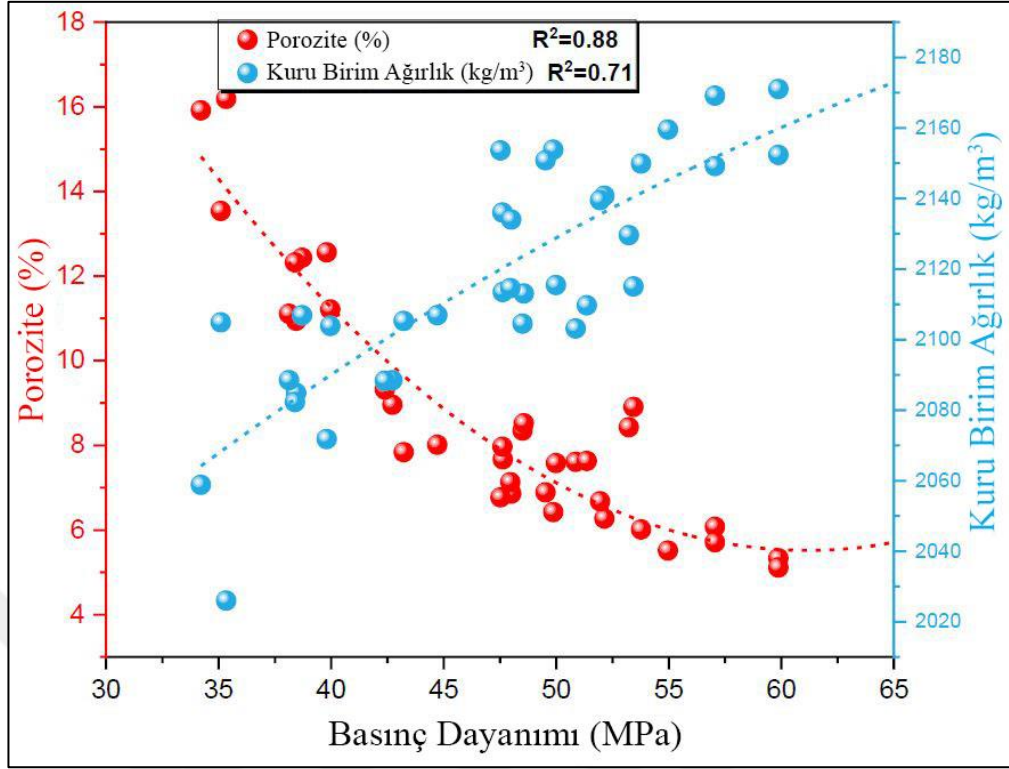
a)



b)



c)



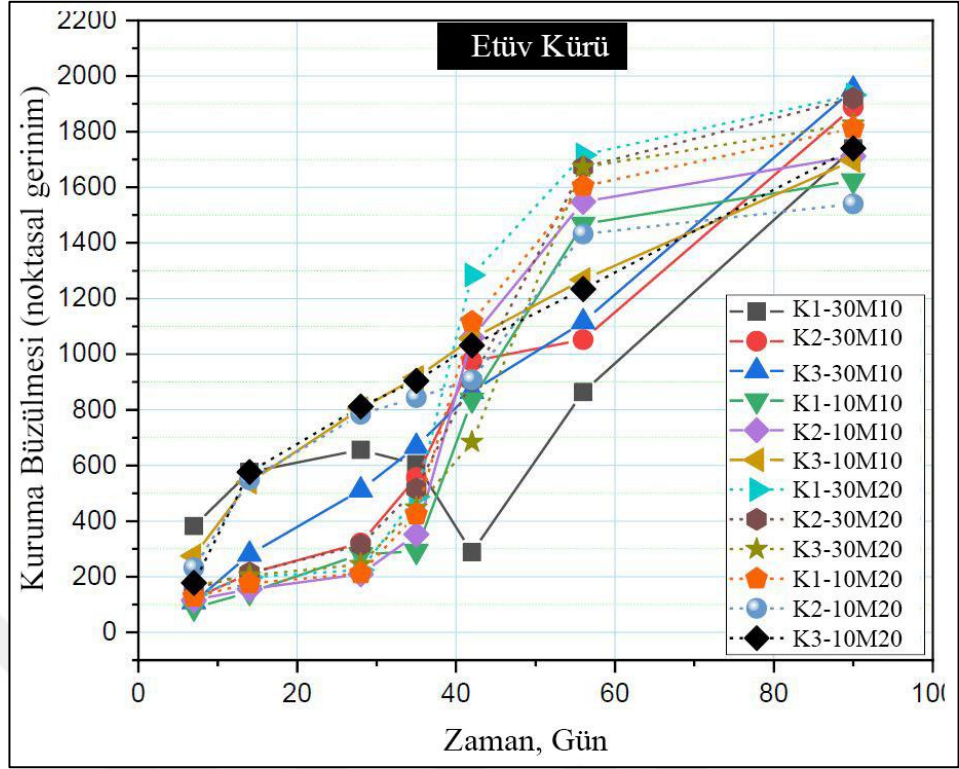
d)

Şekil 4.5 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin gözeneklilik ve su emme (a, b, c), basınç dayanımına karşı gözeneklilik ve birim ağırlık (d) üzerindeki etkisi

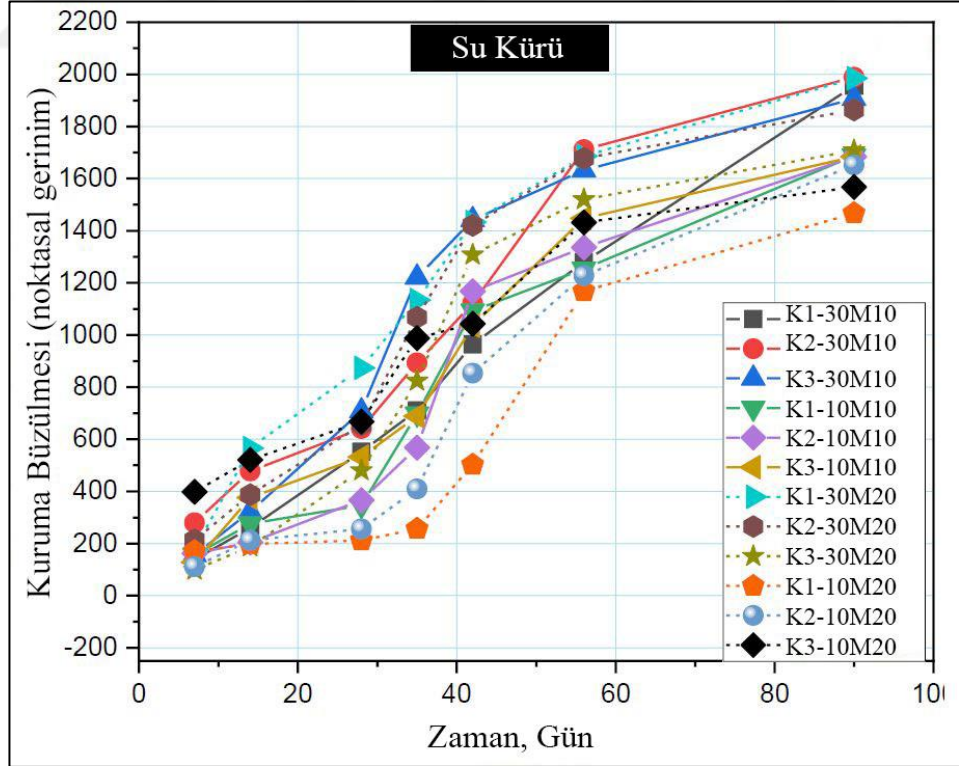
4.6 Kuruma Büzülmesi

Beton projelerin uzun vadeli özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilecek en önemli hususlardan biri, kuruduktan sonra betonun büzülmesidir. Beton yapıların tasarımı sırasında kuruma büzülmesi dikkate alınmadığında, servis edilebilirlik üzerinde olumsuz etkisi olan yapısal olmayan çatlaklara neden olabilir ve çatlaklar gelişerek beton yapıların uzun vadeli performansını önemli ölçüde düşürebilir (Hajimohammadi vd., 2018; Sadeghian vd., 2022). Şekil 4.6, çimento klinker tipinin, etüv, su ve buhar kürü dahil olmak üzere kür yöntemlerinin ve aktivatör dozajının 90 gün sonra AAHÇ kombinasyonlarının kuruma büzülmesi üzerindeki etkisini göstermektedir. AAHÇ karışımlarının kuruma büzülmesi 90 günlük kuruma süresi boyunca neredeyse doğrusal olarak gelişmektedir. Betondan kaybedilen su miktarının kuruma rötresi oranı üzerinde etkisi vardır. Daha yüksek su kaybı, betonda boşlukların ve daha fazla gözenekliliğin gelişmesinin bir sonucu olarak daha fazla kuruma büzülmesine neden olacaktır (Collins ve Sanjayan, 2000; Neto vd., 2008; Sadeghian vd., 2022; Xue vd., 2022). Kür şartlarından bağımsız olarak, YFC/K oranı 70/30 olan

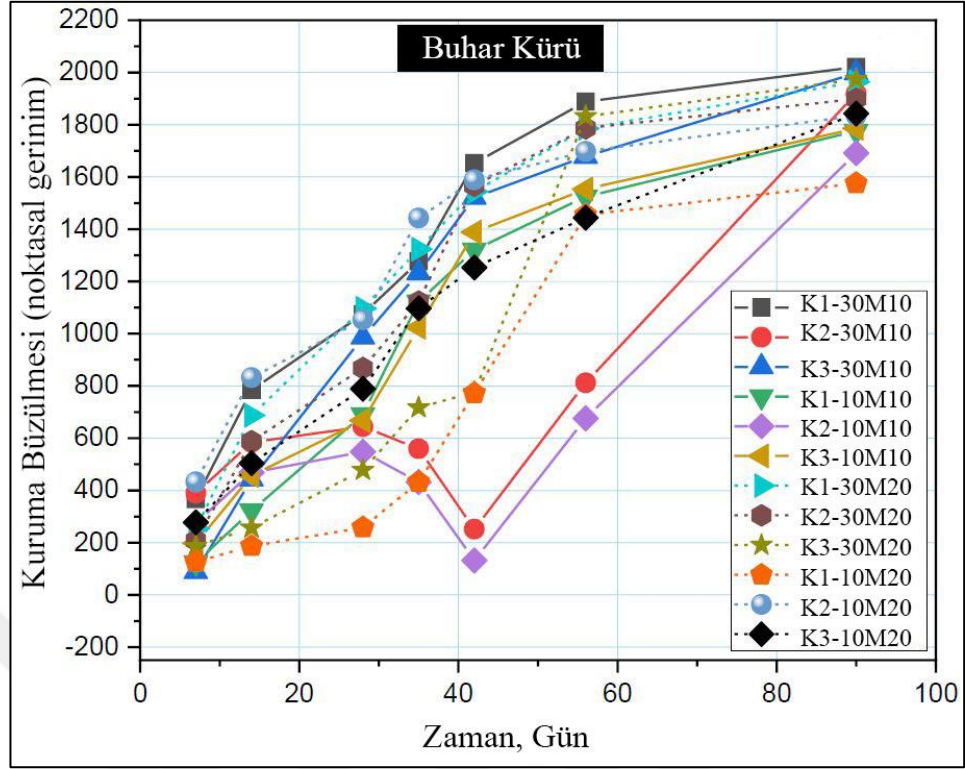
karışımların, YFC/K oranı 90/10 olan karışımlardan daha yüksek kuru rötre sergilediği açıktır. AAHÇ kombinasyonlarında %30'luk daha yüksek klinker konsantrasyonu kalsiyumda artışa, alümina ve silikada düşüşe ve geçirgenlikte artışa neden olmuş, bu da dayanıklılığı ve daha yüksek kuru büzülme etkilemiştir. Kurutmadan 90 gün sonra kuru büzülme sonuçları 1467 ve 2021 mikro gerilme aralığında değişmiştir. Şekil 4.6a ve b'de gösterildiği gibi, 90 günlük yaşta, su ile kürlen AAHÇ numunelerinde minimum 1467 µε kuruma büzülmesi ölçülmüş ve buharla kürlen AAHÇ numuneleri için maksimum 2021 µε kuruma büzülmesi kaydedilmiştir. AAHÇ karışımlarının kuruma büzülmesi üzerindeki MS içeriği değerlendirilirken, aslında etkisinin kür tipine ve ayrıca AAHÇ karışımlarındaki cüruf içeriğine bağlı olduğu görülmektedir. MS içeriğindeki artış, etüvde kürlen numuneler ve YFC/K oranı 90/10 olan buharla kürlen numuneler için daha yüksek büzülme ile sonuçlanırken, cüruf içeriğinden bağımsız olarak suyla kürlen numuneler için daha düşük büzülme ile sonuçlanmıştır. Büzülme azaltmak için en iyi kürlenme rejimlerinin ısı kürlenme ve uzun süreli kürlenme olduğu bildirilmiştir. Bu durum, kürlenmeden sonra meydana gelen hacimsel stabilitedeki iyileşme ve toplam gözeneklilikteki azalma ile açıklanmaktadır (El-Yamany vd., 2018; Xue vd., 2021b). Etüvde ve suda kürlen numuneler için elde edilen daha düşük büzülme bu açıklamalara atfedilebilir. UK içeren karışımların büzülmesinin 60 °C'de buhar kürü ile önemli ölçüde azaldığı, cüruf içeren karışımlar için ise daha az etkili olduğu belirtilmiştir (Hojati vd., 2019). Cüruf karışımlarının büzülmesi önemli ölçüde zamana bağlıydı ve macunlar kütle kaybı stabilize olduktan sonra bile büzülme devam ediyordu.



a)



b)



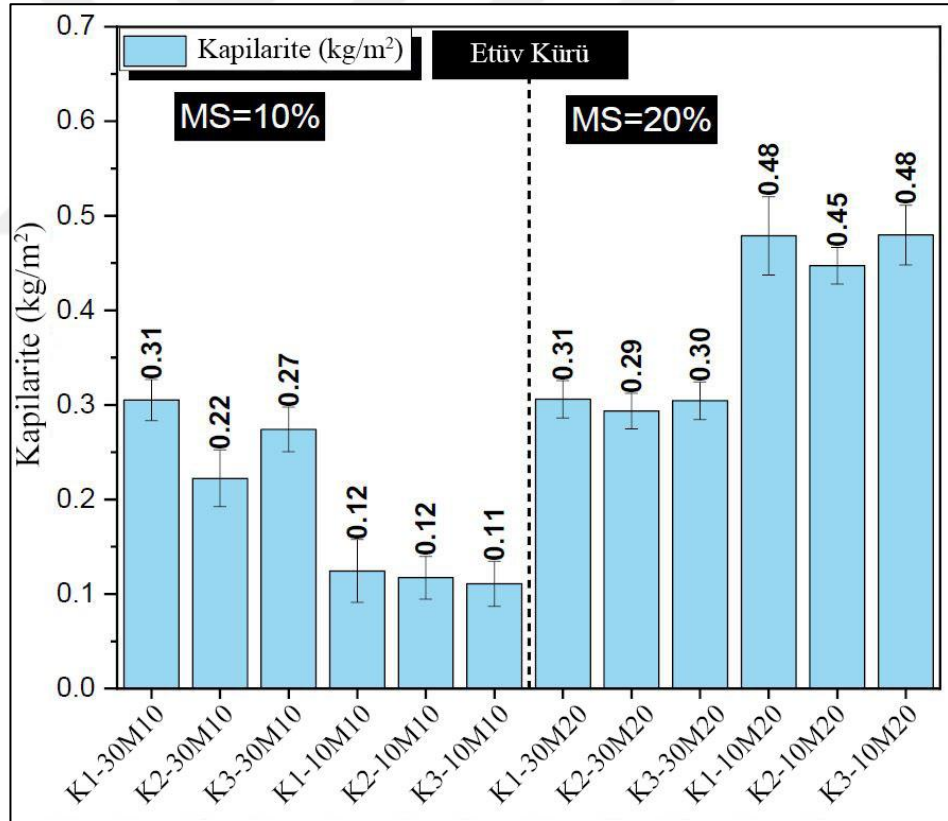
c)

Şekil 4.6 Klinker tipinin, kür rejimlerinin ve MS içeriğinin AAHÇ numunelerinin kuruma büzülmesi üzerindeki etkisi (a, b, c)

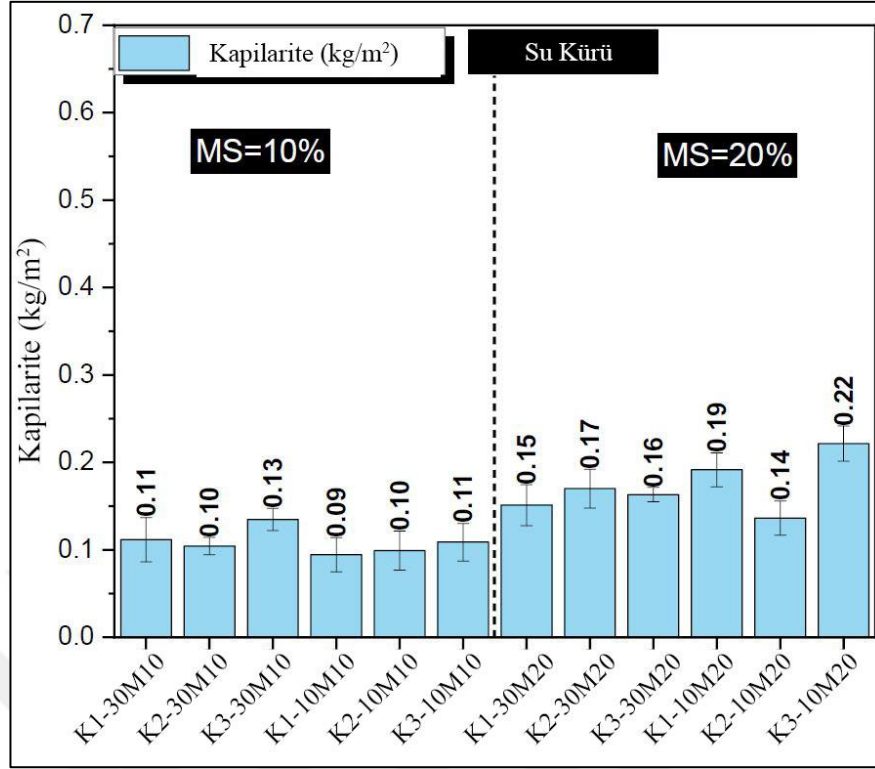
4.7 Kapilarite

Kapilarite, AAM ve jeopolimer bağlayıcıların dayanıklılığını değerlendirirken dikkate alınması gereken çok önemli bir faktördür. Kılcal gözenekler yoluyla sülfat ve karbonat akışı, kullanım ömrü boyunca betonun bozulmasında birincil faktördür. Betonun geçirgenlik özelliklerini belirlemek için mevcut olan çeşitli teknikler arasında kapilarite testi de bulunmaktadır. Çimento klinker tipinin, etüv, su ve buhar kürü dahil olmak üzere kür yöntemlerinin ve aktivatör dozajının 91 güne kadar AAHÇ karışımlarının kapilaritesi üzerindeki etkisi Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Şekil 4.7'de görülebileceği gibi, sonuçlar kapilaritenin YFC/K oranı, kürleme yöntemi ve aktivatör dozajından önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. YFC/K oranı ve kür tipinden bağımsız olarak %10MS ile aktive edilen tüm AAHÇ karışımları, YFC/K oranı ve kür tipinden bağımsız olarak %20MS ile aktive edilen AAHÇ karışımlarından daha düşük kapilarite bulguları göstermiştir. Ayrıca, YFC/K oranı 90/10 olan ve %10MS ile aktive edilen AAHÇ karışımları, kür tipinden bağımsız olarak, YFC/K oranı 70/30 olan ve %10MS ile aktive edilen AAHÇ karışımlarından daha düşük kapilarite sergilemiştir.

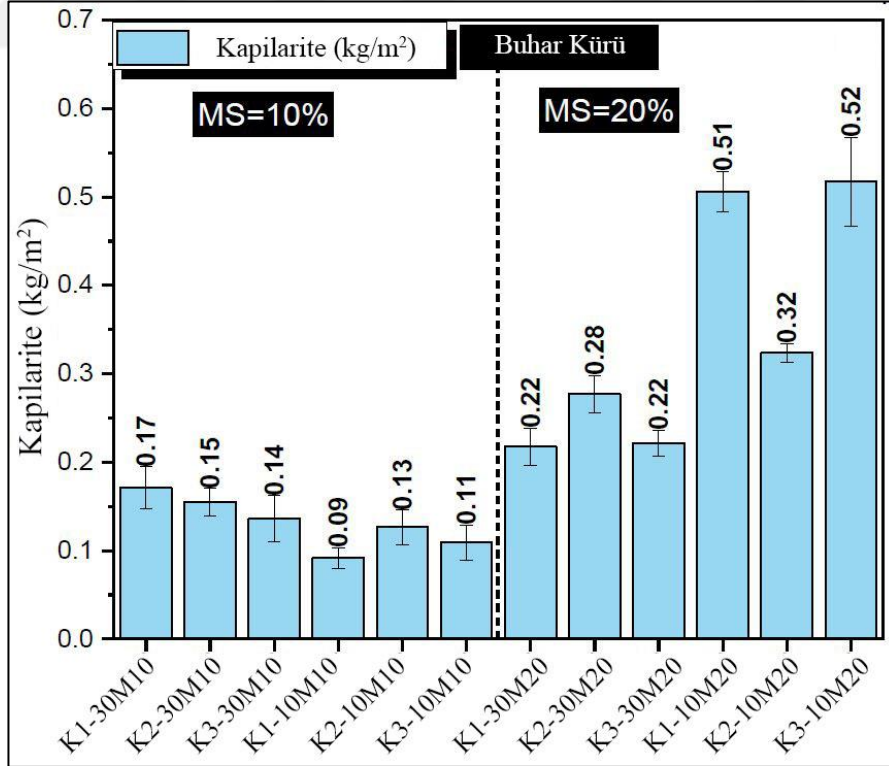
Öte yandan, YFC/K oranı 70/30 olan ve %20MS ile aktive edilen AAHC kombinasyonlarının aksine, YFC/K oranı 90/10 olan ve %20MS ile aktive edilenler daha yüksek kapilarite bulguları göstermiştir. Şekil 4.7a ve b'de gösterildiği gibi, en düşük kapilaritenin su ve buhar kürüne maruz bırakılan %10MS ile aktive edilen YFC/K1 oranı 90/10 olan karışım için ölçüldüğü gözlemlenebilir. Ancak en yüksek kapilarite de %20MS ile aktive edilen YFC/K3 oranı 90/10 olan buhar kürlü karışım için ölçülmüştür. Normal betonda kapilarite değerleri azalan basınç dayanımı ile artarken burada durumun tam tersi olduğu görülmektedir. Öte yandan basınç dayanımı ile porozite ilişkisi arasında yüksek bir korelasyon gözlenmiştir. Bu çalışmada, en yüksek dayanıma sahip karışımlar alkali dozajındaki artışla birlikte daha yüksek kapilarite sergilemiştir ve kapilarite değerlerindeki artış jel porozitesindeki artışa bağlanabilir (Pacheco-Torgal vd., 2012; Yang vd., 2016).



a)



b)



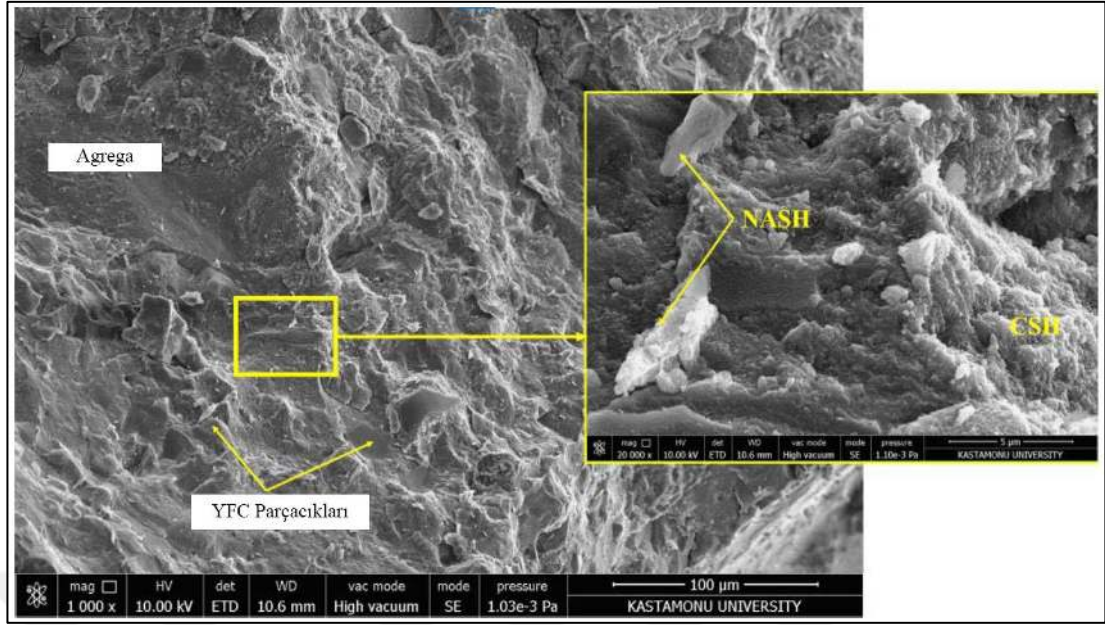
c)

Şekil 4.7 Klinker tipinin, kürlenme rejimlerinin ve MS içeriğinin AAHÇ numunelerinin kapilaritesi üzerindeki etkisi (a, b, c)

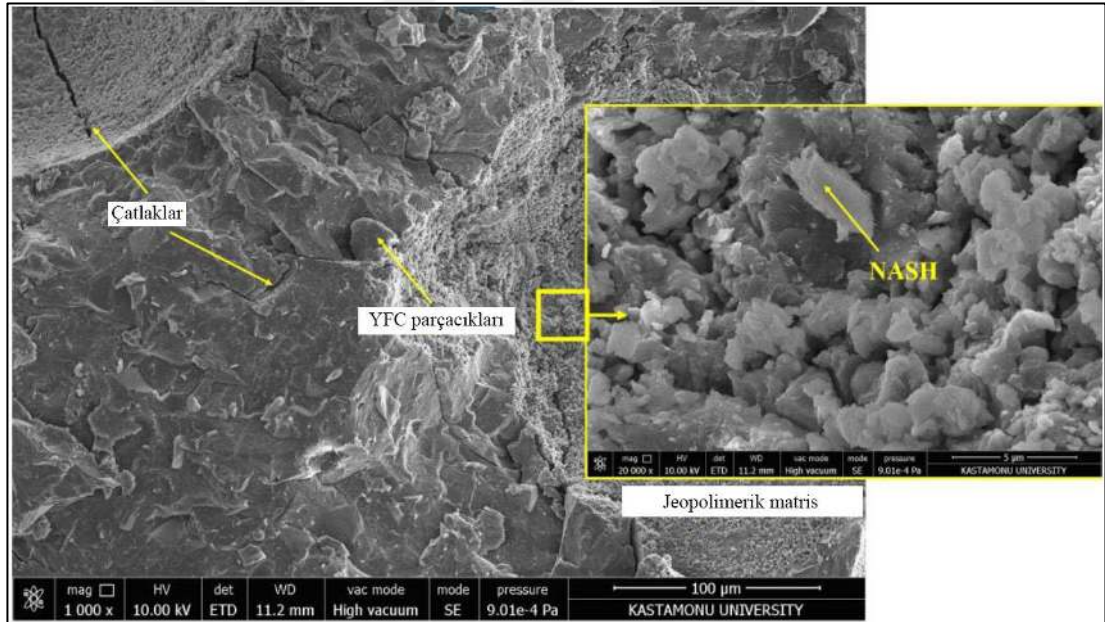
4.8 AAHÇ Karışımlarının Mikro Yapıları

4.8.1 Farklı Kür Koşullarındaki AAHÇ Karışımları

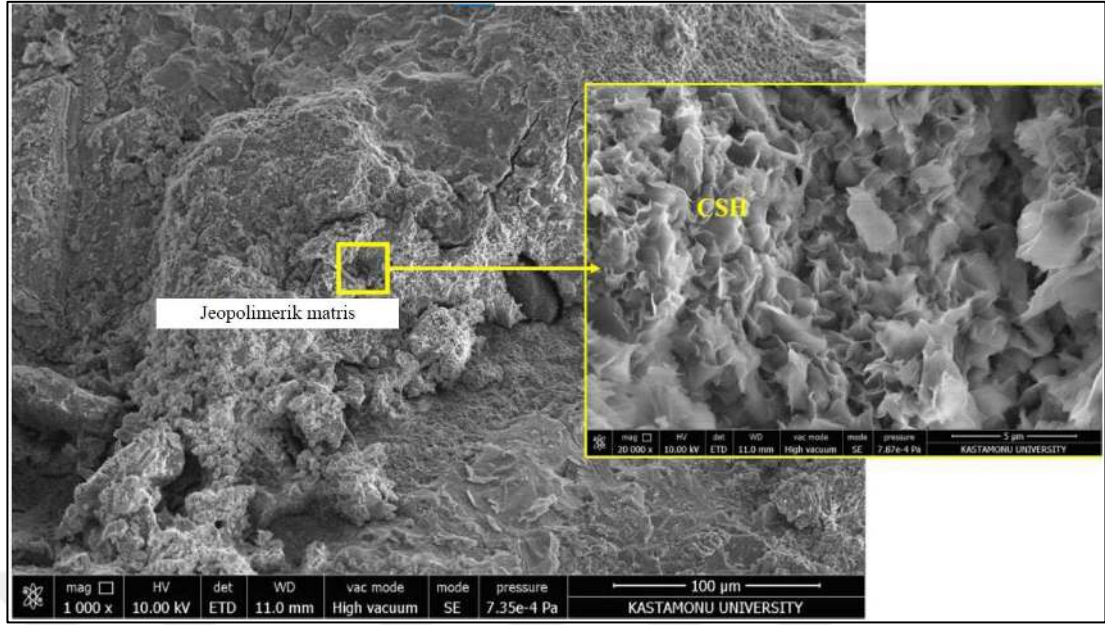
Şekil 4.8, bazı AAHÇ karışımlarının 91. gündeki SEM görüntülerini göstermektedir. Şekil 4.8 (a)-(f) mikroyapıların oldukça yoğun olduğunu göstermektedir. Yoğun mikroyapıların en önemli nedenlerinden biri YFC'nin çok yüksek bir spesifik yüzey alanına sahip olmasıdır. Şekil 4.8a'da K1-30M10 karışımının 91. gündeki basınç dayanımı 35,3 MPa'dır, ancak yoğun bir matris gözlenmiştir. Özellikle, hamurdaki cürufun SiO_2 ve Al_2O_3 bileşenlerinin aktivasyonu nedeniyle oluşan NASH jelleri gözlenmiştir. Şekil 4.8b'de hamur yapılarında susuz cüruf partikülleri de tespit edilmiştir. Su ile kürlenmiş bu karışımın basınç dayanımı 91. günde 38,7 MPa olmasına rağmen, matriste sıklıkla CSH jelleri gözlenmiştir. Şekil 4.8d'de benzer reaksiyon ürünleri %20 aktivatör kullanılan K1-30M20 karışımında da gözlenmiştir. Şekil 4.8e ve f'de matriste çatlaklar gözlenmiştir. Bu çatlaklar mikro boyutta olmasına rağmen, genellikle kuruma davranışı nedeniyle oluşurlar. Genel olarak aktivatör oranının artırılması kuruma büzülmesini artırmıştır. Mikroyapısal çalışmalarda bu etki mikro çatlaklar şeklinde gözlenmiştir. Ayrıca aktivatör oranındaki artış sonunda CSH jellerin daha gözenekli olduğu tespit edilmiştir. YFC'nin yüksek spesifik yüzey alanı nedeniyle bazı cüruf partiküllerinin aglomere olduğu görülmüştür. Chen ve arkadaşları, düşük Ca/Si oranına sahip 90 günlük kürlenmiş hamurlarda Al'un CSH fazına dahil edilmesini destekleyen yüksek derecede SiO_4 tetrahedral bağlanma bulmuşlardır. Düşük Ca/Si oranı, yüksek derecede SiO_4 tetrahedral bağlanması yaratır ve bu da Al'un CSH fazına katılmasını destekler (Chen vd., 2020). Düşük Ca/Si oranında silikat polimerizasyonunun azaldığı ve Al'un oktahedral bağlı kaldığı belirlenmiştir (L'Hôpital vd., 2016). Bu çalışmada da benzer bir faktör gözlenmiştir. Alkali bir çözelti YFC'yi aktive ettiğinde CSH jeli oluşur. Bu jel tipik olarak CASH tipi jel oluşturmak için Al ile karıştırılır (Garcia-Lodeiro vd., 2015). Bu çalışmada, gözenekler genellikle CSH ve NASH jeli gibi reaksiyon ürünleri tarafından doldurulmuştur.



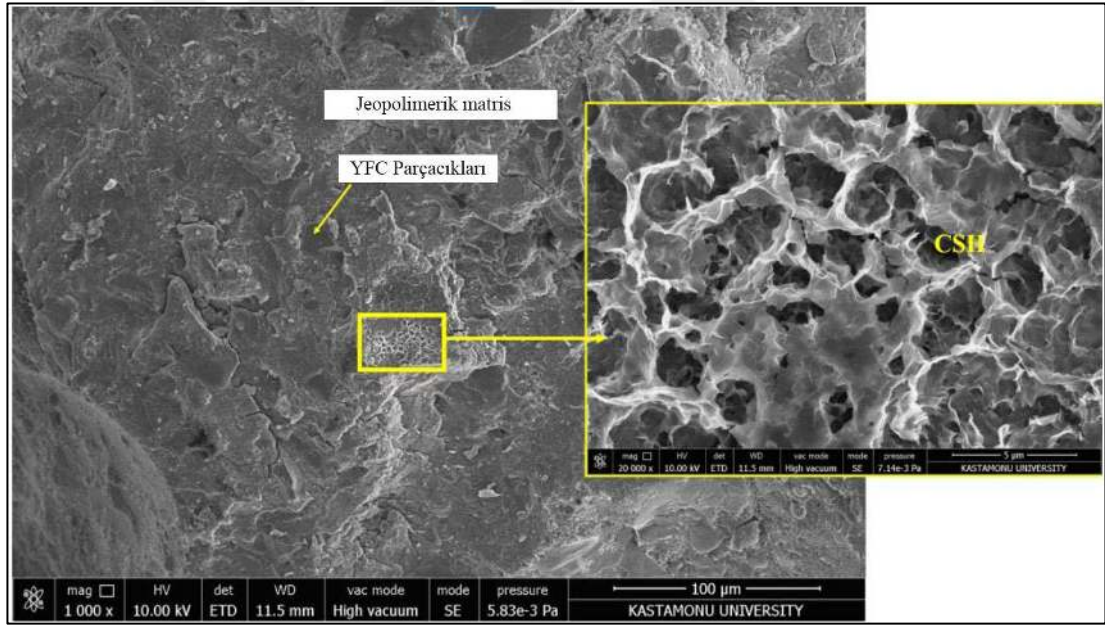
a)



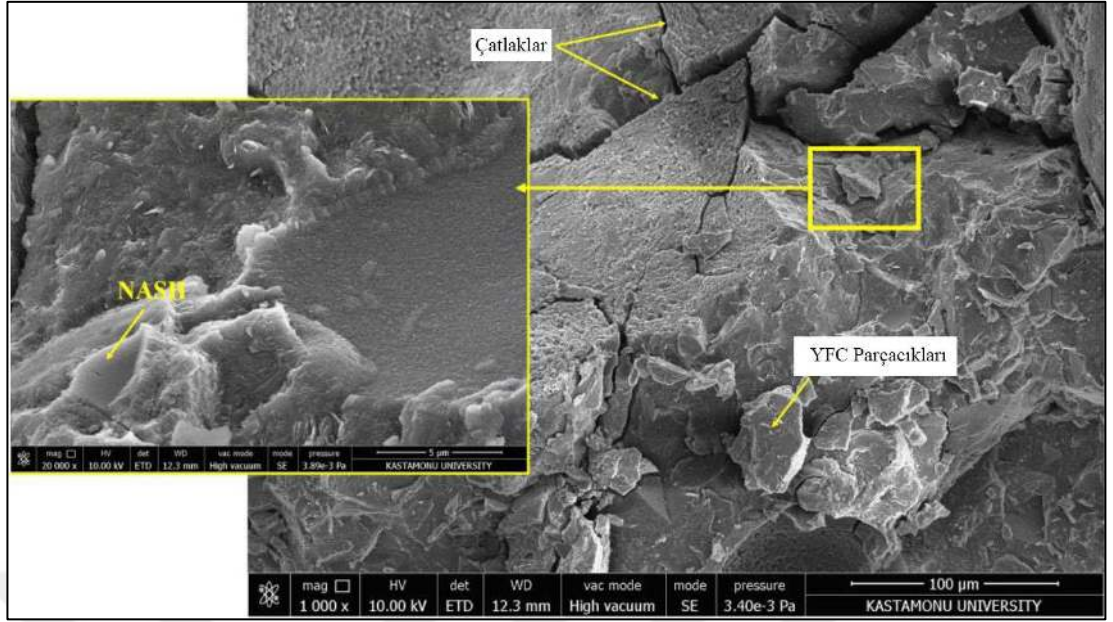
b)



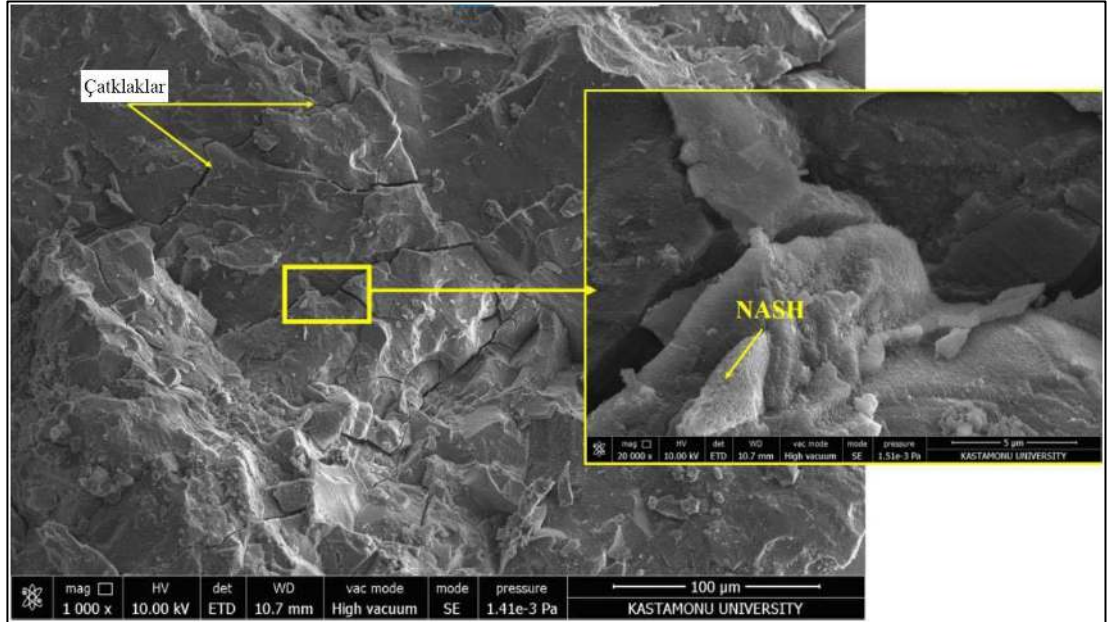
c)



d)



e)



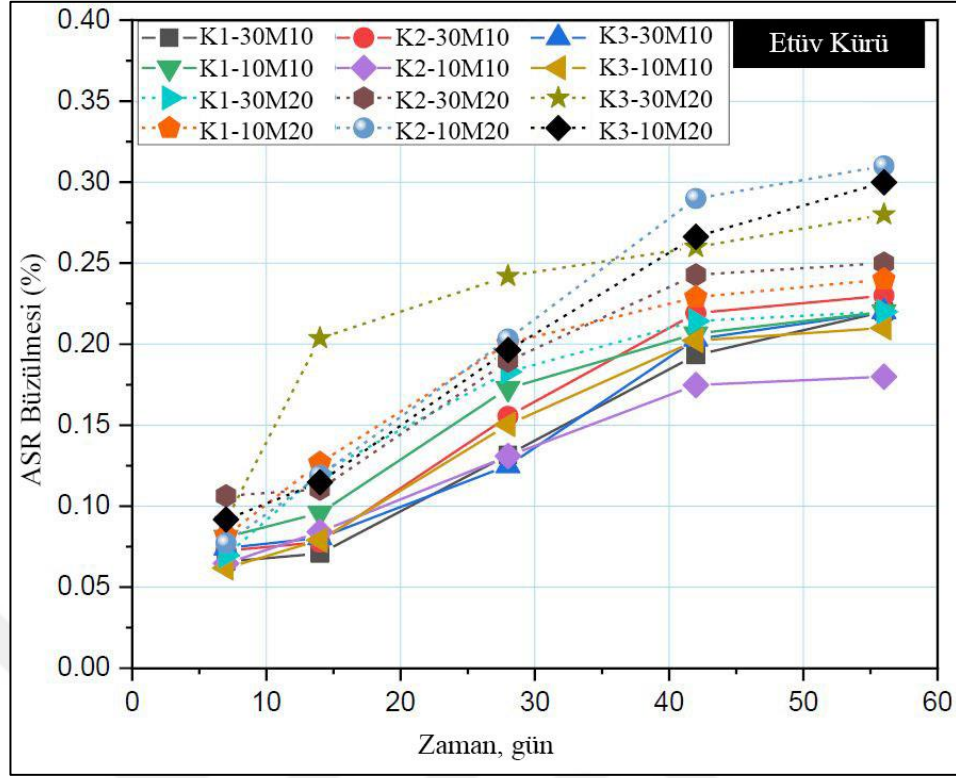
f)

Şekil 4.8 Etüv, buhar ve su kuru ile AAHC karışımlarının mikro yapıları

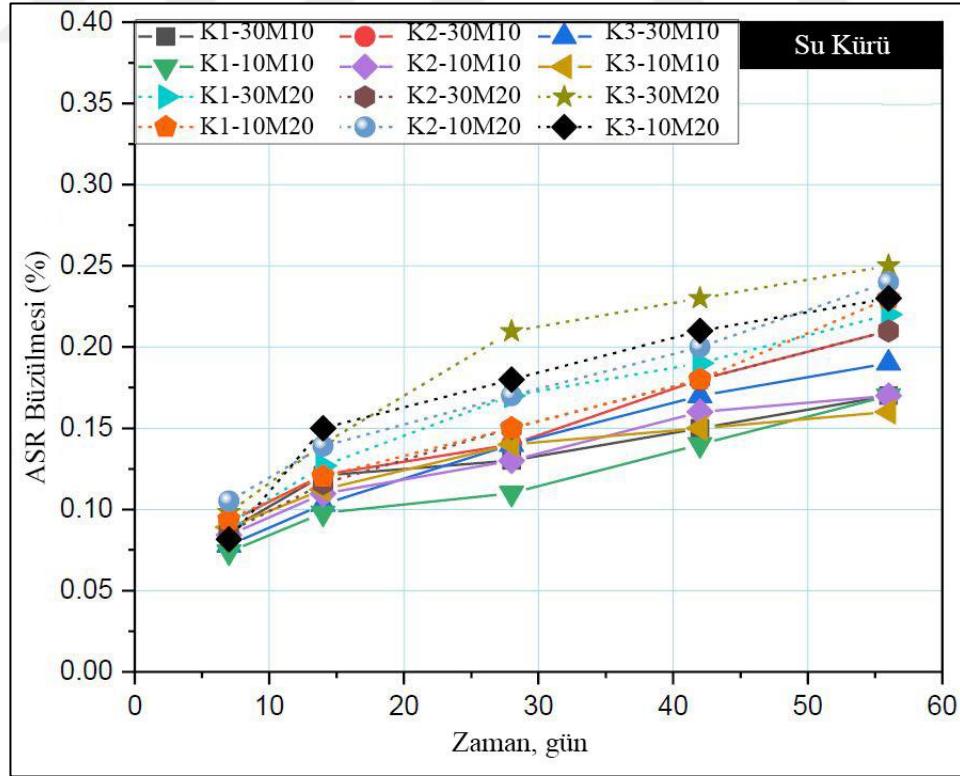
4.9 Alkali Silika Reaksiyonu (ASR)

Tipik betonda, agregadaki amorf silika ve çimentodaki alkali birleşerek ASR jeli oluşturur. Jel nem varlığında genişlediğinde, sertleşmiş beton çatlamaya başlar. Üretim için normal Portland çimentosu gerektirmedikinden (ASR açısından normal

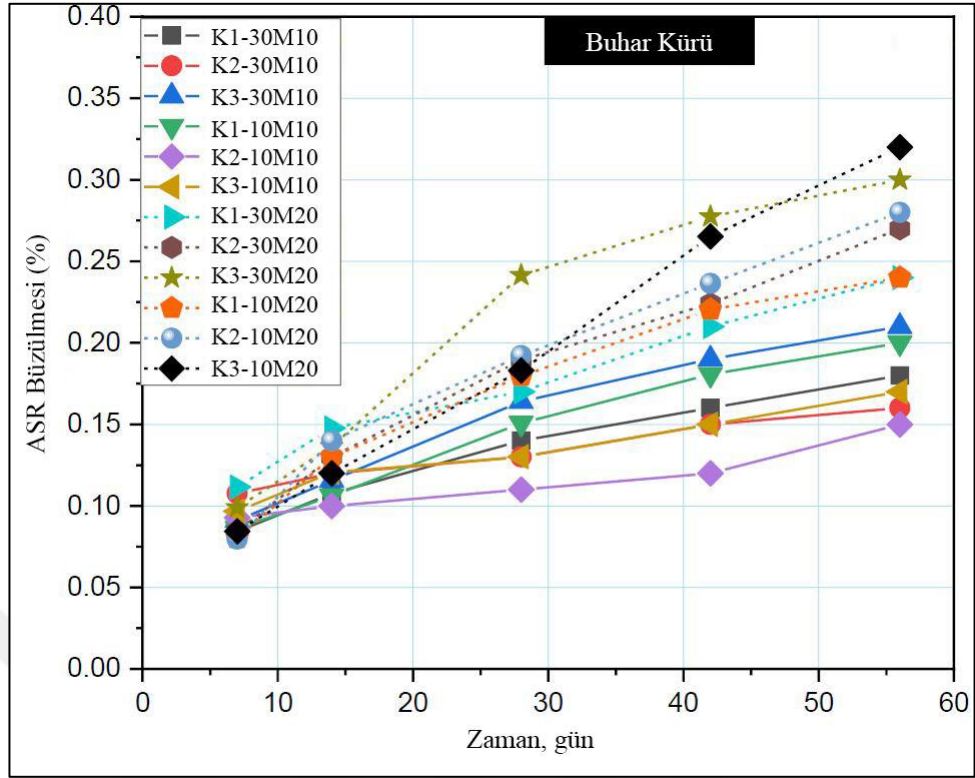
geleneksel betona göre bir avantaj) alkali ile aktive edilmiş beton (AAB) son yıllarda daha fazla dikkat çekmiştir. Günümüz yapıları için teknik açıdan en uygun malzeme olduğu düşünülen alkali ile aktive edilmiş hibrit çimentolar, ara kalsiyum ve alkali içerikleri nedeniyle alkali silika reaksiyonu (ASR) direnci açısından daha fazla dikkat gerektirmektedir (Angulo-Ramírez vd., 2018). Çimento klinker tipi, etüv, su ve buhar kürü dahil olmak üzere kür yöntemleri ve aktivatör dozajının 91 günlük kürden sonra 56 güne kadar AAHÇ karışımlarının alkali silika reaksiyonu (ASR) genleşmesi üzerindeki etkisi Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Şekil 4.9'dan açıkça görülmektedir ki, %20MS ile aktive edilen tüm AAHÇ karışımları, artan alkali dozaj içeriği nedeniyle kütleme rejimlerinden bağımsız olarak %10MS ile aktive edilen karışımlardan daha yüksek genleşme oranlarına sahiptir. ASR genleşmesi üzerindeki YFC/K oranı değerlendirildiğinde, YFC/K oranı 90/10 olan ve %20MS ile aktive edilen karışımlar genellikle daha yüksek genleşme göstermiş ve en yüksek genleşme Şekil 4.9a ve c'de gösterildiği gibi YFC/K oranı 90/10 olan ve %20MS ile aktive edilen etüv ve buharla kürlenmiş karışımlar için ölçülmüştür. ASR genleşmesi, rozet şeklindeki kalsiyum ve sodyum silikat hidrat kristallerinin (alkali-silika reaksiyon jeli) gelişmesinden kaynaklanmaktadır (Angulo-Ramírez vd., 2018). Bazı yazarlar, kullanılan bağlayıcı türü, aktivatörün türü ve dozajı, reaktif agrega türü ve test yöntemi gibi parametrelerin AAM'lerin alkali-agrega reaksiyonunun nasıl davrandığı üzerinde etkisi olduğunu iddia etmektedir. You-zhi vd. (2002) alkali ile aktive edilmiş cüruf harçları üzerine yaptıkları bir çalışmada, su camı ile aktive edilen numunelerin daha fazla genleştiğini, NaOH ile aktive edilenlerin ise daha az genleştiğini göstermiştir. Na_2CO_3 ve Na_2SiO_3 'ün her ikisi de aktivatör olarak kullanılmasına rağmen, Gifford ve Gillott (1996) ikisi arasında bir fark bulamadıklarını bildirmiştir. Kütleme rejimleri dikkate alındığında, sonuçlar Şekil 4.9b'de gösterildiği gibi tüm karışımlar dikkate alındığında su ile kürlenmenin ASR genleşmesi üzerinde en iyi etkiye sahip olduğunu doğrulamıştır.



a)



b)



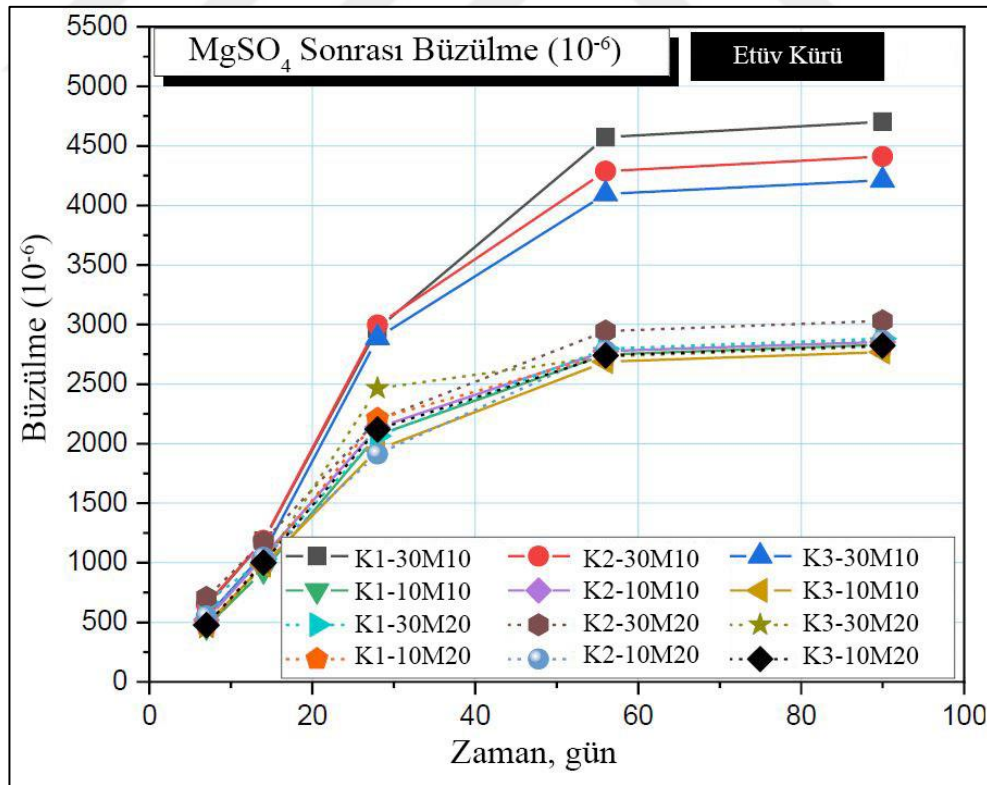
c)

Şekil 4.9 Klinker tipinin, kürleme rejimlerinin ve MS içeriğinin AAHÇ numunelerinin (a, b, c) ASR genleşmesi üzerindeki etkisi

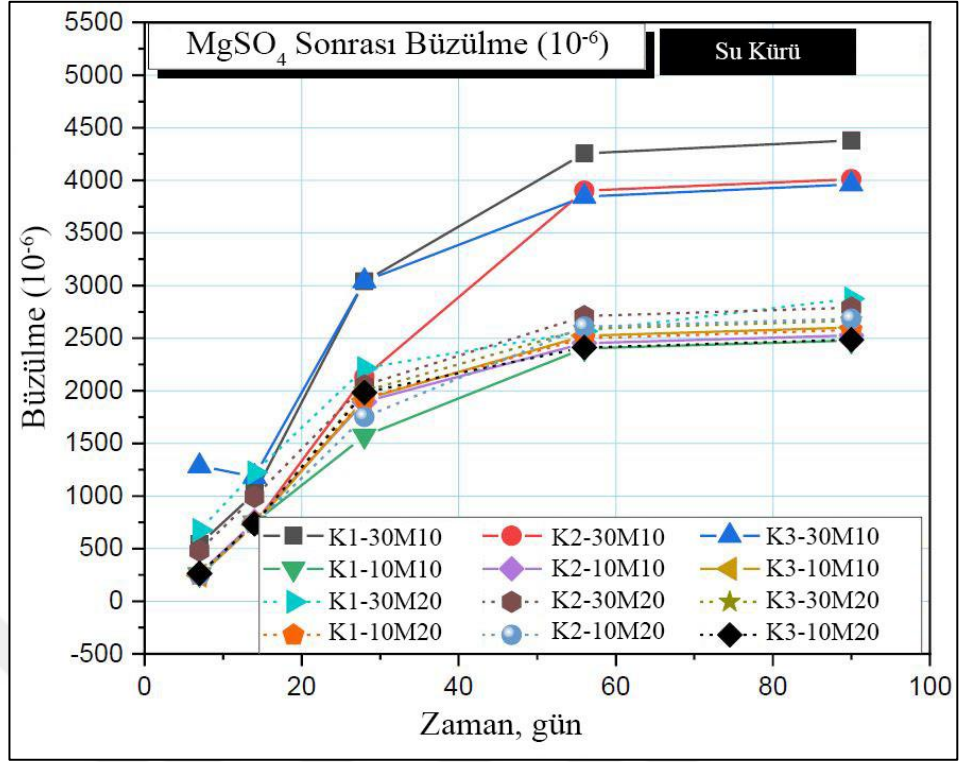
4.10 Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$) Dayanıklılığı

Çimentonun hidratasyonu, sülfat saldırısını teşvik eden $Ca(OH)_2$ üretir. Alkali ile aktive edilmiş malzemeler, daha yoğun mikro yapıları, daha az geçirgenlikleri ve $Ca(OH)_2$ içermemeleri nedeniyle sülfat saldırısına karşı PÇ'den daha iyi performans göstermiştir. Tüm AAHÇ numuneleri, 91 günlük kürlemenin ardından %10 $MgSO_4$ çözeltisine 90 gün boyunca daldırılmıştır. Çimento klinker tipinin, etüv, su ve buhar kürü gibi kür yöntemlerinin ve aktivatör dozajının $MgSO_4$ daldırma kürü altında AAHÇ karışımlarının genleşmesi üzerindeki etkisi Şekil 4.10'de gösterilmiştir. Şekil 4.10'de açıkça görüldüğü üzere, YFC/K oranı 70/30 olan ve %10MS ile aktive edilen tüm AAHÇ karışımları, kür tipinden bağımsız olarak YFC/K oranı 90/10 olan ve %20 MS ile aktive edilen karışımlara göre sülfat daldırma nedeniyle daha yüksek sülfat genleşmesi sergilemiştir. Bu, daha düşük alkali aktivatör içeriği ile daha yüksek klinker içeriğinin daha yüksek sülfat genleşmesi ile sonuçlandığı anlamına gelmektedir. Bu sonuç, ilgili karışımların daha yüksek porozite oranlarına bağlanabilir. PÇ veya klinker içeriği %15'in üzerine çıktığında, dayanım artışı ve

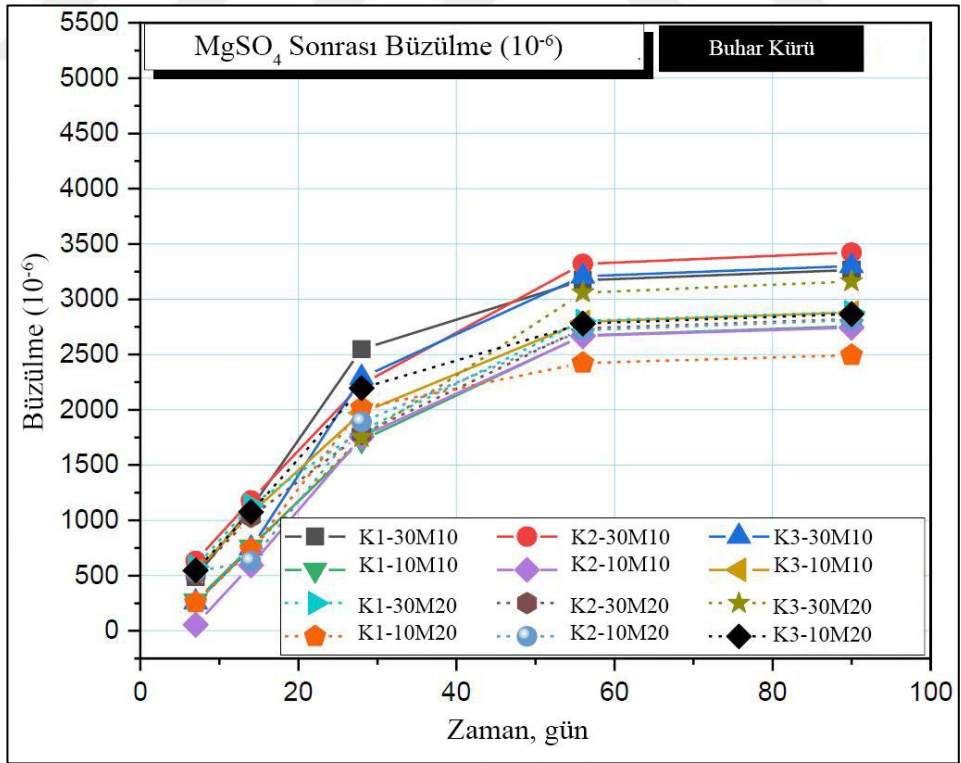
dolayısıyla dayanıklılık üzerinde olumsuz bir etkisi olmuştur. PÇ'nin ikame miktarı %15'ten yüksek olduğunda, PÇ hidrasyonunun bir sonucu olarak daha fazla ısı üretilmiştir. Daha yüksek ısı salınımı matrisin mikro çatlaklar geliştirmesine neden olmuş, bu da onu daha az yoğun ve daha kırılgan hale getirmiştir. Dayanım kaybının diğer iki nedeni, artan PÇ ikame seviyeleri ve matriste daha düşük silika ve alümina oranıdır. Bu koşullar polimerizasyon sürecinin yavaşlamasına ve daha az jeopolimer üretilmesine neden olur. Sülfata maruz kalma için en iyi kür tipi buharla kürleme olmuştur çünkü tüm karışımların genleşmesi 3422 $\mu\epsilon$ 'nin altındadır. Öte yandan, sülfat saldırısı nedeniyle en yüksek genleşme, %10 MS ile aktive edilen %30 daha yüksek klinker içeriğine sahip (YFC/K oranı 70/30) etüv kürü karışımlarda görülmüştür. Aynı karışımlar, Şekil 4.10b'de gösterildiği gibi su ile kürleme koşullarında benzer ancak daha düşük genleşme oranları göstermiştir. En düşük sülfat genleşmesi, Şekil 4.10b ve c'de gösterildiği gibi, su ve buhar kürüne maruz kalan ancak sırasıyla %10 ve %20MS ile aktive edilen en düşük kapilarite değerlerine sahip olan 90/10 YFC/K1 oranına sahip YFC/K1 karışımı için elde edilmiştir.



a)



b)

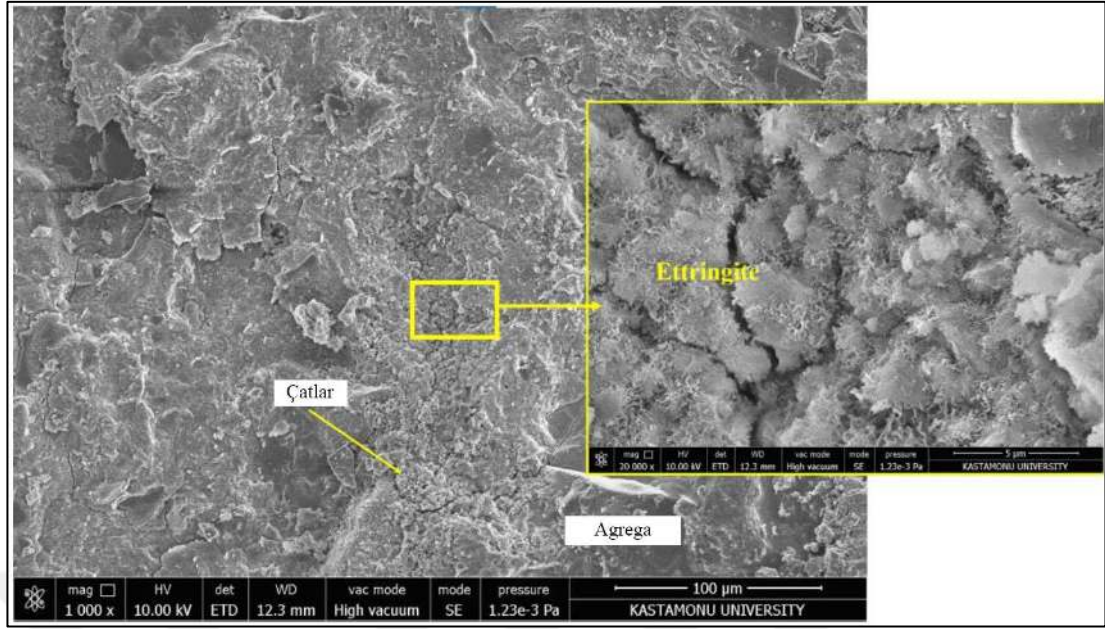


c)

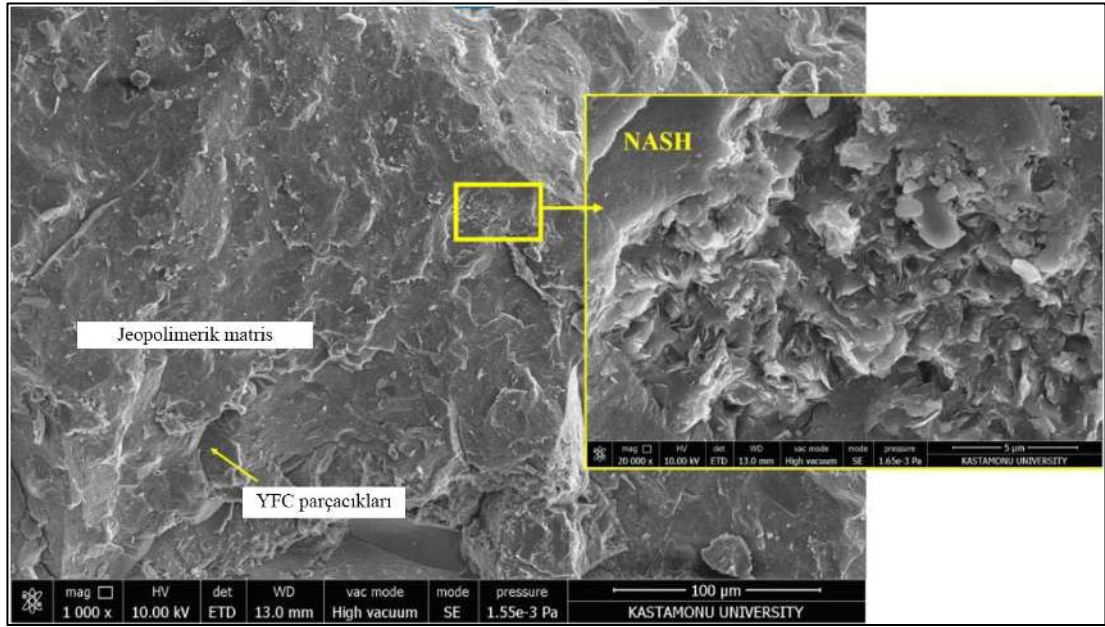
Şekil 4.10 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin numunelerin MgSO₄ genleşmesi üzerindeki etkisi (a, b, c)

4.10.1 MgSO₄'e Maruz Kalan AAHÇ Karışımlarının Mikro Yapıları

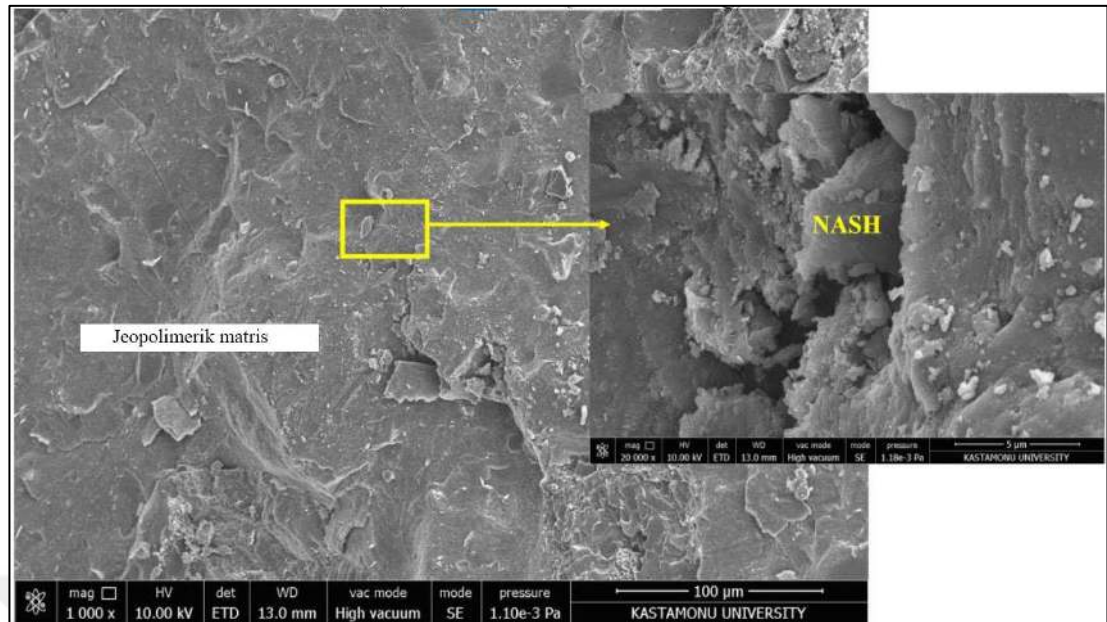
Şekil 4.11, MgSO₄'e maruz bırakılan AAHÇ karışımlarının mikroyapısındaki değişimi göstermektedir. Şekil 4.11a'da görüldüğü gibi, nispeten yüksek klinker oranı etrenjit oluşumunu artırmıştır. Benzer bir etrenjit yoğunluğu K1-30M20 karışımında da gözlenmiştir. Ayrıca, K1-30M20 karışımının ITZ bölgesinde matris ve agrega arasında mikro çatlaklar gözlenmiştir. Bu bölgenin aderans açısından zayıf olduğu Şekil 4.11d'de tespit edilmiştir. Şekil 4.11b ve 4.11c'de görüldüğü üzere MgSO₄ etkisine rağmen matriste NASH varlığı tespit edilmiştir. Bu karışımlar düşük dayanıma sahip olmalarına rağmen 20 MPa'dan fazla basınç dayanımına sahiptirler. Kompozitlerin kendi aralarında basınç dayanımları düşük olmasına rağmen MgSO₄ orta bölgelere sızarak çok fazla hasara yol açmamıştır. Cürufun küçük parçacık boyutu kompozitlerin geçirgenliğini azaltmıştır. Ayrıca Şekil 4.11e'de matris MgSO₄ etkisine maruz kalmasına rağmen NASH jelleri gözlemlendiği için CSH jellerinin de varlığını koruduğu tespit edilmiştir. MgSO₄ etkisine maruz kalan bir matriste Mg katyonu genellikle Ca ile yer değiştirerek MSH jelini oluşturur. Ancak bu karışımların düşük geçirgenliği nedeniyle bu etki çok fazla gözlemlenmemiştir. Şekil 4.11f'de MgSO₄ etkisine rağmen jeopolimerik jel yapısına sıklıkla rastlanmıştır. Macun yapısındaki mikro çatlakların çoğu etrenjitin neden olduğu genleşmelerle oluşmaktadır. Özcan ve Karakoç, YFC içeren jeopolimerlerde yüksek basınç dayanımı ve jeopolimerizasyon sürecinin MgSO₄ atağı üzerindeki etkilerini SEM görüntüleri ile ortaya koymuşlardır (Özcan ve Karakoç, 2019). Bakharev, MgSO₄ çözeltisine maruz bırakılan UK bazlı jeopolimerin SEM fotoğraflarında ciddi dikey çatlaklar kaydetmiştir. Bu çatlaklar nedeniyle jeopolimerin dayanımı da azalmıştır (Bakharev, 2005). Singh ve Siddique, 180 gün boyunca %10 MgSO₄ çözeltisine maruz kalan betonun SEM fotoğraflarında alçı veya monosülfat yapılarına dair hiçbir kanıt bulamamıştır. Tüm SEM görüntülerine göre kalsiyum silikat hidrat jelleri tamamen ve düzgün bir şekilde yayılmıştır (Singh ve Siddique, 2014). Jeopolimer numuneye girdiklerinde, sülfat ve klorür iyonları tarafından oluşturulan ürünlerin ve kristallerin genişlemesi, numunenin mikro yapısında gözenekliliğin ve çatlamanın artmasına neden olur (Ren vd., 2017).



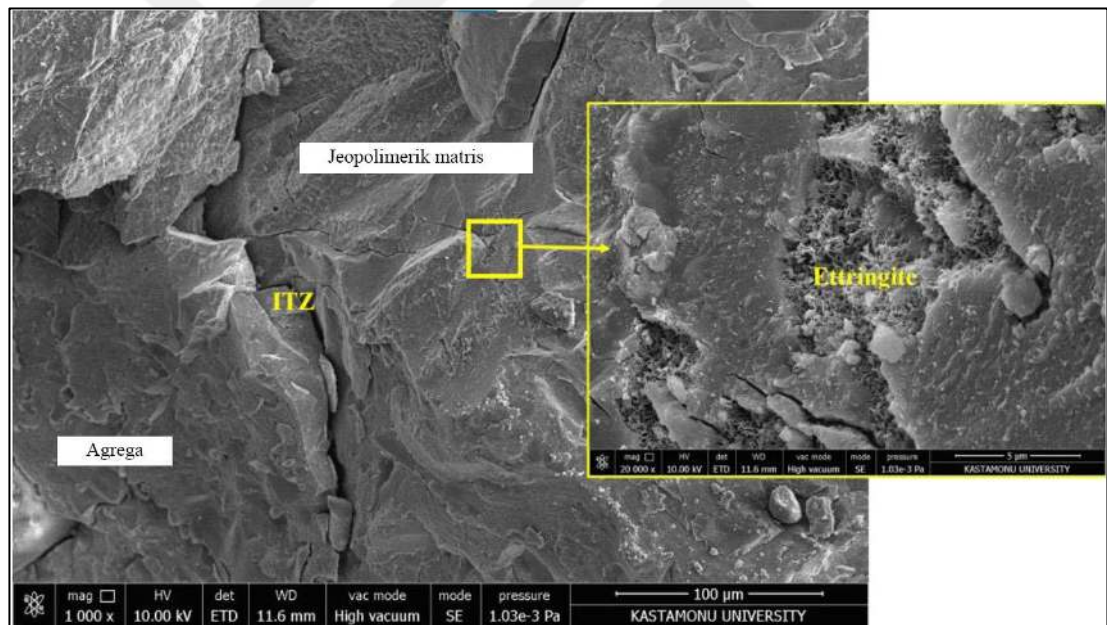
a)



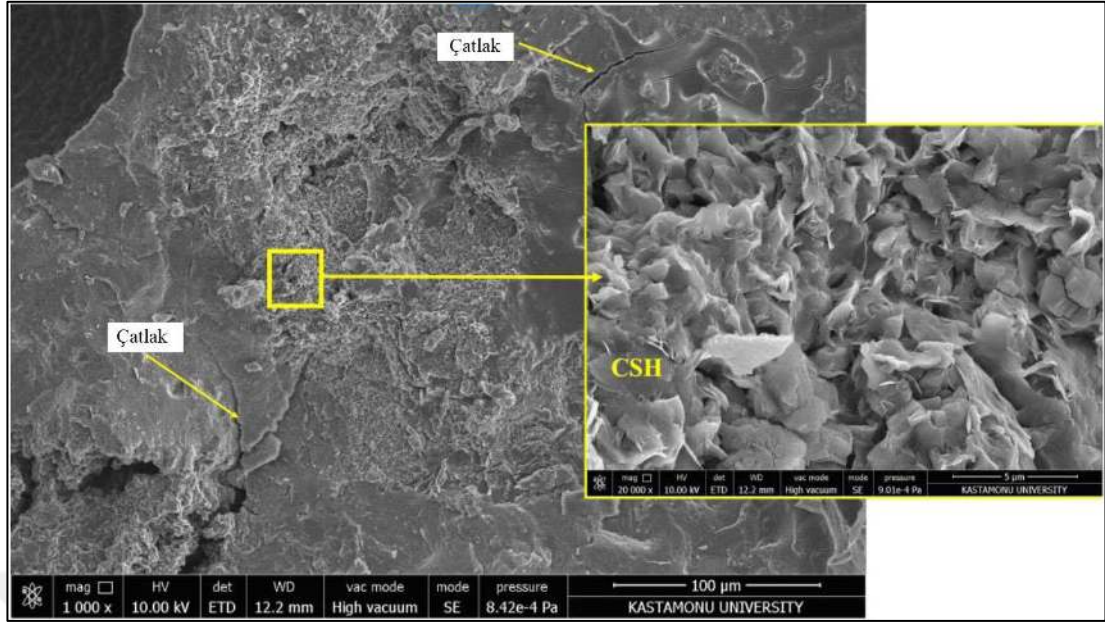
b)



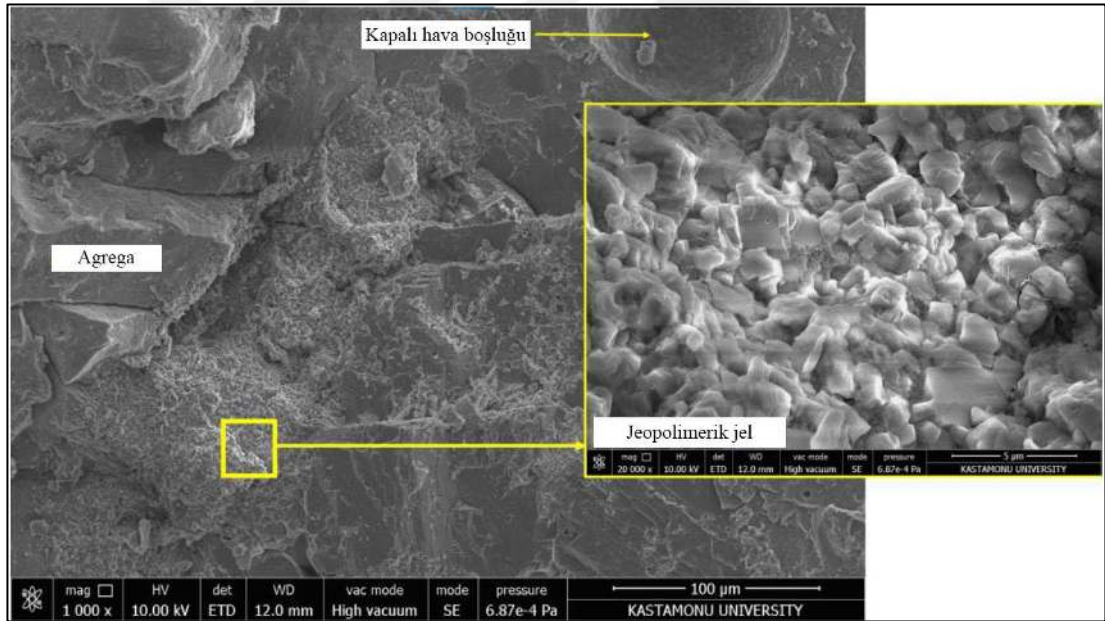
c)



d)



e)



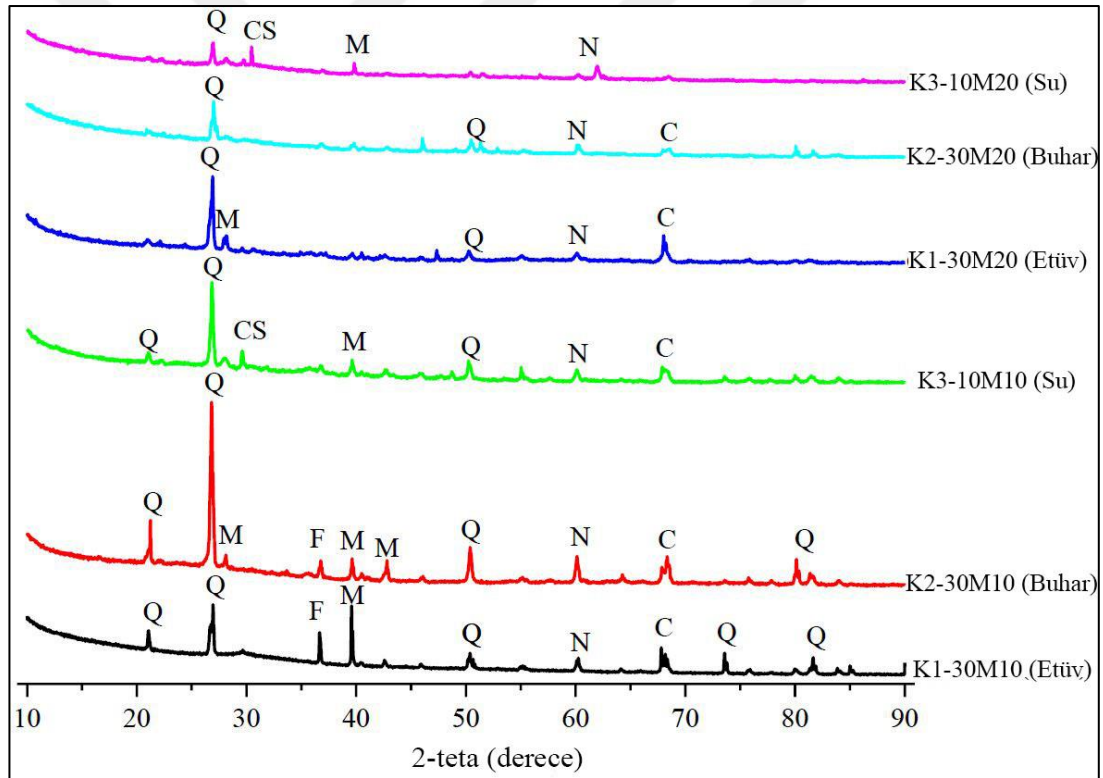
f)

Şekil 4.11 $MgSO_4$ saldırısında AAHÇ mikro yapıları

4.10.2 AAHÇ Karışımlarının XRD Analizi

Şekil 4.12, SEM incelemeleri yapılan numunelerin XRD analizlerini göstermektedir. AAHÇ karışımlarında kuvars, manyetit, mullit ve hidrosodalitin camsı fazları ve kristal fazları gözlenmiştir. Kuvars kristali, karışımlarda kullanılan silis kumuna bağlı

olarak oluşmuştur. Manyetit ve mullit ise kullanılan YFC'den kaynaklanmıştır. N pikinde jeopolimerizasyona bağlı olarak oluşan zeolitik yapıda NASH jelinin varlığı tespit edilmiştir. Karışımlarda NASH oluşmasına rağmen basınç dayanımlarının nispeten düşük olduğu gözlenmiştir. Bu durum literatürde de rapor edilmiştir (You-zhi vd., 2002). YFC içerisindeki C_2S varlığından dolayı matris içerisinde CSH jellerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. YFC gibi yüksek CaO içeriğine sahip bağlayıcılarda jeopolimer matris içerisinde CSH jellerinin oluştuğu rapor edilmiştir (Ravikumar vd., 2010). Ayrıca, jeopolimerlerin üretiminde yüksek CaO içerikli bağlayıcıların kullanılması nedeniyle karbonatlaşmaya bağlı olarak kalsit oluştuğu belirtilmiştir (Ismail vd., 2014). CS= CSH, C= $CaCO_3$, F=Magnetite (Fe_3O_4), M = Mullite ($Al_6Si_2O_{13}$), N = NASH ($Na_4Al_3Si_3O_{12}(OH)$), Q = Quartz



Şekil 4.12 AAHC karışımlarının XRD deseni

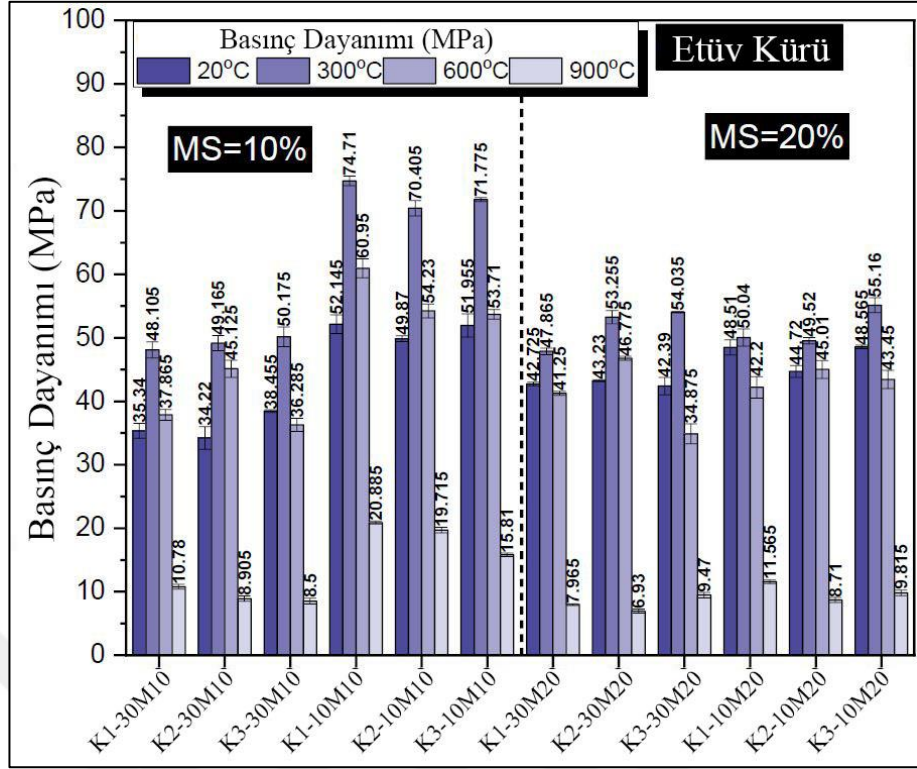
4.11 Yüksek Sıcaklık Direnci

300, 600 ve 900°C'de, AAHC karışımlarının yüksek sıcaklıklara ne kadar dayanıklı olduğu değerlendirilmiştir. Isıtma adımı 10°C/dk'dır. Oda koşullarında soğutulmuştur.

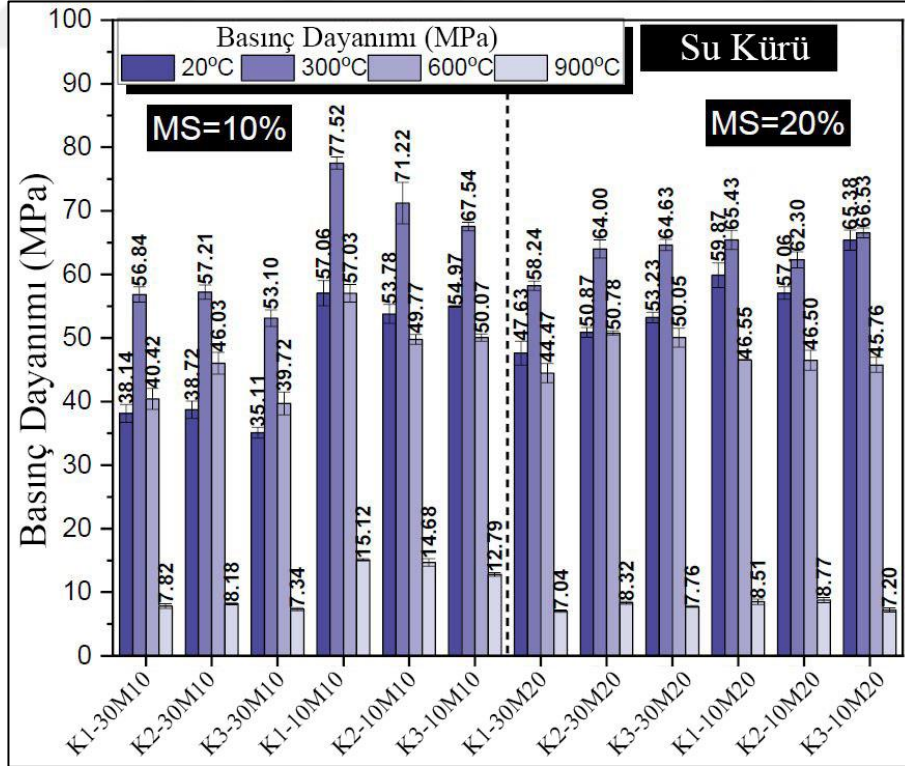
Hedef sıcaklıkta 2 saat bekletilmiştir. Yüksek sıcaklık direncini yorumlamak için mekanik özellikler ve kütle kaybı kullanılacaktır.

4.11.1 Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonrası Basınç Dayanımı

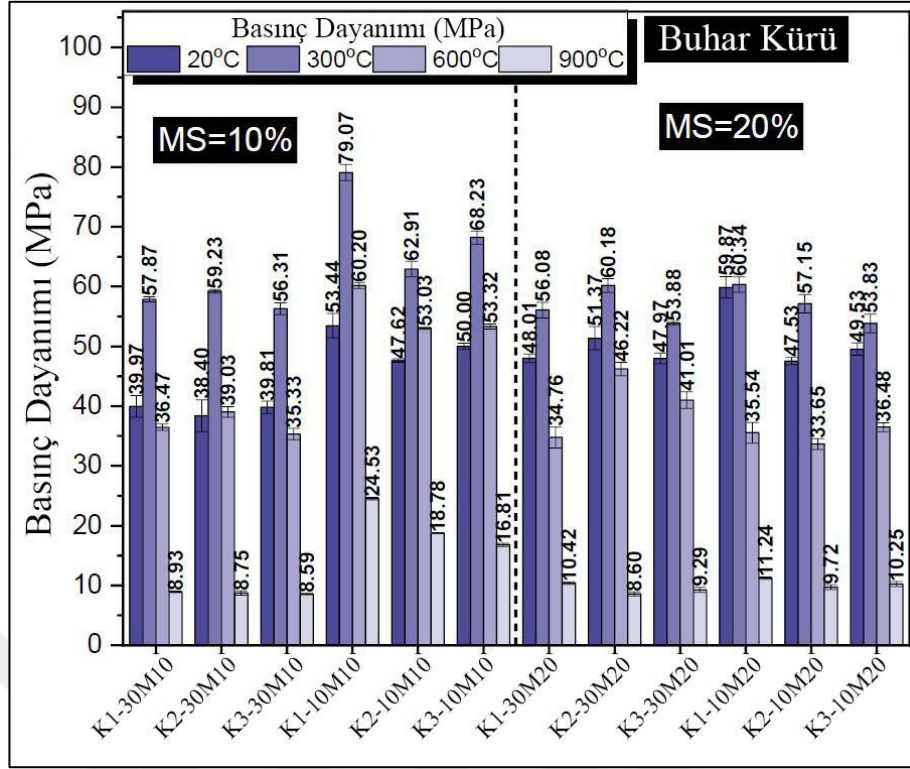
Çimento klinker tipinin, etüv, su ve buhar kürü gibi kür yöntemlerinin ve aktivatör dozajının, yüksek sıcaklıklara maruz bırakılarak 91 günde kürlenene AAHC karışımlarının ortalama basınç dayanımı üzerindeki etkileri Şekil 4.13a, b ve c'de gösterilmektedir. Şekil 4.13a, b ve c'de, yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldığında basınç dayanımının nasıl değiştiği gösterilmektedir. Tüm AAHC karışımları, kür tipi ve aktivatör dozajından bağımsız olarak 300°C'ye maruz kaldıktan sonra basınç dayanımı artışı sergilemiştir. Buna ek olarak, %10 MS ile aktive edilen karışımların çoğu, Şekil 4.13 ve 4.14'te gösterildiği gibi 600°C'de de basınç dayanımı artışı göstermiştir. Bu iyileşme, C-(A)-S-H ve C-A-S-H minerallerinin büyümesini teşvik eden ve bu sıcaklıklarda daha güçlü olmalarına yardımcı olan YFC ve klinker reaksiyona girmemiş parçacıkların neden olduğu artan jeopolimerizasyondan kaynaklanıyor olabilir (Song vd., 2022). Buhar ve "iç otoklavlama" üretmenin yanı sıra, ısıtma hidrasyonun artmasını teşvik eder ve bu da kimyasal sınırları yükseltir. Jeopolimerlerin, paylaşılan O atomlarıyla birbirine bağlanan alternatif SiO_4 ve AlO_4 tetrahedrallerinden oluşan bir ağ [$\text{Q}_4(\text{Al})$] olan üç boyutlu N-A-S-H tipi jel oluşumu nedeniyle güçlü bağlanma yeteneklerine sahip olduğu düşünülmektedir. Yüksek sıcaklıklara maruz kalmasına rağmen, bu 3 boyutlu yapı inanılmaz derecede dirençlidir. XRD ve nükleer manyetik rezonans (NMR) çalışmalarına göre 600°C'ye kadar hiçbir yapısal değişiklik görülmemiştir (Dombrowski vd., 2007; Li vd., 2010). Buna karşın, 900°C'den sonra, kütleme yöntemleri ve aktivatör içeriğinden bağımsız olarak tüm karışımlar %54,10 ile %89 aralığında dayanım kaybı sergilemiştir.



a)



b)

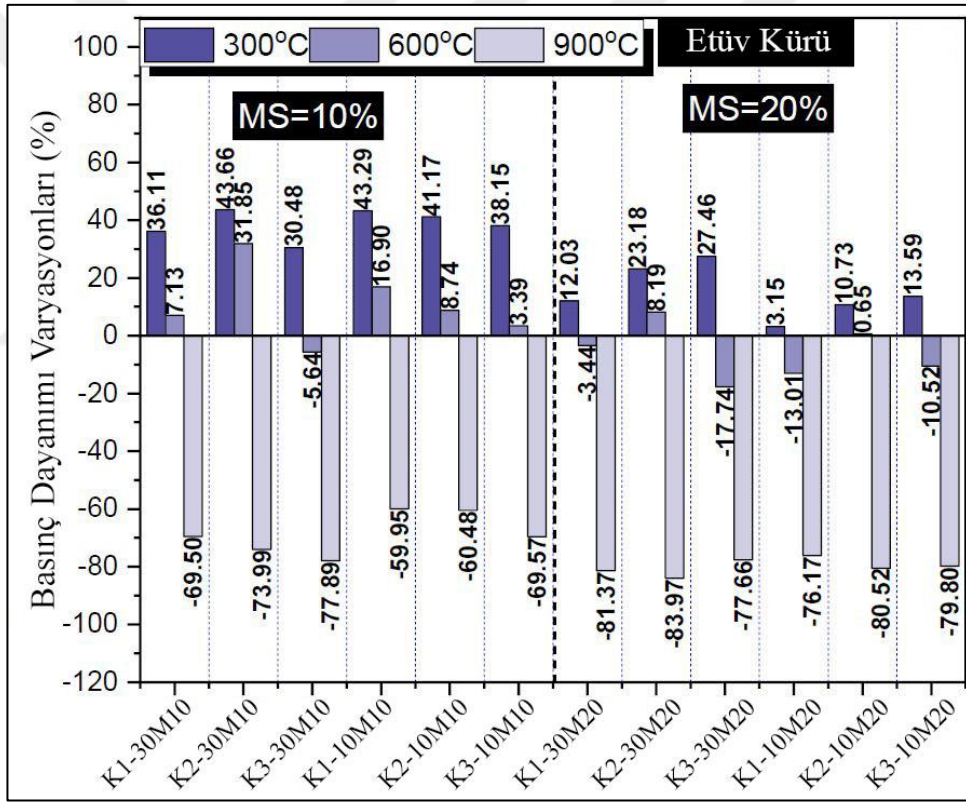


c)

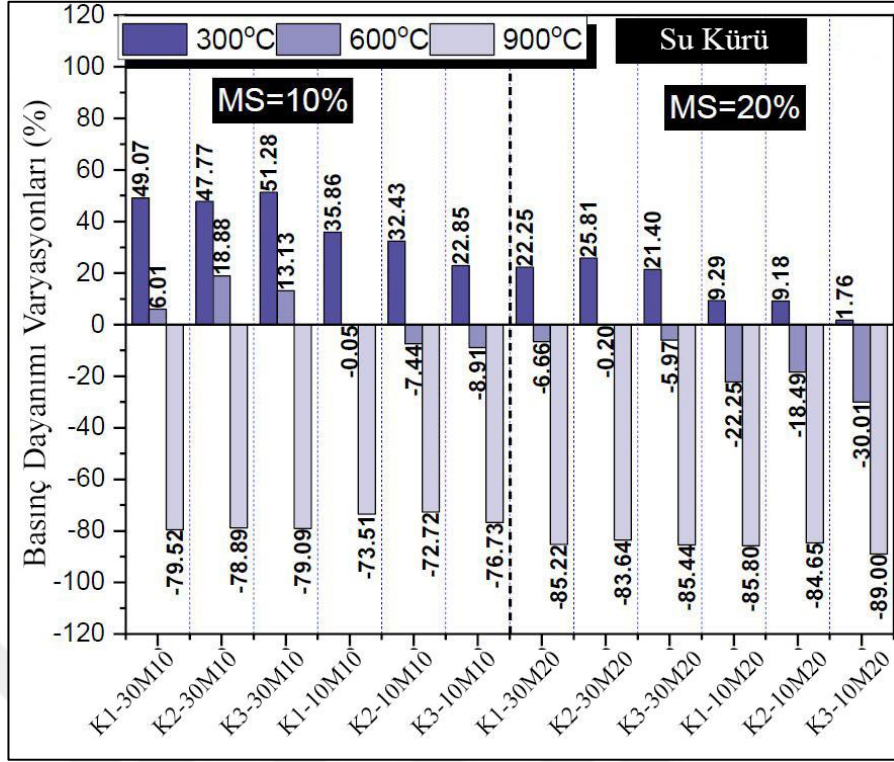
Şekil 4.13 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin yüksek sıcaklıkta basınç dayanımı üzerindeki etkisi (a, b, c)

Rovnanak ve diğerlerine göre, C-A-S-H fazının dehidratasyonu tamamlanmış ve akermanitin hakim olduğu yeni fazlar, alkali ile aktive edilmiş cürufun mikro yapılarında en önemli değişikliklerin meydana geldiği 600°C ile 900°C arasında kristalleşmeye başlamıştır (Rovnaník vd., 2013). AAHÇ karışımlarının 600°C'nin altındaki yüksek sıcaklıklarda mekanik bozunmasının ana nedenleri arasında dehidratasyon, faz ayrımı ve ardından artan gözeneklilik ve kaba gözenek yapısı ile termal çatlama yer almaktadır. Sıcaklığın 900°C'ye çıkarılması, kristalleşme ve faz geçişine neden olması ve gözenekli bir mikro yapı oluşturmasıyla, AAHÇ karışımlarının mekanik bozunması önemli ölçüde hızlandırılır (Cai ve Ye, 2021). %20MS ile aktive edilen tüm karışımlar, kütleme rejimlerinden bağımsız olarak %10'luk daha düşük aktivatör içeriğiyle aktive edilen karışımlara kıyasla 300°C'de daha düşük dayanım artışı ve 900°C'de daha yüksek dayanım kaybı göstermiştir. YFC/K oranının yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, 70/30 YFC/K oranı, 90/10 YFC/K oranına sahip karışımlarla karşılaştırıldığında, özellikle %10MS ile aktive edilen karışımlar için 300°C'de genel olarak daha yüksek dayanım artışı ve 900°C'de daha yüksek dayanım kaybı

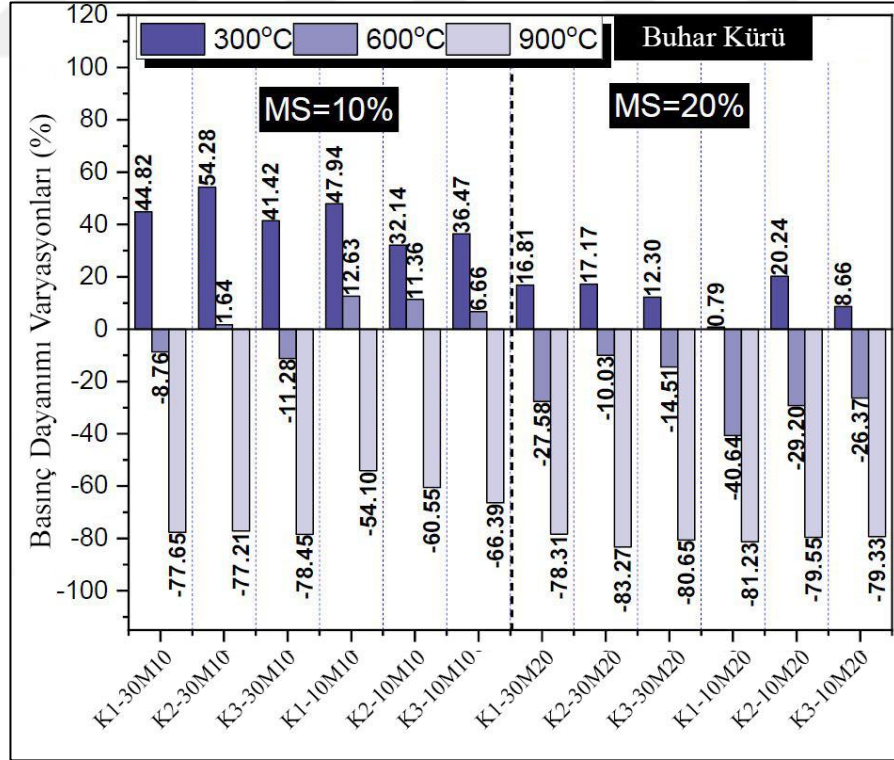
göstermiştir. Tipik beton, kalsiyum-silikat-hidratlar (C-S-H) gibi kristal hidratlardan ve betonun diğer kısımlarından nem kaybı nedeniyle 800 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ayrışır. Aşırı sıcaklıklar alüminosilikat ağına zarar vermez çünkü nem, alkali ile aktive edilmiş cüruftaki nano gözenekler aracılığıyla betondan kaçabilir (Awoyera ve Adesina, 2020; Dener vd., 2021). Kür rejiminin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı üzerindeki etkisi dikkate alındığında, 800°C sonrası en iyi yüksek sıcaklık performansı YFC/K oranı 90/10 olan ve %10 MS ile aktive edilen ısıl kürlü karışımlar için elde edilirken, 90/10 YFC/K3 oranına ve %20 MS içeriğine sahip su ile kürlen karışımlar, kür rejiminden bağımsız olarak tüm karışımlar arasında 800°C sonrası en kötü yüksek sıcaklık performansını göstermiştir.



a)



b)

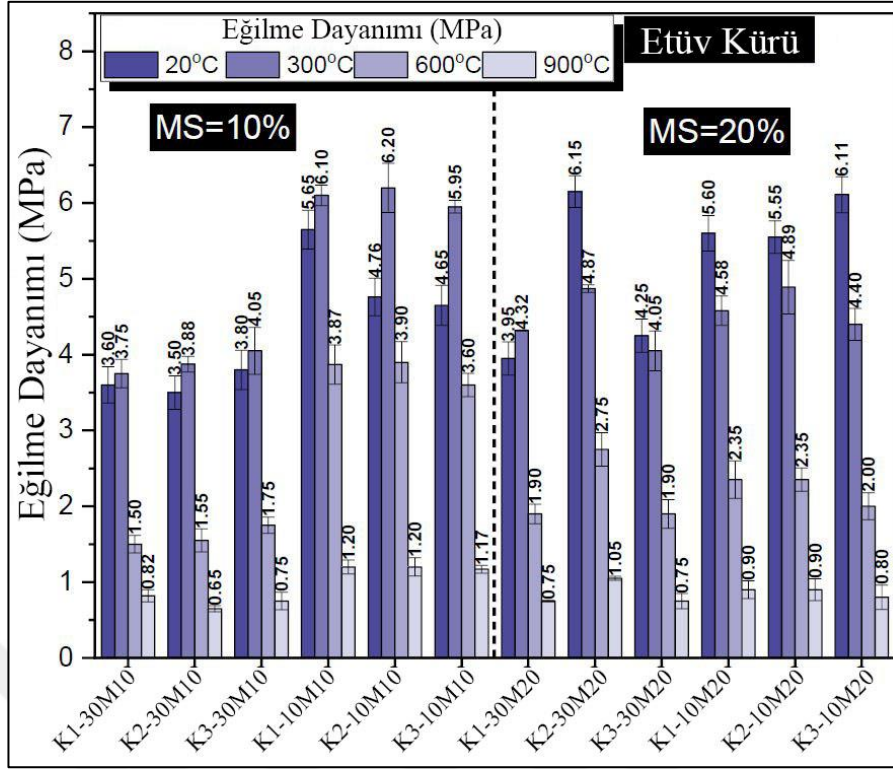


c)

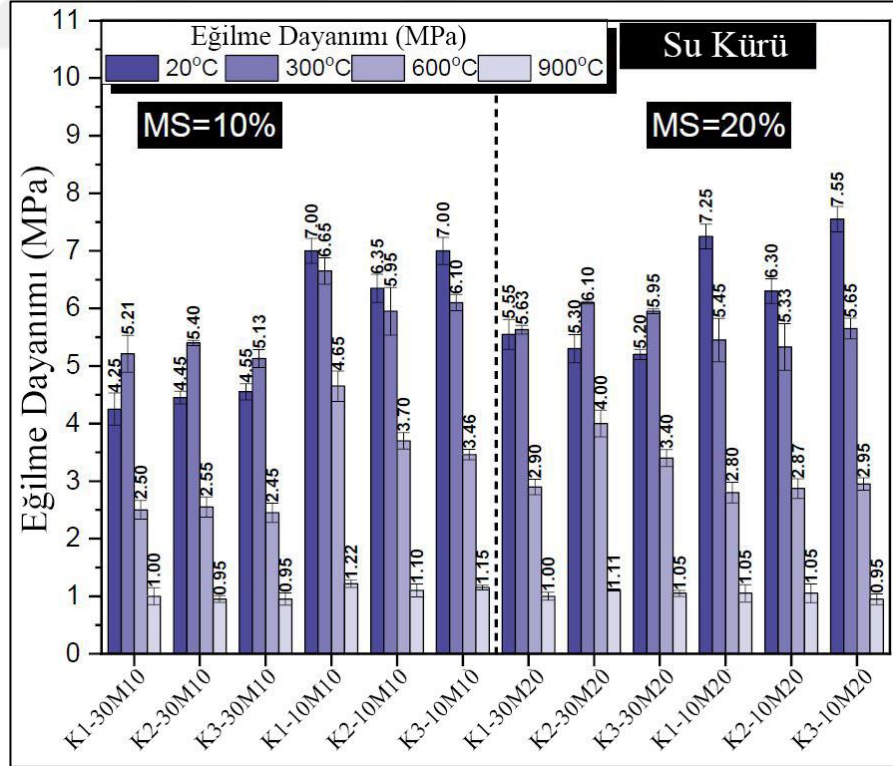
Şekil 4.14 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin yüksek sıcaklıkta basınç dayanımı değişimi üzerindeki etkisi (a, b, c)

4.11.2 Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonrası Eğilme Dayanımı

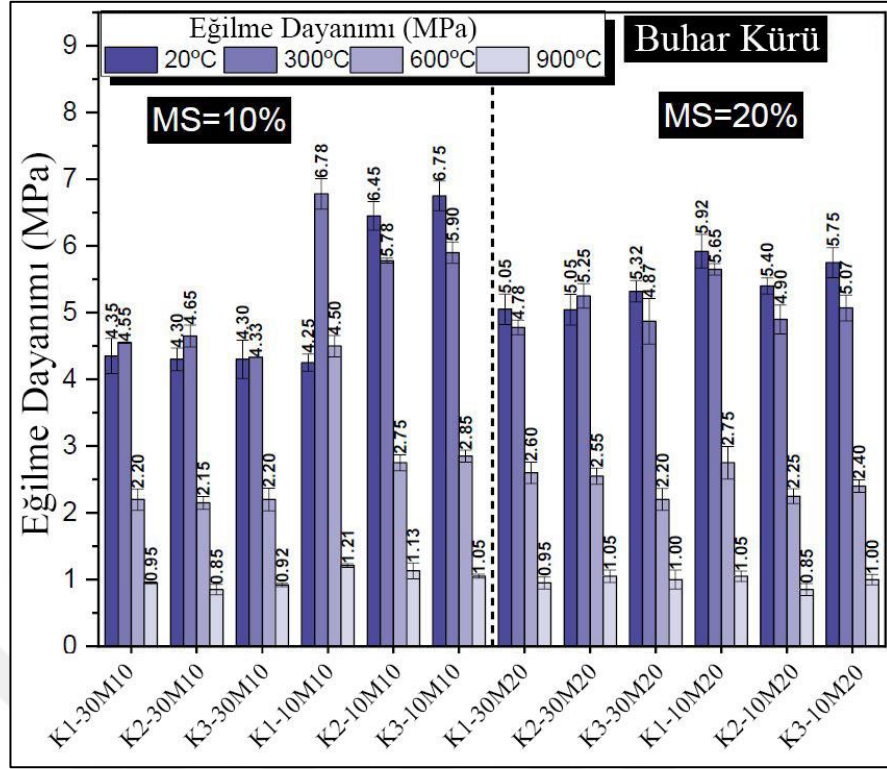
Şekil 4.15a, b ve c'de çimento klinker tipinin, etüv, su ve buhar kürü gibi kür yöntemlerinin ve aktivatör dozajının 91 günde kür edilen ve yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan AAHÇ karışımlarının ortalama eğilme dayanımı üzerindeki etkileri gösterilmektedir. Şekil 4.16a, b ve c, eğilme dayanımının yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında nasıl değiştiğini göstermektedir. Şekil 4.15 ve 4.16'da açıkça görüldüğü gibi, 200°C'lik yüksek sıcaklığa maruz bırakıldığında, kürlenme tipine, aktivatör içeriğine ve YFC/K oranına bağlı olarak bazı AAHÇ kombinasyonlarının eğilme dayanımı artmış, bazılarının ise azalmıştır. Tüm AAHÇ karışımlarının eğilme dayanımı 600 ve 900°C gibi yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında azalmıştır. AAHÇ karışımlarının mekanik bozunması 600°C'nin altındaki yüksek sıcaklıklarda meydana gelir ve faz dehidratasyonu ve ayrışmasından sonra oluşan termal çatlamaların yanı sıra artan gözeneklilik ve kabalaşmış gözenek yapısından kaynaklanır. Sıcaklık 800°C'ye yükseldiğinde faz dönüşümleri, kristalleşme ve gözenekli mikro yapının oluşması sonucunda mekanik bozunma önemli ölçüde hızlanır (Cai ve Ye, 2021). %10MS ile aktive edilen etüv kürü uygulanmış AAHÇ karışımları, YFC/K oranından bağımsız olarak 200°C'de dayanım artışı sergilemiş ve 90/10 YFC/K oranı, aktivatör dozajından bağımsız olarak etüv kürü uygulanmış karışımlara göre tüm sıcaklık aralıklarında daha iyi performans göstermiştir.



a)



b)

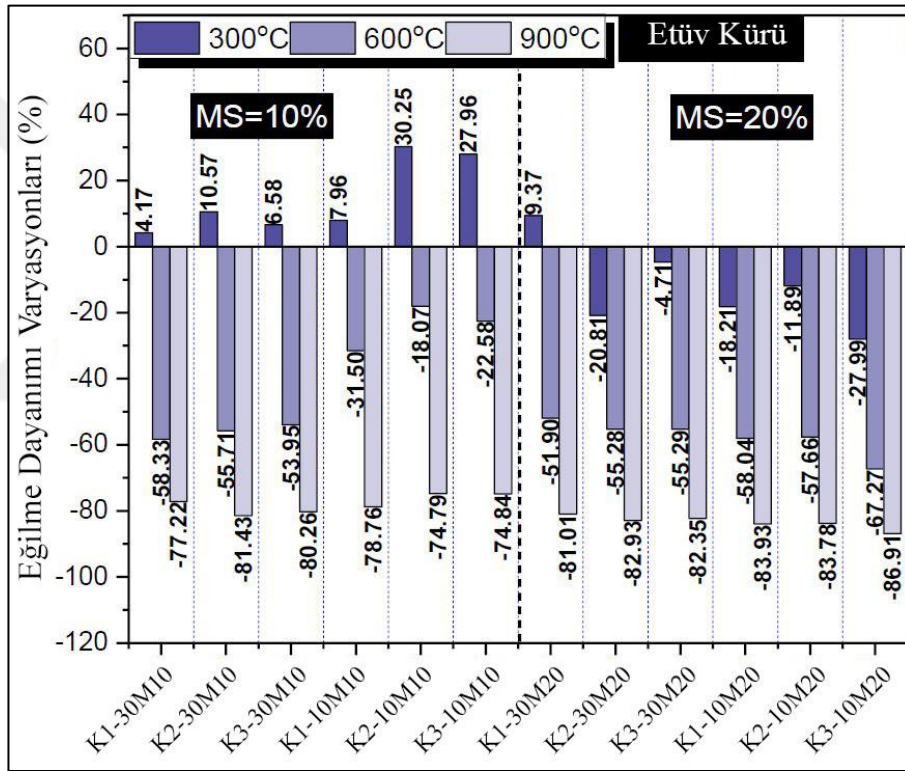


c)

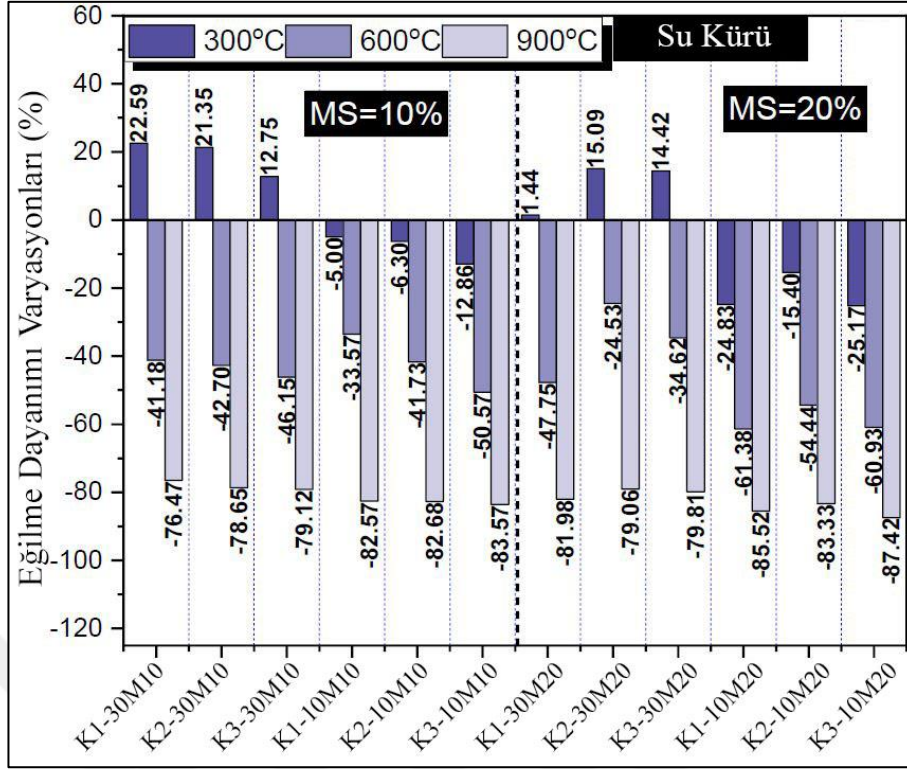
Şekil 4.15 Klinker tipinin, kürlenme rejimlerinin ve MS içeriğinin yüksek sıcaklıkta (a, b, c) eğilme dayanımı üzerindeki etkisi

300°C'deki daha yüksek performansın yanı sıra basınç dayanımı durumunda ortaya çıkanların her ikisi de yaklaşık 300°C'de reaksiyona girmemiş partiküllerin jeopolimerik reaksiyonu ile açıklanmaktadır. 600°C'den sonra, YFC/K oranı 70/30 olan ve %10MS ile aktive edilen karışım, YFC/K oranı 90/10 olan ve %10MS ile aktive edilen etüv kürlü karışıma göre daha fazla eğilme dayanımı kaybı göstermiştir. Öte yandan, Şekil 4.15a ve 4.16a'da gösterildiği gibi, %20MS ile aktive edilen etüv kürlü karışımlar için %10MS ile aktive edilen ilgili karışımlara kıyasla daha kötü yüksek sıcaklık direnci gözlenmiştir. Rovnank vd. (2013) göre, alkali ile aktive edilen cüruf, C-A-S-H fazının tamamen dehidre olduğu ve akermanitin hakim olduğu yeni fazların kristalleşmeye başladığı 600°C ile 900°C arasında mikroyapısında en önemli değişiklikleri geçirmiştir (Chen vd., 2020). %20MS ile aktive edilen etüv kürü uygulanmış karışımlar arasında, YFC/K1 içeren karışım 300°C'de %9,37 dayanım artışı ve 600 ve 900°C'de sırasıyla %51,90 ve %81 dayanım kaybı ile en iyi performansı sergilemiştir. %20MS ile aktive edilen diğer etüv kürlü karışımlar 600 ve 900°C'de biraz daha yüksek dayanım kaybına sahipti. YFC/K oranı 70/30 olan su ile kürlenmiş karışımlar, aktivatör içeriğinden bağımsız olarak YFC/K oranı 90/10 olan

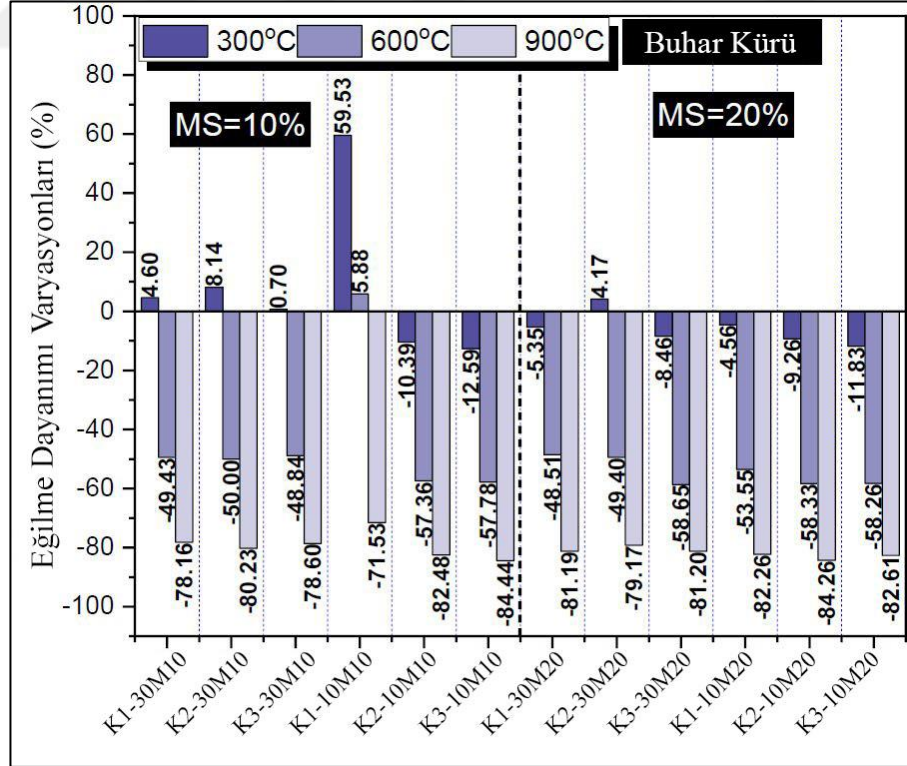
karışımlara kıyasla 300°C'de eğilme dayanımı artışı ve 900°C'de biraz daha düşük dayanım kaybı göstermiştir. 90/10 YFC/K3 oranına ve %20 MS içeriğine sahip su ile kürlenlen karışımlar, kürlenme tipine bakılmaksızın tüm karışımlar arasında 800°C'den sonra eğilme dayanımı açısından en kötü yüksek sıcaklık performansını göstermiştir. Buharla kürlenlen karışımlar arasında, 90/10 YFC/K1 oranına ve %10 MS içeriğine sahip karışım için yüksek sıcaklıktan sonra ilginç bir eğilme dayanımı sonucu elde edilmiştir. İfade edilen karışım, 300°C ve 600°C'de sırasıyla %59,53 ve %5,88'lik dayanım artışları ve 900°C'de %71,53'lük dayanım kaybı ile en iyi performansı sergilemiştir.



a)



b)

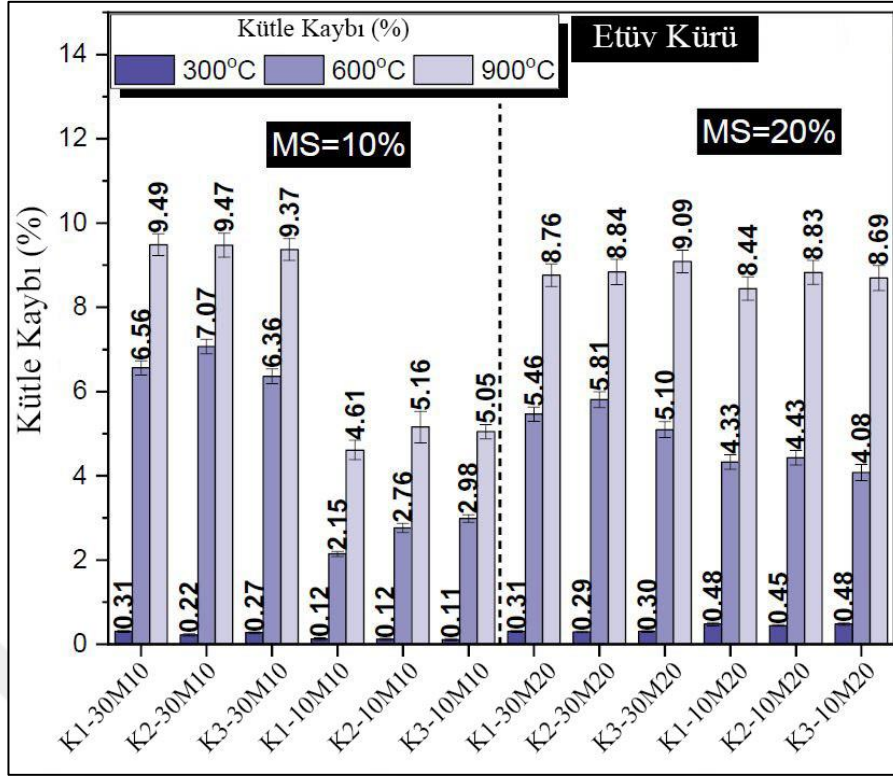


c)

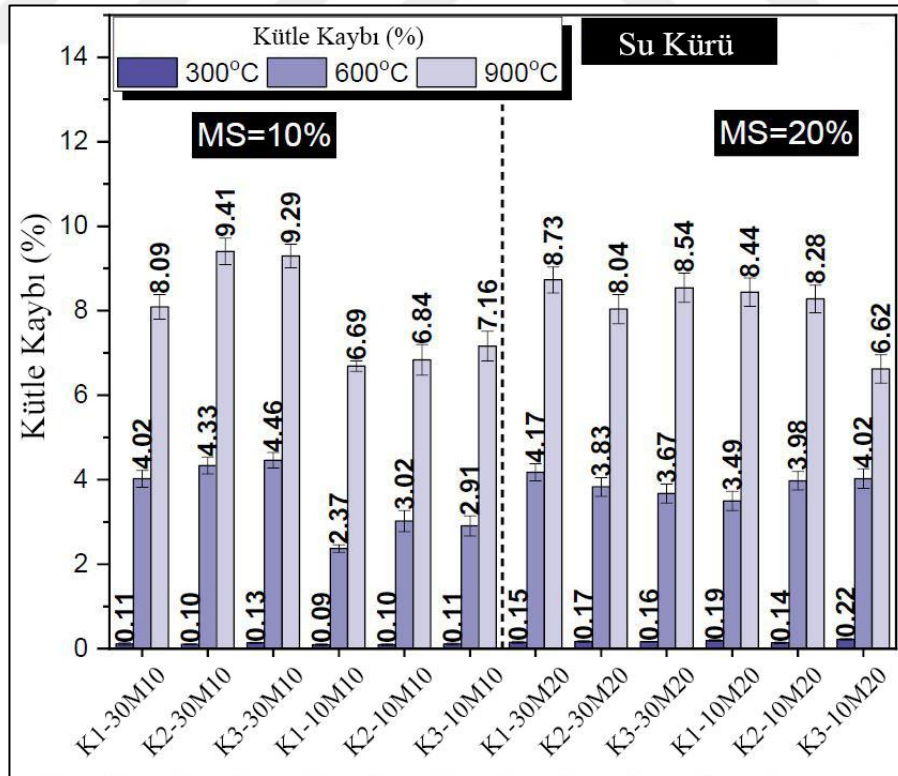
Şekil 4.16 Klinker tipinin, kürlleme rejimlerinin ve MS içeriğinin yüksek sıcaklıkta (a, b, c) eğilme dayanımı değişimi üzerindeki etkisi

4.11.3 Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonrası Kütle Kaybı

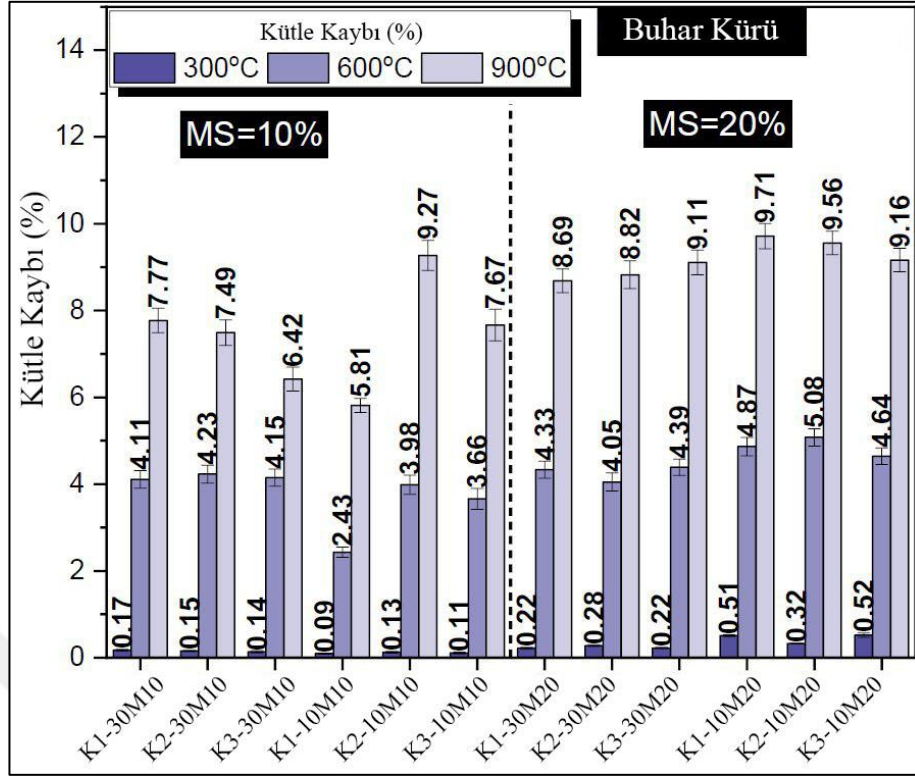
Yüksek sıcaklıklara maruz kalan beton için kütle kaybı testi en önemli testlerden biridir. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında maddenin kütlelerinin nasıl değiştiğini inceleyerek betonda meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişiklikler hakkında çok şey keşfedilebilir (Sedaghatdoost vd., 2019). Şekil 4.17a, b ve c, çimento klinker tipinin, etüv, su ve buhar kürü gibi kür tekniklerinin yanı sıra aktivatör dozajının 91 gün boyunca yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan AAHÇ karışımlarının ortalama kütle kaybı üzerindeki etkisini göstermektedir. Sıcaklık yükseldikçe, tüm AAHÇ karışımlarında kütle kaybı artmış ve 900°C'de tüm kütle kayıpları %10'un altında kalmıştır. 300°C'de, tüm karışımlarda serbest gözenek suyunun buharlaşmasına atfedilebilecek %0,52'nin altında çok düşük kütle kaybı olmuştur. 600°C'de kütle kaybı %7,07 ile %2,15 arasında değişmiş ve karışımların çoğu bu sıcaklıkta %5,0'in altında kütle kaybına sahip olmuştur. 900°C'de, hem kapiler su hem de jel suyunun salınımı, genel olarak, bu alandaki kütle kaybının nedeni olabilir. Yoğunluk ve gözeneklilik gibi dayanıklılık özellikleri betonun termal direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğundan, daha yüksek gözenekliliğe sahip kombinasyonların daha yüksek kütle kayıpları yaşadığı tespit edilmiştir. Bu durum özellikle %10MS ile aktive edilen ve etüv ve su kürüne maruz bırakılan karışımlar için çok açıktır. 900°C'de en düşük kütle kaybı YFC/K oranı 90/10 olan ve %10MS ile aktive edilen karışımlar için ölçülmüştür. %20'lik MS ile aktive edilen karışımlar için kütle kayıpları, kütleleme tipine ve YFC/K oranına bakılmaksızın 900°C'de birbirine çok yakın ve %8 ile %9 aralığındadır.



a)



b)



c)

Şekil 4.17 Klinker tipinin, kürlenme rejimlerinin ve MS içeriğinin yüksek sıcaklıkta kütle kaybına etkisi (a, b, c)

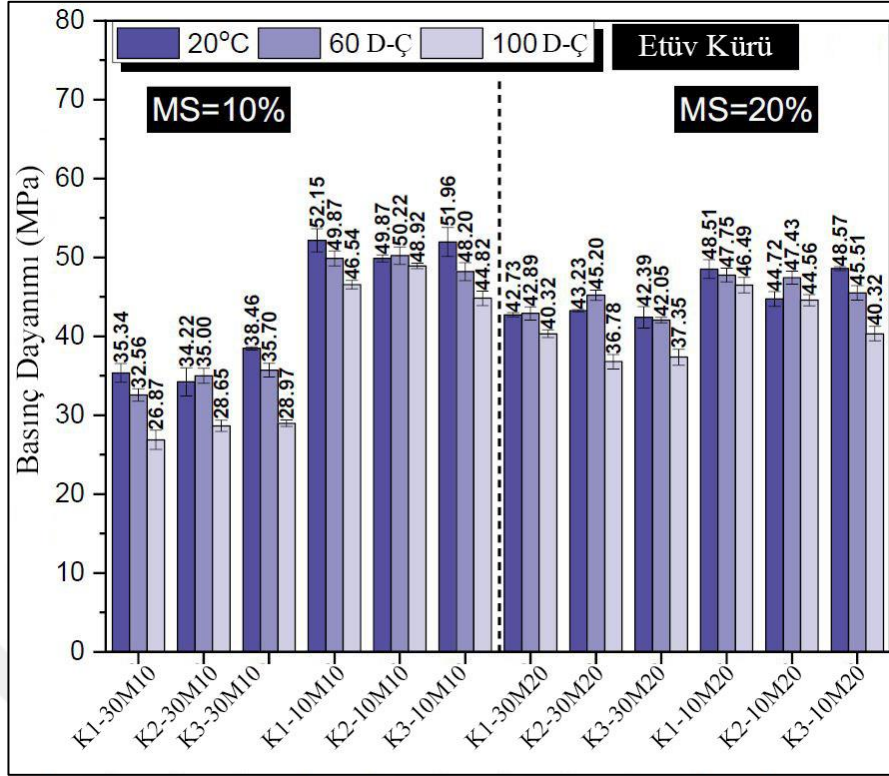
4.12 Donma-Çözülme Dayanıklılığı

60 ve 100 donma-çözülme (D-Ç) döngüsüne tabi tutulan karışımlarının mekanik özellikleri ile ilgili olarak ASTM C666-97[38] uyarınca, AAM numuneleri 7 saat boyunca $20 \pm 4^\circ\text{C}$ 'de donma döngülerine ve suda 5 saat çözülmeye maruz bırakılmıştır. Bu işlem 28 günlük $20 \pm 3^\circ\text{C}$ su küründen sonra tamamlanmıştır. 60 ve 100 D-Ç döngüsü gerçekleştirildikten sonra, her karışımdan üç numune üzerinde basınç, eğilme ve kütle kaybı testleri yapılmıştır.

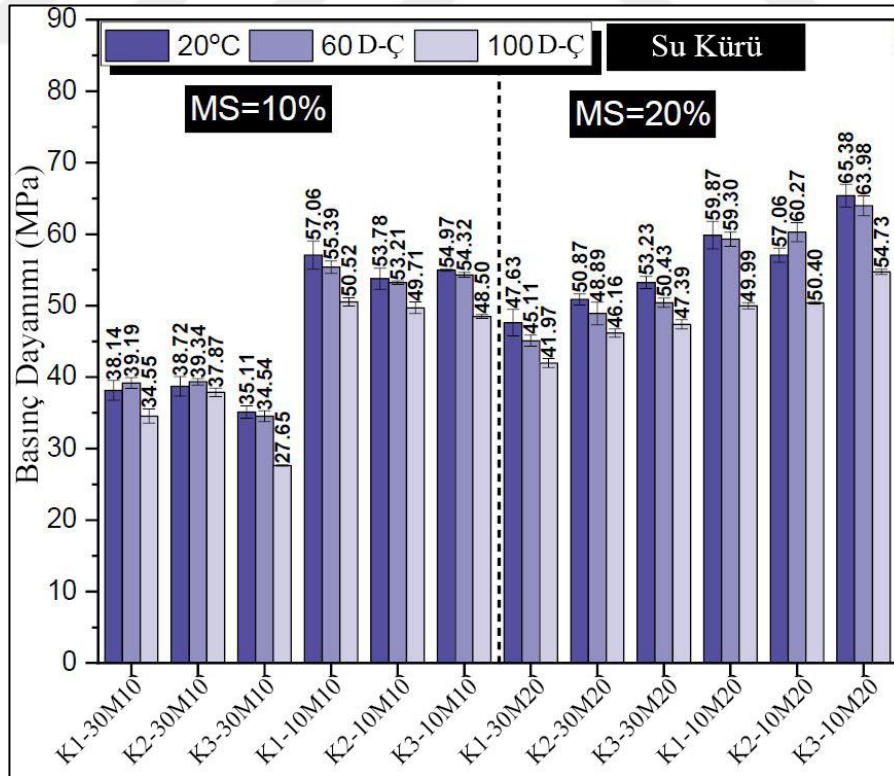
4.12.1 D-Ç Sonrası Basınç Dayanımı

Bir malzemenin fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilecek şiddetli sıcaklık değişimlerine dayanma kabiliyeti "donma-çözülme direnci" olarak adlandırılır. Hafif betonun daha yüksek gözenekliliği ve serbest su tutma kabiliyeti nedeniyle, donma-çözülme (D-Ç) direnci ciddi bir dayanıklılık sorunu nedeni olabilir. AAM numunelerindeki kıvrımlılık derecesi, gözeneklerin dağılımı ve

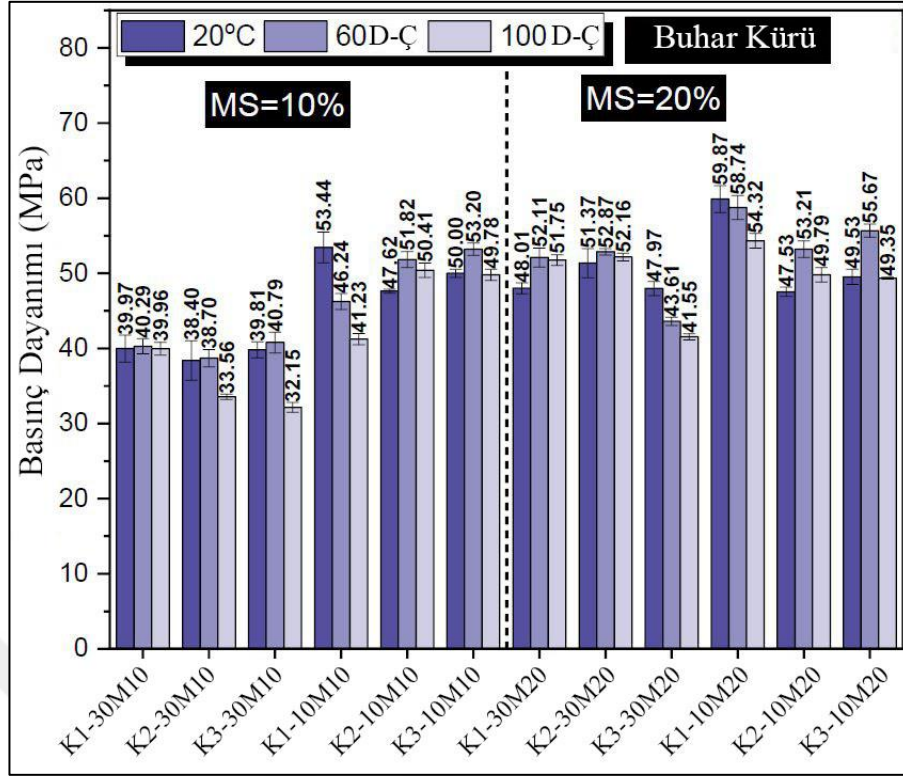
gözeneklerin hacmi donma-çözülme direncini etkiler. Daha fazla su emiliminin bir sonucu olarak gözenekler içinde daha fazla buz hacmi oluşur; erime iç gerilimi serbest bırakır ve gözenek hacmini azaltırken, bu genişleme matris duvarlarında basınç stresine neden olur. Bu testten sonra gözenek çapları ve toplam gözeneklilik artsa da, gözeneklerin nihai hacim değişikliği matrisin elastik/plastik gerilmelerinden (yani kalıcı/iyileşen deformasyonlardan) kaynaklanır. Hacim genişlemesi ve daralmasının getirdiği yükleme ve boşaltmayı yorulma yüklemesi olarak modellemek mümkündür (Abdollahnejad vd., 2020; Bayraktar, vd., 2021a; Bayraktar, vd., 2021b; Bayraktar, vd., 2021c; Bayraktar vd., 2022; Gencel vd., 2021). Şekil 4.18a, b ve c, çimento klinker tipinin, etüv, su ve buhar kürü gibi kür tekniklerinin yanı sıra aktivatör dozajının 91 günde kürlenene ve 0, 60 ve 100 D-Ç döngüsüne maruz bırakılan AAHÇ karışımlarının ortalama basınç dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir. D-Ç döngülerine maruz kalma ile basınç dayanımı değişimleri Şekil 4.19a, b ve c'de gösterilmiştir. Sonuçlar, %20MS'lik daha yüksek aktivatör içeriğine sahip karışımların, %10 MS'lik daha düşük aktivatör içeriğine sahip karışımlardan daha yüksek donma-çözülme direnci gösterdiğini açıkça doğrulamıştır. Daha yüksek alkali içeriğinde maksimum dayanım kaybı 100 D-Ç döngüsünden sonra %16,97 iken, daha düşük alkali içeriğinde maksimum dayanım kaybı %24,66 olmuştur. YFC/K oranının D-Ç çevrimlerine maruz kalan karışımların basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde, YFC/K oranı 70/30 olan ve %10MS ile aktive edilen etüv ve su ile kürlenene karışımlar, YFC/K oranı 90/10 olan ve %10MS ile aktive edilen etüv ve su ile kürlenene karışımlara göre daha yüksek dayanım kaybı sergilemiştir. Öte yandan. Etüv ve su ile kürlenene karışımlar %20MS ile aktive edildiğinde, YFC/K oranı 70/30 olan karışımların YFC/K oranı 90/10 olan karışımlardan daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Bir diğer ilginç sonuç ise YFC/K2 ile etüvde kürlenene karışımların aktivatör içeriği ve YFC/K oranından bağımsız olarak 60 D-Ç döngüsünde dayanım artışı göstermiş olmasıdır. Şekil 19 ve 20'de gösterildiği gibi, aktivatör içeriği ve YFC/K oranı 90/10 olduğunda daha fazla artış elde edilmiştir.



a)



b)

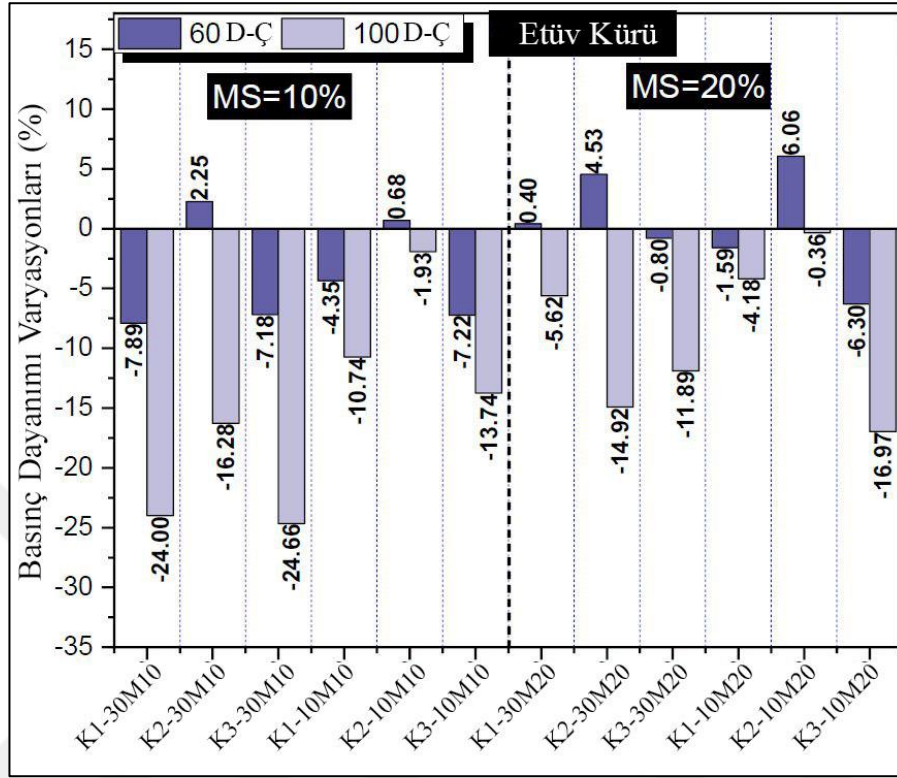


c)

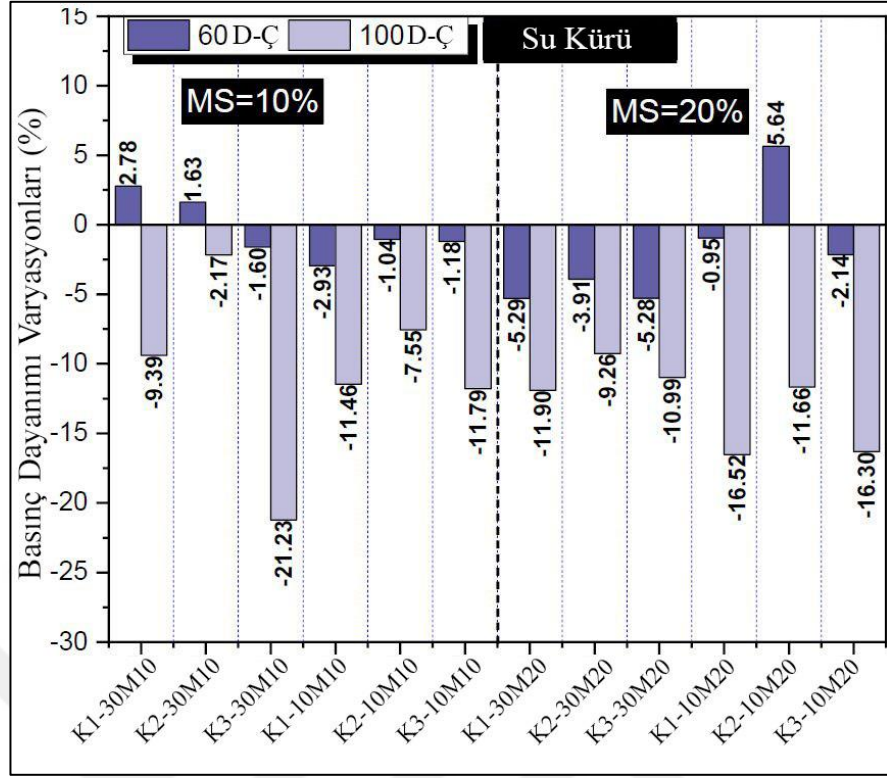
Şekil 4.18 Klinker tipinin, kürlenme rejimlerinin ve MS içeriğinin D-Ç döngülerindeki (a, b,c)

Su ile kürlenene karışımlarda, Şekil 4.18 ve 4.19'de gösterildiği gibi, %10MS ile aktive edilen YFC/K1 ve YFC/K2 oranı 70/30 ve %20MS ile aktive edilen YFC/K2 oranı 90/10 olmak üzere üç karışım 60 D-Ç döngüsünde dayanım artışı göstermiştir. Buharla kürlenene karışımlar arasında 60 ve 100D-Ç'den sonra en iyi D-Ç direnci gözlenmiştir çünkü Şekil 4.18c ve 4.19c'de gösterildiği gibi bazı buharla kürlenene karışımlar hem 60 hem de 100D-Ç döngülerinde dayanım artışı göstermiştir. Bu kür tipinde, daha yüksek aktivatör içeriğiyle aktive edilen karışımlar, etüvde ve suda kürlenene karışımlara benzer şekilde daha düşük aktivatör içeriğine sahip karışımlardan daha iyi performans göstermiştir. Şekil 4.18 ve 4.18'de açıkça görüldüğü üzere, çimento klinker tipi, YFC/ klinker oranı, aktivatör içeriği ve kür tipi AAHÇ karışımlarının D-Ç direnci üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. YFC/K2 oranı 90/10 olan ve %10MS ile aktive edilen, YFC/K1ve YFC/K2 oranları 70/30 olan ve YFC/K2 oranı 90/10 olan ve %20MS ile aktive edilen üç buhar kürlü karışım, Şekil 4.17c ve 4.18c'de gösterildiği gibi 60 ve 100 D-Ç döngüsünde dayanım artışı göstermiştir. Buharla kürlenene karışımlarda en kötü D-Ç direnci, 60 ve 100 D-Ç döngüsünde sırasıyla %13,47 ve

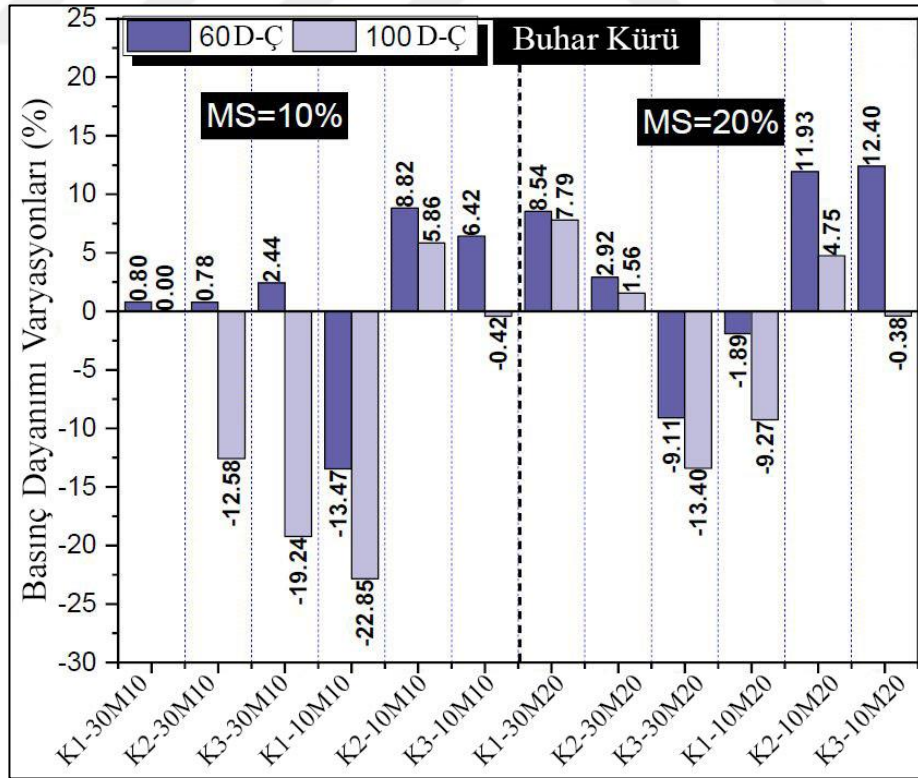
%22,85'lik en yüksek dayanım kaybıyla YFC/K1 oranı 91/10 olan ve %10MS ile aktive edilen karışım için gözlenmiştir.



a)



b)

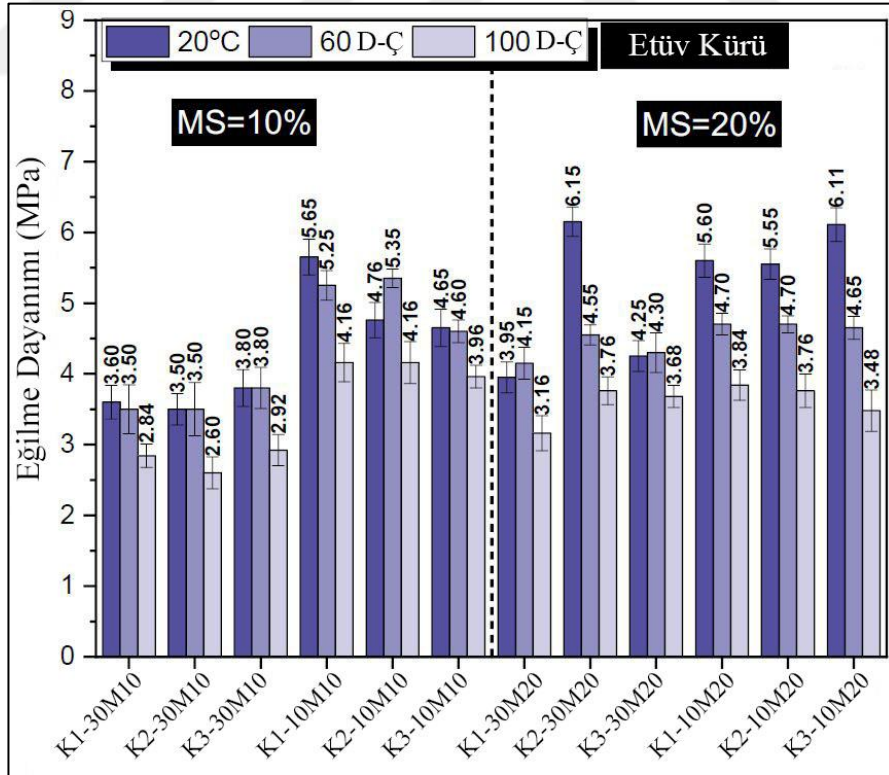


c)

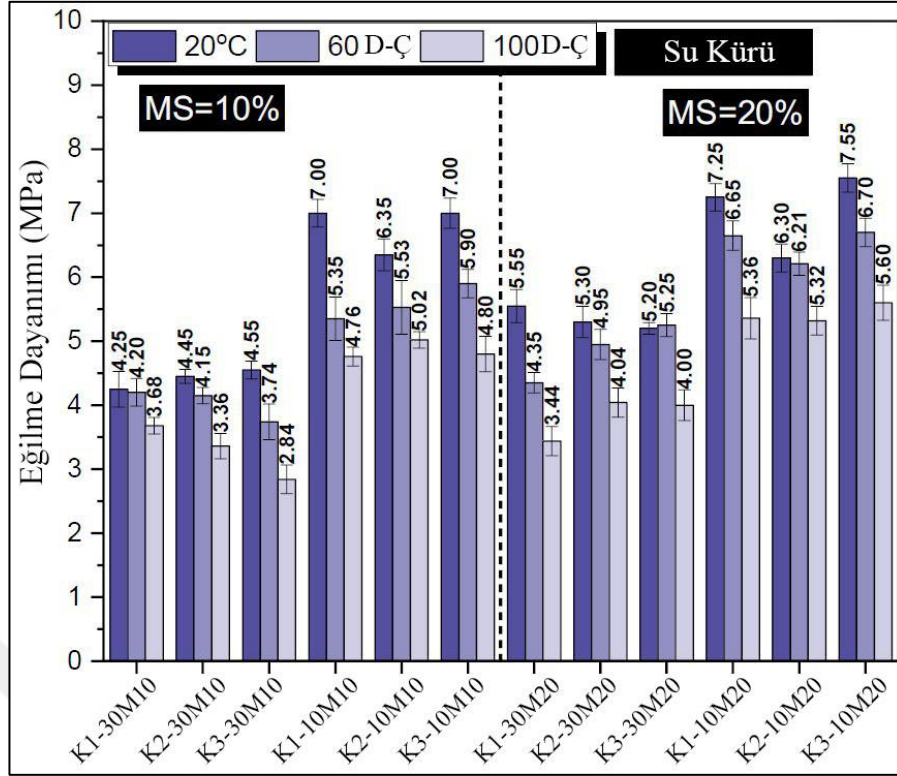
Şekil 4.19 Klinker tipinin, kürleme rejimlerinin ve MS içeriğinin D-Ç döngülerindeki (a, b, c) basınç dayanımı değişikliği üzerindeki etkisi

4.12.2 D-Ç Sonrası Eğilme Dayanımı

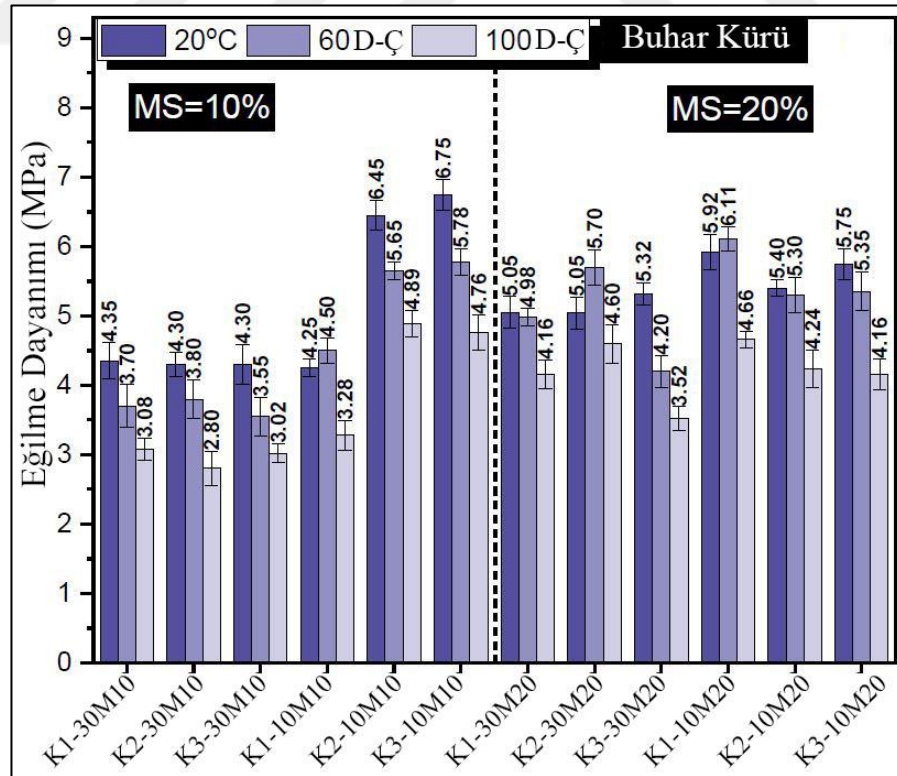
Şekil 4.20a, b ve c'de çimento klinker tipinin, etüv, su ve buhar kürü gibi kür yöntemlerinin ve aktivatör dozajının 91 günde kürlenene ve 0, 60 ve 100 D-Ç döngüsüne maruz bırakılan AAHC karışımlarının ortalama eğilme dayanımı üzerindeki etkileri gösterilmektedir. Şekil 4.21 a, b ve c, D-Ç döngülerine maruz kalma ile eğilme dayanımındaki değişiklikleri göstermektedir. 60 D-Ç döngüsünden sonra, etüv, su ve buhar kürüne maruz kalan bazı karışımlar, artan jeopolimerizasyon oranı nedeniyle %0,0 ile %13,10 aralığında eğilme dayanımı artışı sergilemiştir. Öte yandan, 100 D-Ç döngüsünden sonra, tüm karışımlar %8,73 ile %43,04 aralığında dayanım kaybı göstermiştir. Minimum dayanım kaybı, YFC/K2 oranı 70/30 olan ve %20MS ile aktive edilen buharla kürlenene karışım için belirlenmiştir ve bu karışım da 60 D-Ç döngüsünde maksimum dayanım artışına sahip olmuştur. Maksimum dayanım kaybı YFC/K3 oranı 90/10 olan ve %20MS ile aktive edilen etüv kürlü karışım için belirlenmiştir.



a)



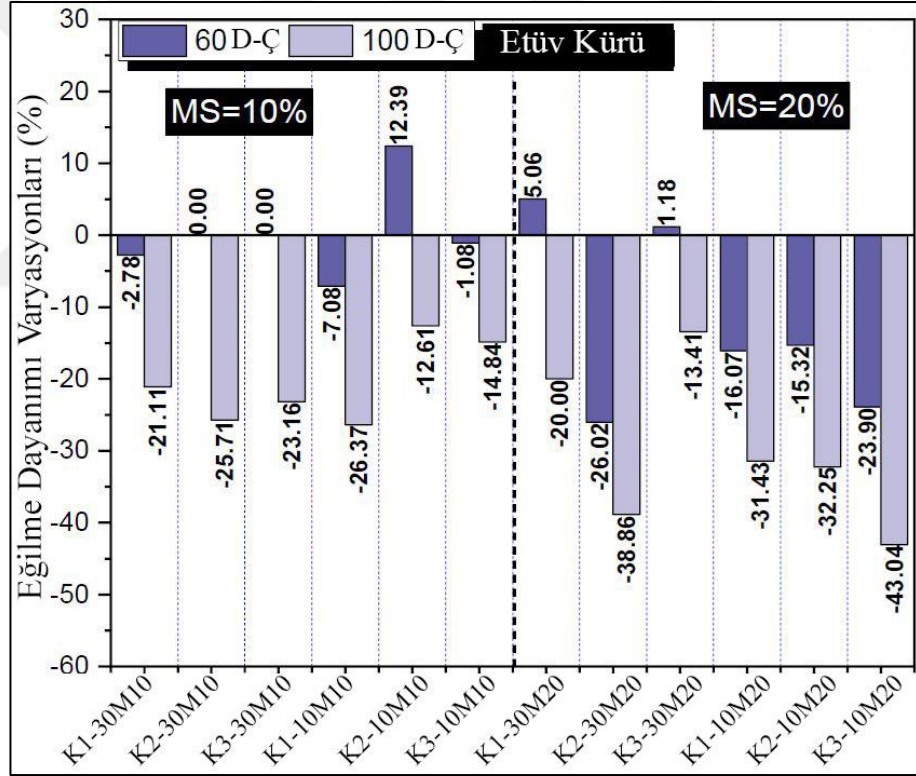
b)



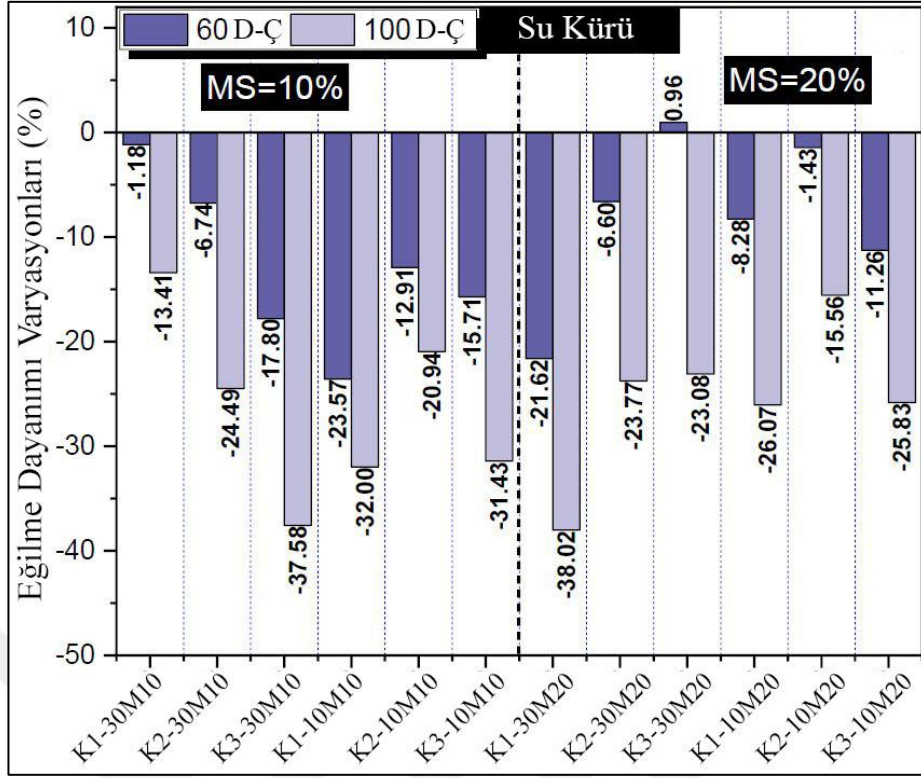
c)

Şekil 4. 20 Klinker tipinin, kürlenme rejimlerinin ve MS içeriğinin D-Ç döngülerindeki (a, b, c) bükülme dayanımı üzerindeki etkisi

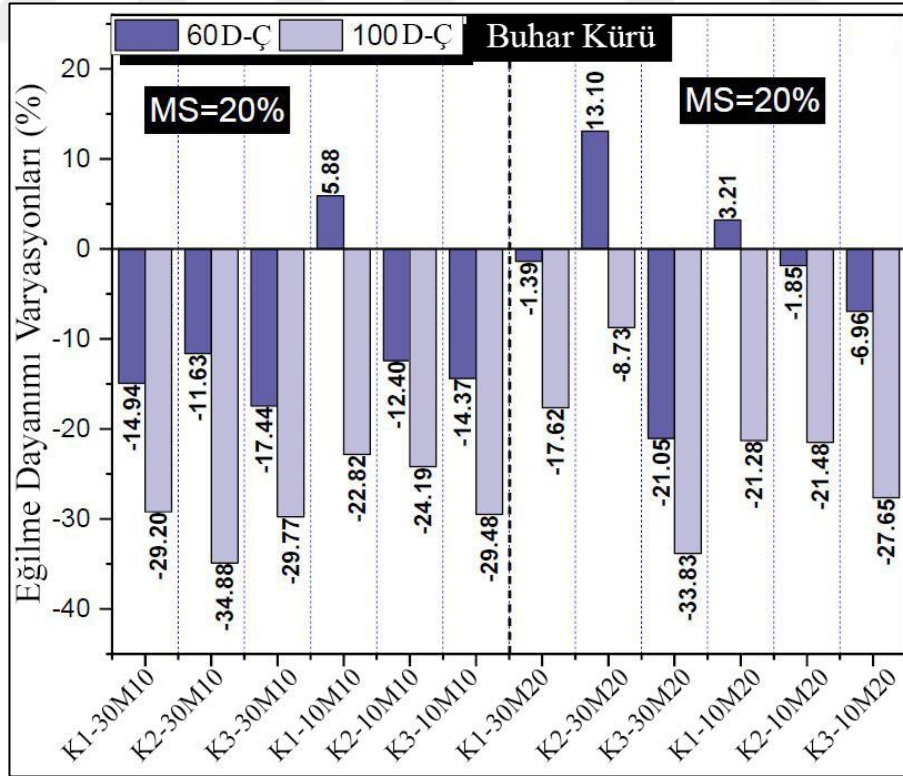
%10MS ile aktive edilen etüv kürü uygulanmış karışımlar genellikle %20MS ile aktive edilen ilgili karışımlardan daha iyi D-Ç performansı sergilemiştir, bu da daha yüksek aktivatör içeriğinin etüv kürü uygulanmış karışımların D-Ç direncini azalttığı anlamına gelmektedir. Elbette, %20MS ile aktive edilen bazı karışımlar, Şekil 4.21a'da gösterildiği gibi YFC/K oranına ve çimento klinker tipine bağlı olarak daha iyi dirence sahip olmuştur. Öte yandan, etüvde kürlenен karışımların aksine, %10MS ile aktive edilen suda kürlenен karışımlar, Şekil 4.21b'de gösterildiği gibi, %20MS ile aktive edilen ilgili karışımlardan genellikle daha kötü D-Ç performansı sergilemiştir. Yukarıda belirtildiği gibi, kür tipinden bağımsız olarak tüm karışımlar arasında en iyi D-Ç direnci Şekil 4.21c'de gösterildiği gibi buharla kürlenен karışımlarda bulunmuştur.



a)



b)

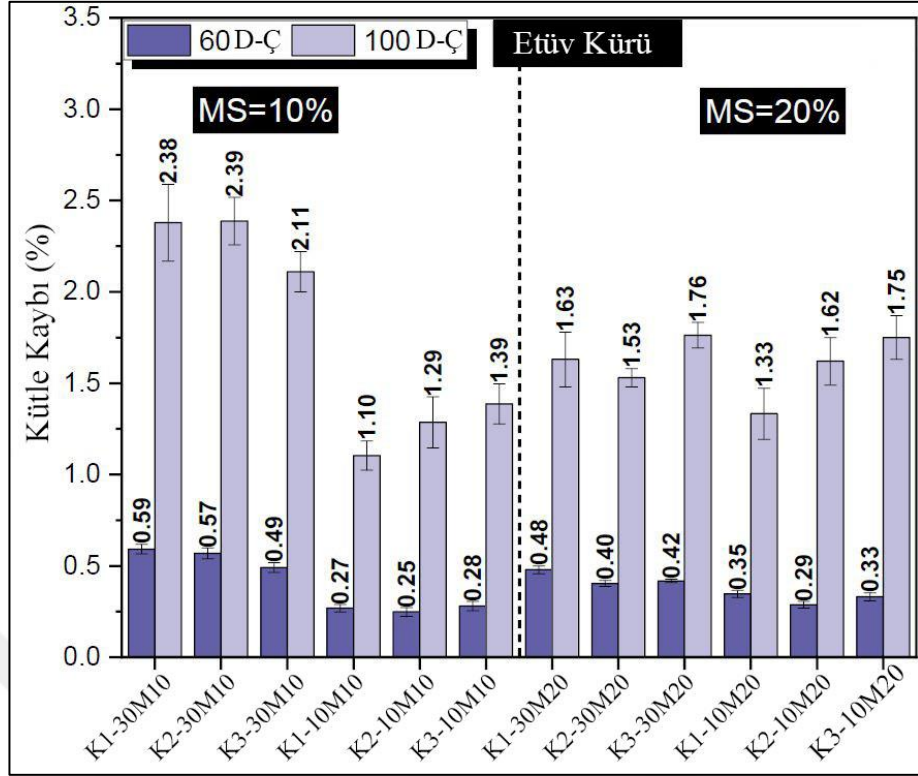


c)

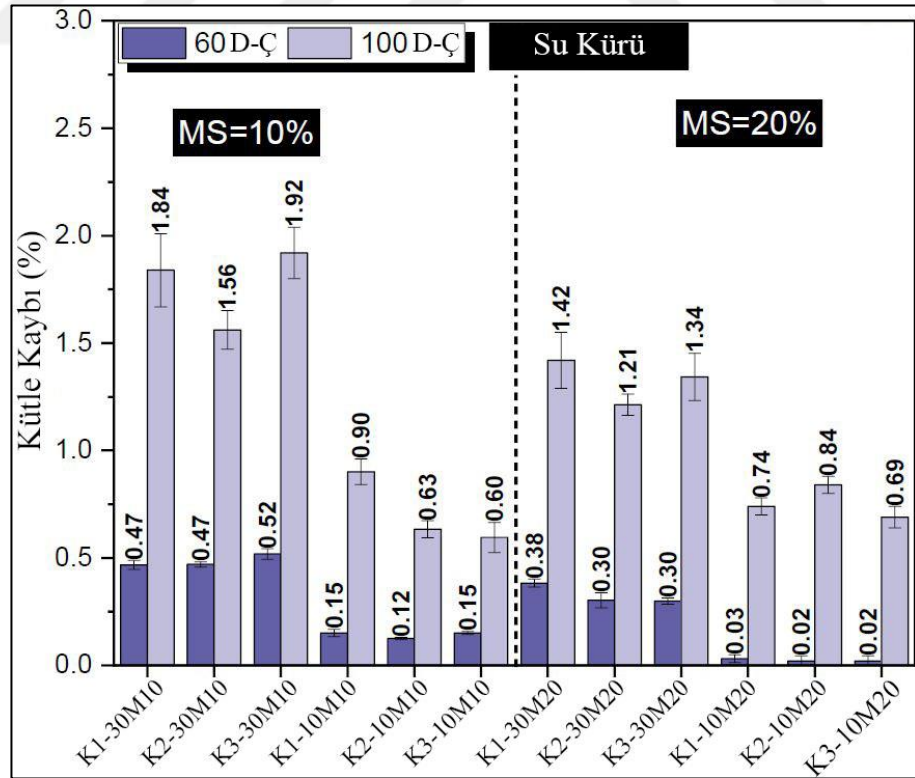
Şekil 4.21 Klinker tipinin, kürleme rejimlerinin ve MS içeriğinin D-Ç döngülerindeki (a, b, c) bükülme dayanımı değişimi üzerindeki etkisi

4.12.3 D-Ç Sonrası Kütle Kaybı

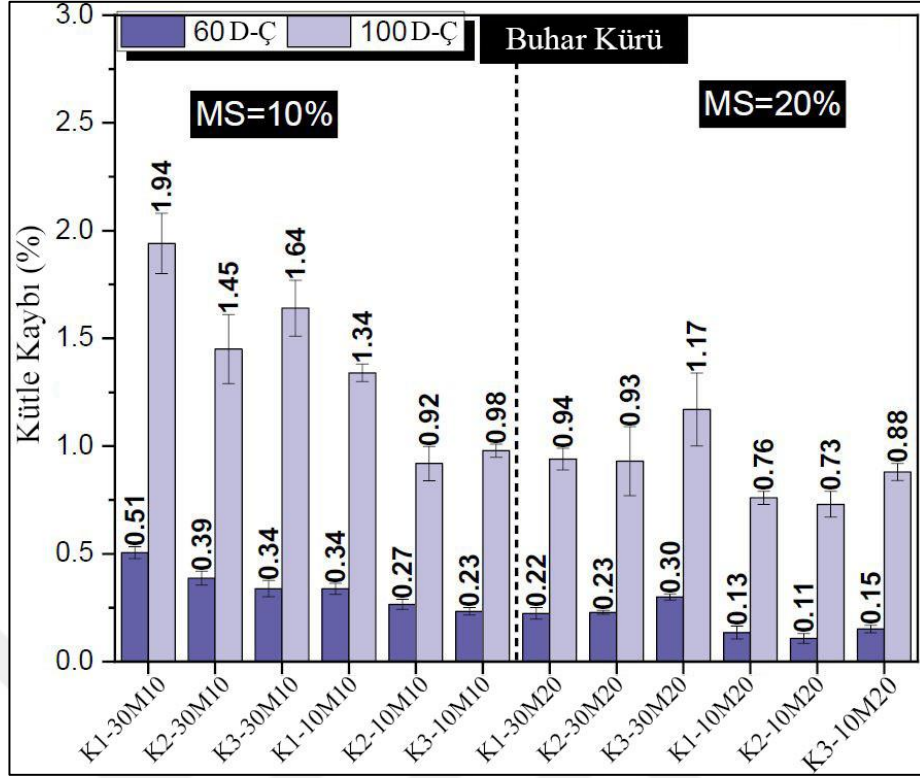
Şekil 4.22a, b ve c'de çimento klinker tipinin, etüv, su ve buhar kürü dahil kür yöntemlerinin ve aktivatör dozajının 91 günde 60 ve 100 D-Ç döngüsüne maruz bırakılarak kürlenene AAHÇ karışımlarının ortalama kütle kaybı üzerindeki etkileri gösterilmektedir. D-Ç döngüleri arttıkça, tüm AACH karışımlarında kütle kaybı artmış ve 100 D-Ç döngüsünde tüm karışımların kütle kayıpları %2,39'un altında kalmıştır. 60 D-Ç döngüsünde, tüm karışımlarda %0,59'un altında çok düşük kütle kaybı olmuştur. Artan D-Ç döngüleri veya donma sıcaklığındaki düşüş, numunedeki pH değerinin düşmesine neden olur ve bu da karışımların basınç dayanımını düşürür. Yukarıda bahsedilen faktörler kütle kaybını ve gözenekliliği artırır, bu da numunenin yüzeyinin gözle görülür şekilde soyulması ve çok sayıda çatlak ve gözenek oluşmasıyla kendini gösterir (Min vd., 2022). Şekil 4.22'ten, kürlenme rejimlerinden bağımsız olarak YFC/K oranı 70/30 olan karışımlarda YFC/K oranı 90/10 olan karışımlara kıyasla genellikle daha fazla kütle kaybı elde edildiği çok açıktır. En düşük kütle kaybı YFC/K3 oranı 90/10 olan ve 100 D-Ç döngüsünden sonra %10MS ile aktive edilen su ile kürlenene karışım için gözlenmiştir. Öte yandan, en yüksek kütle kaybı YFC/K2 oranı 70/30 olan ve %10MS ile aktive edilen etüvde kürlenene karışım için gözlenmiştir. Beklendiği gibi, Şekil 4.22a, b ve c'de gösterildiği gibi, %20MS ile aktive edilen karışımlar için %10MS ile aktive edilen ilgili karışımlara kıyasla genel olarak daha düşük kütle kaybı tespit edilmiştir.



a)



b)



c)

Şekil 4.22 Klinker tipinin, kütleme rejimlerinin ve MS içeriğinin D-Ç döngülerindeki kütle kaybı üzerindeki etkisi (a, b, c)

5. SONUÇLAR

Çimento klinker tipi, kür tipi ve aktivatör dozajının tek parçalı alkali ile aktive edilmiş hibrit YFC/K klinker kompozitlerinin (AAHÇ) taze, mekanik, dayanıklılık ve mikroyapı özellikleri üzerindeki etkisi bu çalışmada incelenmiştir ve bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak aşağıdaki sonuçlara varmak mümkündür:

- %10MS ile aktive edilen AAHÇ karışımları için işlenebilirlik (yayılma çapı) klinker türüne göre değişmiştir. En düşük çökme K1 kodlu klinker tipine sahip AAHÇ karışımı için, en yüksek çökme ise 70/30 ve 90/10 YFC/Klinker (K) oranlarının her ikisinde de K3 kodlu klinker tipine sahip AAHÇ karışımı için ölçülmüştür. Tüm tiplerde düşük klinker içeriği içeren AAHÇ karışımları için daha yüksek akış değerleri belirlenmiştir.
- %10MS içeren AAHÇ karışımlarının minimum başlangıç ve maksimum nihai priz süreleri sırasıyla 44 ve 217 dakika olmuştur. En düşük ve en yüksek priz süreleri %10 ve %90 YFC içeren AAHÇ karışımları için ölçülmüştür. Klinker tipi K1 olan karışım, daha düşük C₃S içeriği nedeniyle en yüksek nihai prizi gösterirken, klinker tipi K2 olan karışım en düşük başlangıç prizini göstermektedir. Daha yüksek alkali dozajı olan %20MS içeren AAHÇ karışımları, %10MS içeren karışımlara kıyasla daha düşük başlangıç ve son priz göstermektedir.
- Sonuçlar, %10MS ile aktive edilen suda kürlen karışımların, %10MS ile aktive edilen etüvde kürlen karışımlara kıyasla daha iyi basınç dayanımı performansına sahip olduğunu doğrulamıştır. Şekil 4.2b'de gösterildiği gibi %20MS ile aktive edilen su ile kürlen AAHÇ karışımları göz önüne alındığında, tüm karışımlar, özellikle 91 günlük daha geç yaşlarda, etüvde kürlen karışımlara kıyasla en yüksek basınç dayanımı sonuçlarını sergilemiştir.
- Üç kür türüne maruz kalan AAHÇ karışımlarının tüm basınç dayanımı sonuçları dikkate alındığında, su ve buhar kürü en yüksek basınç dayanımına neden olmuştur.

- %10MS veya %20MS ile aktive edilen su ile kürlenene AAHÇ karışımları, basınç dayanımı durumunda da gözlemlendiği gibi, kür tipinden bağımsız olarak tüm karışımlar arasında en yüksek eğilme dayanımını ortaya çıkarmıştır.
- 90 günlük yaşta, su ile kürlenene AAHÇ numunelerinde ölçülen minimum kuruma büzülmesi 1467 µε olurken, buhar ile kürlenene AAHÇ numunelerinde kaydedilen maksimum kuruma büzülmesi 2021 µε olmuştur.
- En düşük ASR genişmesi de YFC/K2 oranı 90/10 olan ve %10MS ile aktive edilen buharla kürlenene karışım için ölçülmüştür.
- Kütleme rejimleri dikkate alındığında, sonuçlar su ile kürlenemenin tüm karışımlar arasında ASR genişmesi üzerinde en iyi etkiye sahip olduğunu doğrulamıştır.
- Sülfata maruz kalma için en iyi kür tipi buharla kütleme olmuştur çünkü tüm karışımların genişmesi 3422 µε'nin altında kalmıştır. Öte yandan, sülfat saldırısı nedeniyle en yüksek genişleme, %10MS ile aktive edilen %30 daha yüksek klinker içeriğine sahip (YFC/K oranı 70/30) etüv kürlü karışımlarda görülmüştür.
- Kür tipinin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı üzerindeki etkisi dikkate alındığında, 800°C sonrası en iyi yüksek sıcaklık performansı YFC/K oranı 90/10 olan ve %10MS ile aktive edilen ısıyla kürlenene karışımlar için elde edilirken, 90/10 YFC/K3 oranına ve %20 MS içeriğine sahip suyla kürlenene karışımlar, kür tipinden bağımsız olarak tüm karışımlar arasında 800°C sonrası en kötü yüksek sıcaklık performansını göstermiştir.
- YFC/K2 oranı 90/10 olan ve %10MS ile aktive edilen, YFC/K1ve YFC/K2 oranları 70/30 olan ve YFC/K2 oranı 90/10 olan ve %20MS ile aktive edilen üç buhar kürlü karışım 60 ve 100 D-Ç döngüsünde dayanım artışı göstermiştir. Buharla kürlenene karışımlarda en kötü D-Ç direnci, 60 ve 100 D-Ç döngüsünde sırasıyla %13,47 ve %22,85'lik en yüksek dayanım kaybıyla YFC/K1 oranı 90/10 olan ve %10MS ile aktive edilen karışım için gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Abdollahnejad, Z., Mastali, M., Woof, B., & Illikainen, M. (2020). High strength fiber reinforced one-part alkali activated slag/fly ash binders with ceramic aggregates: Microscopic analysis, mechanical properties, drying shrinkage, and freeze-thaw resistance. *Construction and building materials*, 241, 118129.
- Aiken, T. A., Sha, W., Kwasny, J., & Soutsos, M. N. (2017). Resistance of geopolymer and Portland cement based systems to silage effluent attack. *Cement and Concrete Research*, 92, 56-65.
- Akan, İ. E. (2019). *Çanakkale-Ayvacık bölgesinde bulunan volkanik tüfün katkı çimento üretiminde kullanılabilirliğinin incelenmesi* [Master's Thesis]. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Akçansa. (2004). *Çimentonun hidratasyonu Heidelberg Cement Teknik Notlar 3, Ders Notları, İstanbul, Türkiye*.
- Amer, I., Kohail, M., El-Feky, M., Rashad, A., & Khalaf, M. A. (2021). Characterization of alkali-activated hybrid slag/cement concrete. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 135-144.
- Angulo-Ramírez, D. E., de Gutiérrez, R. M., & Medeiros, M. (2018). Alkali-activated Portland blast furnace slag cement mortars: Performance to alkali-aggregate reaction. *Construction and building materials*, 179, 49-56.
- Askarian, M., Tao, Z., Adam, G., & Samali, B. (2018). Mechanical properties of ambient cured one-part hybrid OPC-geopolymer concrete. *Construction and building materials*, 186, 330-337.
- ASTM C1260. (2014). *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)*. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA,.
- Atar, N. (2006). "Suda çözünen polimerlerin çimento ve beton özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi," [Yüksek Lisans Tezi]. Dumlupınar Üniversitesi.
- Awoyera, P., & Adesina, A. (2020). *Durability properties of alkali activated slag composites: Short overview*. Springer.
- Aydın, M. (2019). *Kalsiyum alüminat çimentosu ile portland çimentosunun karşılaştırılması* [Master's Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bakharev, T. (2005). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and concrete research*, 35(6), 1233-1246.
- Balun, B., & Karataş, M. (2021). Influence of curing conditions on pumice-based alkali activated composites incorporating Portland cement. *Journal of Building Engineering*, 43, 102605.

- Bayraktar, O. Y., Eshtewi, S. S. T., Benli, A., Kaplan, G., Toklu, K., & Gunek, F. (2021). The impact of RCA and fly ash on the mechanical and durability properties of polypropylene fibre-reinforced concrete exposed to freeze-thaw cycles and MgSO₄ with ANN modeling. *Construction and Building Materials*, 313, 125508.
- Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., & Benli, A. (2022). The effect of recycled fine aggregates treated as washed, less washed and unwashed on the mechanical and durability characteristics of concrete under MgSO₄ and freeze-thaw cycles. *Journal of Building Engineering*, 48, 103924.
- Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Gencel, O., Benli, A., & Sutcu, M. (2021). Physico-mechanical, durability and thermal properties of basalt fiber reinforced foamed concrete containing waste marble powder and slag. *Construction and Building Materials*, 288, 123128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123128>
- Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Shi, J., Benli, A., Bodur, B., & Turkoglu, M. (2023). The effect of steel fiber aspect-ratio and content on the fresh, flexural, and mechanical performance of concrete made with recycled fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 368, 130497. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130497>
- Bayraktar, O. Y., Soylemez, H., Kaplan, G., Benli, A., Gencel, O., & Turkoglu, M. (2021). Effect of cement dosage and waste tire rubber on the mechanical, transport and abrasion characteristics of foam concretes subjected to H₂SO₄ and freeze-thaw. *Construction and Building Materials*, 302, 124229. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124229>
- Bayraktar, O. Y., Tobbala, D. E., Turkoglu, M., Kaplan, G., & Tayeh, B. A. (2023). Hemp fiber reinforced one-part alkali-activated composites with expanded perlite: Mechanical properties, microstructure analysis and high-temperature resistance. *Construction and Building Materials*, 363, 129716. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129716>
- Benli, A. (2019). Mechanical and durability properties of self-compacting mortars containing binary and ternary mixes of fly ash and silica fume. *Structural Concrete*, 20(3), 1096-1108. <https://doi.org/10.1002/suco.201800302>
- Bernal, S. A., & Provis, J. L. (2014). Durability of alkali-activated materials: Progress and perspectives. *Journal of the American Ceramic Society*, 97(4), 997-1008.
- Bilim, C., & Atiş, C. D. (2012). Alkali activation of mortars containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 28(1), 708-712.
- Brough, A. R., & Atkinson, A. (2002). Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars: Part I. Strength, hydration and microstructure. *Cement and concrete research*, 32(6), 865-879.
- Brough, A. R., Katz, A., Sun, G.-K., Struble, L. J., Kirkpatrick, R. J., & Young, J. F. (2001). Adiabatically cured, alkali-activated cement-based wasteforms

- containing high levels of fly ash: Formation of zeolites and Al-substituted CSH. *Cement and concrete research*, 31(10), 1437-1447.
- Burciaga-Díaz, O., & Escalante-García, J. I. (2017). Comparative performance of alkali activated slag/metakaolin cement pastes exposed to high temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 84, 157-166.
- Cai, R., & Ye, H. (2021). Clinkerless ultra-high strength concrete based on alkali-activated slag at high temperatures. *Cement and Concrete Research*, 145, 106465.
- Chang, J.-J. (2003). A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes. *Cement and Concrete Research*, 33(7), 1005-1011.
- Chen, H., Yuan, H., Mao, L., Hashmi, M. Z., Xu, F., & Tang, X. (2020). Stabilization/solidification of chromium-bearing electroplating sludge with alkali-activated slag binders. *Chemosphere*, 240, 124885.
- Colangelo, F., Cioffi, R., Roviello, G., Capasso, I., Caputo, D., Aprea, P., Liguori, B., & Ferone, C. (2017). Thermal cycling stability of fly ash based geopolymer mortars. *Composites part b: engineering*, 129, 11-17.
- Collins, F., & Sanjayan, J. G. (2000). Effect of pore size distribution on drying shrinking of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1401-1406.
- Coppola, L., Coffetti, D., Crotti, E., Dell'Aversano, R., & Gazzaniga, G. (2019). The influence of heat and steam curing on the properties of one-part fly ash/slag alkali activated materials: Preliminary results. *AIP Conference Proceedings*, 2196(1), 020038.
- Çavuş, B. Ç. (2008). *Çimento harcında yüksek fırın cürufunun basınç dayanımına etkisi* [Yüksek Lisans Tezi]. Gazi Üniversitesi.
- Dayı, M. (2006). *Doğal ve yapay puzolanların kompoze çimento üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.* https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=YJQQh7_bkFrBBW Kjp7X65Q&no=O4_wLNV3d3QRPGbPiXkGmg
- Dener, M., Karatas, M., & Mohabbi, M. (2021). Sulfate resistance of alkali-activated slag/Portland cement mortar produced with lightweight pumice aggregate. *Construction and Building Materials*, 304, 124671.
- Dombrowski, K., Buchwald, A., & Weil, M. (2007). The influence of calcium content on the structure and thermal performance of fly ash based geopolymers. *Journal of Materials Science*, 42(9), 3033-3043.
- DPT. (1996). *Çimento hammaddeleri ve yapı malzemeleri: Madencilik özel ihtisas komisyonu endüstriyel hammaddeler alt komisyonu çimento hammaddeleri ve yapı malzemeleri çalışma grubu raporu*. Devlet Planlama Teşkilatı.

- DPT. (2001). *Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik (Endüstriyel Hammaddeler: Toprak Sanayi Hammaddeleri) IV Özel İhtisas Komisyonu Raporu*. Devlet Planlama Teşkilatı.
- Duchesne, J., & Reardon, E. (1995). Measurement and prediction of portlandite solubility in alkali solutions. *Cement and Concrete Research*, 25(5), 1043-1053.
- El-Hassan, H., Shehab, E., & Al-Sallamin, A. (2018). Influence of different curing regimes on the performance and microstructure of alkali-activated slag concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(9), 04018230.
- El-Yamany, H. E., El-Salamawy, M. A., & El-Assal, N. T. (2018). Microstructure and mechanical properties of alkali-activated slag mortar modified with latex. *Construction and Building Materials*, 191, 32-38.
- Erdoğan, T. Y. (2013). *Beton* (4. bs). Orta Doğu Teknik Üniversitesi Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.
- Erdoğan, E. (2006). *Çimentoya bor katkısı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ilavesiyle özelliklerinin incelenmesi*. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Fernández-Jiménez, A., García-Lodeiro, I., Donatello, S., Maltseva, O., & Palomo, A. (2014). Specific examples of hybrid alkaline cement. *MATEC Web of Conferences*, 11, 01001.
- Garcia-Lodeiro, I., Fernandez-Jimenez, A., & Palomo, A. (2013). Hydration kinetics in hybrid binders: Early reaction stages. *Cement and Concrete Composites*, 39, 82-92.
- García-Lodeiro, I., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2013). Variation in hybrid cements over time. Alkaline activation of fly ash–portland cement blends. *Cement and concrete research*, 52, 112-122.
- García-Lodeiro, I., Maltseva, O., Palomo, A., & Fernández-Jiménez, A. (2012). Hybrid alkaline cements. Part I: Fundamentals. *Revista Romana de Materiale/Romanian Journal of Materials*, 42, 330-335.
- Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., & Fernández-Jiménez, A. (2015). An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders. *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*, 19-47.
- Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., & Macphee, D. E. (2011). Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram Na₂O–CaO–Al₂O₃–SiO₂–H₂O. *Cement and Concrete Research*, 41(9), 923-931. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.006>
- Gencil, O., Benli, A., Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Sutcu, M., & Elabade, W. A. T. (2021). Effect of waste marble powder and rice husk ash on the microstructural, physico-mechanical and transport properties of foam concretes exposed to high

- temperatures and freeze–thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 291, 123374. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123374>
- Gencil, O., Nodehi, M., Yavuz Bayraktar, O., Kaplan, G., Benli, A., Koksall, F., Bilir, T., Siddique, R., & Ozbakkaloglu, T. (2022). The use of waste marble for cleaner production of structural concrete: A comprehensive experimental study. *Construction and Building Materials*, 361, 129612. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129612>
- Gifford, P., & Gillott, J. (1996). Alkali-silica reaction (ASR) and alkali-carbonate reaction (ACR) in activated blast furnace slag cement (ABFSC) concrete. *Cement and concrete research*, 26(1), 21-26.
- Gündeşli, U. (2008). *Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun beton ve çimento katkısı olarak kullanımı üzerine bir kaynak taraması, Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye*. <https://docplayer.biz.tr/16227573-Cukurova-universitesi-fen-bilimleri-enstitusu.html>
- Hajimohammadi, A., Ngo, T., & Kashani, A. (2018). Sustainable one-part geopolymers foams with glass fines versus sand as aggregates. *Construction and Building Materials*, 171, 223-231.
- Hajimohammadi, A., Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. (2008). One-part geopolymer mixes from geothermal silica and sodium aluminate. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47(23), 9396-9405.
- Hojati, M., Rajabipour, F., & Radlińska, A. (2019). Drying shrinkage of alkali-activated cements: Effect of humidity and curing temperature. *Materials and Structures*, 52(6), 1-14.
- Hu, M., Zhu, X., & Long, F. (2009). Alkali-activated fly ash-based geopolymers with zeolite or bentonite as additives. *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 762-768.
- Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., San Nicolas, R., Hamdan, S., & van Deventer, J. S. (2014). Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 45, 125-135.
- Jamieson, E., McLellan, B., Van Riessen, A., & Nikraz, H. (2015). Comparison of embodied energies of Ordinary Portland Cement with Bayer-derived geopolymer products. *Journal of Cleaner Production*, 99, 112-118.
- Jindal, B. B. (2019). Investigations on the properties of geopolymer mortar and concrete with mineral admixtures: A review. *Construction and building materials*, 227, 116644.
- Karakaş, F. (2006). *Çimento hammaddelerinin öğütülmesinde enerji optimizasyonu* [PhD Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Kazan, R., & Kılıç, R. (2016). Çimento Endüstrisinde Harmanlama Prosesinin Tanımlanması. *Sakarya University Journal of Science*, 1(1), 59-62.
- Koçak, Y. (2008). “Çimento-puzolan etkileşiminde molüküler ve elektrokinetik davranışların araştırılması,” Doktora tezi, Yapı Eğitim, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye,. <https://docplayer.biz.tr/57274994-Cimento-puzolan-etkilesiminde-molekuler-ve-elektrokinetik-davranislarin-arastirilmasi-yilmaz-kocak-doktora-tezi-yapi-egitimi.html>
- Koksal, F., Bayraktar, O. Y., Bodur, B., Benli, A., & Kaplan, G. (2022). Insulating and fire-resistant performance of slag and brick powder based one-part alkali-activated lightweight mortars. *Structural Concrete*, n/a(n/a). <https://doi.org/10.1002/suco.202200607>
- Korkmaz, A. V. (2019). ÇİMENTO ÜRETİMİNDE KİL HAM MADDESİNE ALTERNATİF OLARAK ÇAMURTAŞININ KULLANILABİLİRLİĞİ. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 58(1), 7-15.
- Kula, İ. (2000). *Bor endüstrisi atıklarının çimento üretiminde katkı maddesi olarak değerlendirilmesi*.
- L'Hôpital, E., Lothenbach, B., Kulik, D., & Scrivener, K. (2016). Influence of calcium to silica ratio on aluminium uptake in calcium silicate hydrate. *Cement and Concrete Research*, 85, 111-121.
- Li, C., Sun, H., & Li, L. (2010). A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+ Ca) and metakaolin (Si+ Al) cements. *Cement and concrete research*, 40(9), 1341-1349.
- Lim, Y. Y., & Pham, T. M. (2021). Influence of Portland cement on performance of fine rice husk ash geopolymer concrete: Strength and permeability properties. *Construction and Building Materials*, 300, 124321.
- Martinez-Ramirez, S., & Palomo, A. (2001). OPC hydration with highly alkaline solutions. *Advances in cement research*, 13(3), 123-129.
- Mehta, A., & Siddique, R. (2017). Strength, permeability and micro-structural characteristics of low-calcium fly ash based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 141, 325-334.
- Min, Y., Wu, J., Li, B., Zhang, M., & Zhang, J. (2022). Experimental study of freeze–thaw resistance of a one-part geopolymer paste. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01269.
- Mohapatra, A. K., & Pradhan, B. (2022). Hybrid alkali activated cements (HAACs) system: A state-of-the-art review on fresh, mechanical, and durability behaviour. *Construction and Building Materials*, 361, 129636.
- Mumcu, U. (2005). Çimento üretimindeki istikrarlı hammadde bileşiminin sağlanması, kalite ve verimliliğin artırılması. *Çimento ve Beton Dünyası*, 45-49.

- Nas, S. (2012). *Portland çimento ve uçucu kül ikameli çimentoların hidrasyon gelişimleri ile fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin araştırılması* [Master's Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Nath, P., & Sarker, P. K. (2015). Use of OPC to improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Cement and concrete composites*, 55, 205-214.
- Neto, A. A. M., Cincotto, M. A., & Repette, W. (2008). Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement. *Cement and Concrete Research*, 38(4), 565-574.
- Niş, A., & Altındal, İ. (2021). Compressive strength performance of alkali activated concretes under different curing conditions. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(2), 556-565.
- Oytaç, Z. E. (2012). *Karbonatlı Killerin Duvar ve Yer Karosunda Kullanımı ve Isıl Davranışlarının İncelenmesi* [PhD Thesis]. Anadolu University (Turkey).
- Özcan, A., & Karakoç, M. B. (2019). Evaluation of sulfate and salt resistance of ferrochrome slag and blast furnace slag-based geopolymer concretes. *Structural Concrete*, 20(5), 1607-1621.
- Özdemir, İ. (2020). *Pirinç kabuğu külü ikameli çimento harçlarının hidrasyon gelişiminin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması* [Master's Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özgür, S. (1996). *Türkiye çimento sanayii ve üretilen çimento türleri* [Master's Thesis]. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özmal, F. (2005). Bor endüstri atıkları, uçucu kül, taban külü ve alünit mineralinin çimento üretiminde katkı maddesi olarak değerlendirilmesi. *DP Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya*.
- Pacheco-Torgal, F., Ding, Y., & Jalali, S. (2012). Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview. *Construction and Building Materials*, 30, 714-724. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.047>
- Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., Kovalchuk, G., Ordoñez, L. M., & Naranjo, M. C. (2007). OPC-fly ash cementitious systems: Study of gel binders produced during alkaline hydration. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2958-2966.
- Rafeet, A., Vinai, R., Soutsos, M., & Sha, W. (2019). Effects of slag substitution on physical and mechanical properties of fly ash-based alkali activated binders (AABs). *Cement and Concrete Research*, 122, 118-135. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.003>
- Ravikumar, D., Peethamparan, S., & Neithalath, N. (2010). Structure and strength of NaOH activated concretes containing fly ash or GGBFS as the sole binder. *Cement and Concrete composites*, 32(6), 399-410.

- Ren, D., Yan, C., Duan, P., Zhang, Z., Li, L., & Yan, Z. (2017). Durability performances of wollastonite, tremolite and basalt fiber-reinforced metakaolin geopolymer composites under sulfate and chloride attack. *Construction and Building Materials*, 134, 56-66.
- Rovnaník, P., Bayer, P., & Rovnaníková, P. (2013). Characterization of alkali activated slag paste after exposure to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 47, 1479-1487.
- Sadeghian, G., Behfarnia, K., & Teymouri, M. (2022). Drying shrinkage of one-part alkali-activated slag concrete. *Journal of Building Engineering*, 51, 104263.
- Sasui, S., Kim, G., Nam, J., van Riessen, A., & Hadzima-Nyarko, M. (2021). Effects of waste glass as a sand replacement on the strength and durability of fly ash/GGBS based alkali activated mortar. *Ceramics International*, 47(15), 21175-21196.
- Sedaghatdoost, A., Behfarnia, K., Bayati, M., & sadegh Vaezi, M. (2019). Influence of recycled concrete aggregates on alkali-activated slag mortar exposed to elevated temperatures. *Journal of Building Engineering*, 26, 100871.
- Shi, C., Jiménez, A. F., & Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and concrete research*, 41(7), 750-763.
- Singh, M., & Siddique, R. (2014). Compressive strength, drying shrinkage and chemical resistance of concrete incorporating coal bottom ash as partial or total replacement of sand. *Construction and Building Materials*, 68, 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.034>
- Škvára, F., Kopecký, L., Šmilauer, V., & Bittnar, Z. (2009). Material and structural characterization of alkali activated low-calcium brown coal fly ash. *Journal of hazardous materials*, 168(2-3), 711-720.
- Song, Q., Guo, M.-Z., & Ling, T.-C. (2022). A review of elevated-temperature properties of alternative binders: Supplementary cementitious materials and alkali-activated materials. *Construction and Building Materials*, 341, 127894.
- Suwan, T., & Fan, M. (2014). Influence of OPC replacement and manufacturing procedures on the properties of self-cured geopolymer. *Construction and Building Materials*, 73, 551-561.
- Targan, Ş. (2002). *Kula cürufu, betonit, kül ve kolemanit atıklarının çimento üretiminde değerlendirilmesi.*
- TS EN 197-1. (2012). *Genel çimentolar-bileşim, özellikleri ve uygunluk kriterleri Çimento- Bölüm 1.*
- URL-1. (2022). *Çimento Üretiminin Tarihçesi.* (2022, 23 Aralık). https://www.turkcimento.org.tr/tr/cimento_uretiminin_tarihcesi.

- URL-2. (2022). *Türkiye Çimento İstatistikleri*.
<https://www.betonvecimento.com/cimento/turkiye-cimento-istatistikleri-2019>
- URL-3. (2022). *Çimento Fazları ve Etkileri (2022 13 Aralık)*.
<https://www.cimsa.com.tr/ca/docs/71DDECEE521E470BA4ADA95A091840/08A3F1686F434950A997270398A76C51.pdf>.
- Way, S., & Shayan, A. (1989). Early hydration of a Portland cement in water and sodium hydroxide solutions: Composition of solutions and nature of solid phases. *Cement and Concrete Research*, 19(5), 759-769.
- Xie, J., Wang, J., Rao, R., Wang, C., & Fang, C. (2019). Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled aggregate. *Composites Part B: Engineering*, 164, 179-190.
- Xue, L., Zhang, Z., Liu, H., Jiang, Y., & Wang, H. (2022). Drying shrinkage behavior of hybrid alkali activated cement (HAAC) mortars. *Construction and Building Materials*, 316, 126068.
- Xue, L., Zhang, Z., & Wang, H. (2021a). Early hydration kinetics and microstructure development of hybrid alkali activated cements (HAACs) at room temperature. *Cement and Concrete Composites*, 123, 104200.
- Xue, L., Zhang, Z., & Wang, H. (2021b). Hydration mechanisms and durability of hybrid alkaline cements (HACs): A review. *Construction and Building Materials*, 266, 121039.
- Yadollahi, M. M., & Benli, A. (2017). Stress-strain behavior of geopolymer under uniaxial compression. *Computers and Concrete*, 20(4), 381-389.
- Yadollahi, M. M., Benli, A., & Demirboga, R. (2017). Application of adaptive neuro-fuzzy technique and regression models to predict the compressive strength of geopolymer composites. *Neural Computing and Applications*, 28(6), 1453-1461.
- Yadollahi, M. M., Benli, A., & Demirboğa, R. (2015a). Effects of elevated temperature on pumice based geopolymer composites. *Plastics, Rubber and Composites*, 44(6), 226-237.
- Yadollahi, M. M., Benli, A., & Demirboğa, R. (2015b). The effects of silica modulus and aging on compressive strength of pumice-based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 94, 767-774.
- Yalçın, H., & Gürü, M. (2006). *Çimento ve Beton*. Palme Yayıncılık.
- Yang, K., Yang, C., Magee, B., Nanukuttan, S., & Ye, J. (2016). Establishment of a preconditioning regime for air permeability and sorptivity of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Composites*, 73, 19-28.
- Yaras, A., Ustaoglu, A., Gencel, O., Sarı, A., Hekimoğlu, G., Sutcu, M., Erdogmus, E., Kaplan, G., & Bayraktar, O. Y. (2022). Characteristics, energy saving and

carbon emission reduction potential of gypsum wallboard containing phase change material. *Journal of Energy Storage*, 55, 105685. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105685>

Yeğinoğlu, A. (2003). *Çimento Yeni Bir Çağın Malzemesi* (2. bs, ss. 11-14). Ankara, Türkiye: Demo Yayınevi.

Yıldırım, F. (2007). 'Puzolanik zeolitin çimentoda katkı uygunluğunun araştırılması. *Y. Lisans tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay*, 45-75.

Yip, C. K., Lukey, G., & Van Deventer, J. S. (2005). The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. *Cement and concrete research*, 35(9), 1688-1697.

You-zhi, C., Xin-cheng, P., Chang-hui, Y., & Qing-jun, D. (2002). Alkali aggregate reaction in alkali slag cement mortars. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 17(3), 60-62.

Zhang, J., Shi, C., Zhang, Z., & Ou, Z. (2017). Durability of alkali-activated materials in aggressive environments: A review on recent studies. *Construction and Building Materials*, 152, 598-613.