

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ CÜRUF HARÇLARINDA
AKTİVATÖR TİPİ VE ALKALİ DOZAJININ
ALKALİ SİLİKA REAKSİYONUNA ETKİLERİ**

**Hazırlayan
Yusuf GÖKŞEN**

**Danışman
Prof. Dr. Okan KARAHAN**

Doktora Tezi

**Haziran 2025
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ CÜRUF HARÇLARINDA
AKTİVATÖR TİPİ VE ALKALİ DOZAJININ
ALKALİ SİLİKA REAKSİYONUNA ETKİLERİ
(Doktora Tezi)**

**Hazırlayan
Yusuf GÖKŞEN**

**Danışman
Prof. Dr. Okan KARAHAHAN**

**Haziran 2025
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Yusuf GÖKŞEN

İmza

“Alkali İle Aktive Edilmiş Cüruf Harçlarında Aktivatör Tipi ve Alkali Dozajının Alkali Silika Reaksiyonuna Etkileri” adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Yusuf GÖKŞEN

İmza

Danışman

Prof. Dr. Okan KARAHAN

İmza

İnşaat Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Zülküf KAYA

İmza

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen, bilimsel çalışma söz konusu olduğunda zaman kavramını bir kenara bırakıp akademik bakış açısını bana aşıl原因 ve pozitif kişiliği ile çalışmalarımın devamlılığını sağlayan sayın Prof. Dr. Okan KARAHAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarım sırasında karşılaştığım zorlukları aşmamda yardımlarından dolayı Doç. Dr. Serhan İLKENTAPAR'a, yoğun deneysel çalışmalarımda yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Doç. Dr. Uğur DURAK'a ve desteklerinden dolayı Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ hocamıza teşekkür ederim.

Ayrıca, çalışma hayatımda her zaman bana gönülden destek olan kıymetli eşim Özlem GÖKŞEN ve varlıklarıyla destek olan kızlarım İpek GÖKŞEN ile Defne GÖKŞEN'e, doğumumdan bugüne üstün özveri ve fedakarlıklarla beni yetiştiren annem ile babama sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Yusuf GÖKŞEN

Haziran 2025, KAYSERİ

ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ CÜRUF HARÇLARINDA AKTİVATÖR TİPİ VE ALKALİ DOZAJININ ALKALİ SİLİKA REAKSİYONUNA ETKİLERİ

Yusuf GÖKŞEN

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Haziran 2025
Danışman: Prof. Dr. Okan KARAHAN

ÖZET

Bu tez çalışmasında, yüksek fırın cürufu esaslı alkali ile aktive edilmiş harç sistemlerinde, farklı tipte aktivatörler (sodyum metasilikat, sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksit) ve üç farklı sodyum (Na^+) oranı (%6, %8 ve %10) kullanılarak alkali-silika reaksiyonunun etkileri araştırılmıştır. Deneylerde, Nevşehir ili sınırlarından geçen Kızılırmak Nehri kenarında bulunan iki farklı kum yıkama ve eleme tesisinden temin edilen ve yüksek reaktif silis içeriğine sahip doğal agregalar kullanılmış; referans karşılaştırma amacıyla Portland çimentosu ile üretilmiş harçlar değerlendirilmiştir. Hazırlanan harç numuneleri üzerinde işlenebilirlik, birim hacim ağırlık, su emme ve boşluk oranı, eğilme ve basınç dayanımı, ultrasonik atımlı dalga hızı, kılcal su emme katsayısı ve hızlandırılmış harç çubuğu deneyi (ASTM C1260) gerçekleştirilmiştir. Ayrıca içyapı karakterizasyonu amacıyla SEM ve XRD gibi analiz yöntemleri kullanılmıştır.

Çalışma sonucunda, tüm aktivatör türleri ve sodyum oranları için alkali ile aktive edilen sistemlerde harç çubuklarının alkali silika reaksiyonu kaynaklı boyca genleşmelerinin sınır değerlerinin altında kaldığı ve Portland çimentosu esaslı harçlara kıyasla daha düşük genleşme gösterdiği belirlenmiştir. En düşük genleşme, sıvı sodyum silikat ile aktive edilen ve %10 Na^+ içeren sistemde elde edilmiştir. Bu bulgular, uygun aktivatör tipi ve sodyum içeriği ile birlikte kullanıldığında, cüruf esaslı alkali ile aktive harçların alkali-silika reaksiyonuna karşı daha dirençli ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir alternatif yapı malzemesi olabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Alkali aktivasyon, alkali silika reaksiyonu, yüksek fırın cürufu

EFFECTS OF ACTIVATOR TYPE AND ALKALI DOSAGE ON ALKALI SILICA REACTION IN ALKALI ACTIVATED SLAG MORTARS

Yusuf GÖKŞEN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

PhD Thesis, June 2025

Supervisor: Professor Doctor Okan KARAHAN

ABSTRACT

In this thesis study, the effects of alkali-silica reaction were investigated in slag-based alkali-activated mortar systems produced using different types of activators (sodium metasilicate, liquid sodium silicate, and sodium hydroxide) and three different sodium (Na^+) contents (6%, 8%, and 10%). In the experiments, natural aggregates with high reactive silica content were obtained from two different sand washing and screening plants located along the Kızılırmak River within the borders of Nevşehir province. For comparison purposes, mortars produced with Portland cement were used as the reference system. Various tests were performed on the prepared mortar specimens, including workability, unit weight, water absorption and porosity, flexural and compressive strength, ultrasonic pulse velocity, capillary water absorption coefficient, and accelerated mortar bar test (ASTM C1260). In addition, internal structure characterization was carried out using SEM and XRD analysis techniques.

As a result of the study, it was determined that, for all types of activators and sodium contents, the length expansions of alkali-activated mortar bars due to alkali-silica reaction remained below the threshold limits and were lower than those of the reference mortars produced with Portland cement. The lowest expansion value was observed in the system activated with liquid sodium silicate containing 10% Na^+ . These findings indicate that slag-based alkali-activated mortars, when used with an appropriate activator type and sodium content, can offer enhanced resistance against alkali-silica reaction and may serve as a more environmentally sustainable alternative construction material.

Keywords: Alkali activation, alkali silica reaction, blast furnace slag

İÇİNDEKİLER

ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ CÜRUF HARÇLARINDA AKTİVATÖR TİPİ VE ALKALİ DOZAJININ ALKALİ SİLİKA REAKSİYONUNA ETKİLERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK	iii
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	xii
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİLLER LİSTESİ	xv
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR TARAMASI

1.1. Alkali Agrega Reaksiyonları	4
1.1.1. Alkali-Karbonat Reaksiyonu.....	4
1.1.2. Alkali Silika Reaksiyonu	5
1.1.2.1. Alkali Silika Reaksiyonu Mekanizması.....	7
1.1.2.2. Alkali Silika Reaksiyonunun Kimyası.....	13
1.2. Yüksek Fırın Cürufu.....	14
1.2.1. Yüksek Fırın Cürufu Üretim Aşamaları	15
1.2.2. Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	18
1.3. Alkali Aktivasyonu.....	21
1.3.1. Alkali Aktivasyon Süreci	24

1.3.2. Alkali Aktivasyon Kimyası.....	25
1.4. Literatür Taraması	28

2. BÖLÜM

YÖNTEM ve MATERYAL

2.1. Malzemeler.....	41
2.1.1. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu.....	41
2.1.2. Çimento	42
2.1.3. Reaktif Agregat	43
2.1.4. Aktivatörler.....	46
2.1.5. Su.....	50
2.2. Deneylerin Tasarımı.....	50
2.2.1. Dayanım Deneylerinin Tasarımı	51
2.2.2. Dayanıklılık Deneylerinin Tasarımı	52
2.3. Karışım Oranları	53
2.4. Harç Üretimi ve Kürlemesi	54
2.5. Deney Yöntemleri.....	57
2.5.1. İşlenebilirlik Deneyi.....	57
2.5.2. Birim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deneyi.....	58
2.5.3. Su Emme ve Boşluk Oranı Tayini	60
2.5.4. Eğilme Dayanımı Deneyi	61
2.5.5. Basınç Dayanımı Deneyi.....	62
2.5.6. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Tayini	63
2.5.7. Kılcal Su Emme Katsayısı Tayini.....	65
2.5.8. Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi.....	66
2.5.9. X Işını Kırınım Yöntemi.....	73
2.5.10. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu, Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDX) ve Element Haritalama Yöntemi.....	73

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. İşlenebilirlik Deney Sonuçları	75
3.2. Birim Hacim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deney Sonuçları.....	77
3.3. Su Emme ve Boşluk Oranı Deney Sonuçları.....	81
3.4. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları.....	84
3.5. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları	87
3.6. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Deney Sonuçları	89
3.7. Kılcal Su Emme Katsayısının Tayini Deney Sonuçları	91
3.8. Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deney Sonuçları	95
3.8.1. Sodyum Metasilikat ile Aktive Edilen Numunelerin Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deney Sonuçları	99
3.8.2. Sıvı Sodyum Silikat ile Aktive Edilen Numunelerin Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deney Sonuçları	101
3.8.3. Sodyum Hidroksit ile Aktive Edilen Numunelerin Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deney Sonuçları	103
3.9. X Işını Kırınım Yöntemi Sonuçları	106
3.10. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu, Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX) ve Element Haritalama Yöntemi Sonuçları.....	107
3.10.1. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu Sonuçları	107
3.10.2. Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDX) Sonuçları	109
3.10.3. Element Haritalama Yöntemi Sonuçları	112

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Tartışma ve Sonuçlar	116
4.1.1. İşlenebilirlik Deneyi ile İlgili Sonuçlar	116
4.1.2. Birim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deneyi ile İlgili Sonuçlar	117
4.1.3. Su Emme ve Boşluk Oranı Tayini ile İlgili Sonuçlar.....	118
4.1.4. Eğilme Dayanımı Deneyi ile İlgili Sonuçlar.....	119

4.1.5. Basınç Dayanımı Deneyi ile İlgili Sonuçlar	119
4.1.6. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Deneyi ile İlgili Sonuçlar	120
4.1.7. Kılcal Su Emme Katsayısının Tayini ile İlgili Sonuçlar	121
4.1.8. Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi ile İlgili Sonuçlar	122
4.1.9 X Işını Kırını Yöntemi ile İlgili Sonuçlar	124
4.1.10. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu, Enerji Dağılımlı X- Işını Spektroskopisi (EDX) ve Element Haritalama Yöntemi ile İlgili Sonuçlar	124
4.2. Öneriler	126
KAYNAKÇA	127
ÖZGEÇMİŞ	135

KISALTMALAR

ACR: Alkali Karbonat Reaksiyonu

ASR: Alkali Silika Reaksiyonu

ABD: Amerika Birleşik Devletleri

YFC: Yüksek Fırın Cürufu

Na₂O: Sodyum Oksit

K₂O: Potasyum Oksit

OH⁻: Hidroksil

SiO₂: Silisyum Dioksit

H₂O: Su

CaO: Kalsiyum Oksit

MgO: Magnezyum Oksit

Al₂O₃: Alüminyum Oksit

C₄AF: Tetrakalsiyum Alumino-ferrit

CO₂: Karbondioksit

CSH: Kalsiyum Silikat Hidrat

HMNS: Yüksek Magnezyum İçeren Nikel Cürufu

XRD: X Işını Kırınım Yöntemi

SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu

NBRI: Ulusal Botanik Araştırma Enstitüsü

XRD: X Işını kırınım yöntemi

FESEM: Alan taramalı elektron mikroskobu

EDX: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi

M: Molar



TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. Çeşitli bölgelerdeki cürufların kimyasal yapıları.....	18
Tablo 2. 2000 Yılına kadar alkali Aktivasyon gelişiminin tarihçesi.....	22
Tablo 3. 2000 Yılından sonra alkali Aktivasyon gelişiminin tarihçesi	23
Tablo 4. Türkiye'nin çeşitli yörelerinden alınan agregaların reaktivitesi	40
Tablo 5. Yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri	42
Tablo 6. Çimentonun fiziksel özellikleri	43
Tablo 7. Çimentonun kimyasal özellikleri.....	43
Tablo 8. ASTM C 1260 reaktif agrega gradasyonu.....	44
Tablo 9. Sodyum metasilikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri	47
Tablo 10. Sıvı sodyum silikatın kimyasal özellikleri	48
Tablo 11. Sodyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri	49
Tablo 12. Harç numunelerinin karışım oranları	54
Tablo 13. İşlenebilirlik deney sonuçları	75
Tablo 14. Numunelerin birim hacim ağırlık değerleri	78
Tablo 15. Numunelerin özgül ağırlık değerleri.....	79
Tablo 16. Numunelerin su emme oranı değerleri.....	81
Tablo 17. Numunelerin boşluk oranı değerleri	83
Tablo 18. Numunelerin eğilme dayanımı değerleri.....	85
Tablo 19. Numunelerin basınç dayanım değerleri	87
Tablo 20. Numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızı deney sonuçları	89
Tablo 21. Deney numunelerine ait kılcal su emme katsayıları.....	92
Tablo 22. Hızlandırılmış harç çubuğu deney sonuçları	97
Tablo 23. Sodyum metasilikatın hızlandırılmış harç çubuğu deney sonuçları	100
Tablo 24. Sıvı sodyum silikatın hızlandırılmış harç çubuğu deney sonuçları	102
Tablo 25. Sodyum hidroksitin hızlandırılmış harç çubuğu deney sonuçları	104
Tablo 26. 14 günlük numunelerin SEM görüntüleri.....	108

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Thomas Stanton ve ASR nedeniyle hasar gören köprü parapet duvarı	6
Şekil 2. Alkali silika reaksiyonu şeması	8
Şekil 3. ASR jelinin şişerek ilerleme ve sonuç şeması.....	10
Şekil 4. ASR kaynaklı tipik harita çatlağı.....	11
Şekil 5. Silika yapısı.....	13
Şekil 6. Hidroksil iyonlarının saldırısı nedeniyle silikanın çözünme mekanizması	14
Şekil 7. Çözünürlük denge eğrisi	14
Şekil 8. Yüksek fırında cüruf üretimi	16
Şekil 9. Cüruf üretim süreci.....	17
Şekil 10. Yüksek fırın içerisindeki reaksiyonlar.....	19
Şekil 11. Alkali aktive sistemlerin bileşenleri.....	24
Şekil 12. Alkali aktive malzemelerin basitleştirilmiş reaksiyon mekanizması	26
Şekil 13. Agreganın Kızılırmak nehir kenarından temini.....	44
Şekil 14. Reaktif agrega ve elek seti.....	45
Şekil 15. Agrega eleme işlemleri	45
Şekil 16. Reaktif agreganın boyutlarına göre ayrıştırılması	46
Şekil 17. Sodyum metasilikat	47
Şekil 18. Sıvı sodyum silikat	48
Şekil 19. Sodyum hidroksit (NaOH)	49
Şekil 20. Hobart mikseri.....	55
Şekil 21. Numune üretiminde kullanılan kalıplar	56
Şekil 22. Dayanım ve ASR numunelerine çözelti içerisinde ısıl kür işlemi	56
Şekil 23. Yayılma tablası ile işlenebilirlik deneyi	58
Şekil 24. Numunelerin kurutulması ve terazide tartılması	60
Şekil 25. Su içerisinde bekletilen numuneler ve Arşimet terazisi ölçümleri.....	61
Şekil 26. Eğilme dayanımı deneyi.....	62
Şekil 27. Basınç dayanımı deneyi	63
Şekil 28. Ultrasonik ses dalga hızı ölçüm deneyi	64
Şekil 29. Kılcal su emme deneyi.....	66
Şekil 30. ASR harç numunelerinin hazırlanması.....	69

<i>Şekil 31.</i> Harç çubuklarının kalıplara dökümü	69
<i>Şekil 32.</i> Harç çubuklarının saklama kaplarında ve numune kaplarında kürlenmesi	71
<i>Şekil 33.</i> Harç çubuklarının boyca uzamalarının komparatör yardımıyla ölçümü	71
<i>Şekil 34.</i> FESEM cihazı	74
<i>Şekil 35.</i> Taze harç numunelerinin işlenebilirlik değerleri.....	77
<i>Şekil 36.</i> Numunelerin birim ağırlık değerleri.....	78
<i>Şekil 37.</i> Numunelerin özgül ağırlık değerleri	80
<i>Şekil 38.</i> Numunelerin su emme oranı değerleri	82
<i>Şekil 39.</i> Numunelerin boşluk oranı değerleri.....	83
<i>Şekil 40.</i> Numunelerin eğilme dayanımı değerleri	85
<i>Şekil 41.</i> Numunelerin basınç dayanım değerleri	88
<i>Şekil 42.</i> Numunelerin ultrasonik atımlı ses hızı deney sonuçları	90
<i>Şekil 43.</i> 14 Günlük kılcal su emme katsayısı sonuçları	93
<i>Şekil 44.</i> 28 Günlük kılcal su emme katsayısı sonuçları	95
<i>Şekil 45.</i> 14 günlük hızlandırılmış harç çubuğu deney sonuçları.....	98
<i>Şekil 46.</i> 28 günlük hızlandırılmış harç çubuğu deney sonuçları.....	98
<i>Şekil 47.</i> 210 günlük hızlandırılmış harç çubuğu deney sonuçları.....	99
<i>Şekil 48.</i> Sodyum metasilikat ile aktive edilen numunelerin genleşme grafiği.....	101
<i>Şekil 49.</i> Sıvı sodyum silikat ile aktive edilen numunelerin genleşme grafiği.....	103
<i>Şekil 50.</i> Sodyum hidroksit ile aktive edilen numunelerin genleşme grafiği.....	105
<i>Şekil 51.</i> 210 gün sonunda numunelerde oluşan çatlaklar.....	105
<i>Şekil 52.</i> 14 Günlük numunelerin XRD sonuçları.....	106
<i>Şekil 53.</i> Referans numunenin 14 günlük EDX sonuçları.....	109
<i>Şekil 54.</i> Sodyum metasilikat numunesinin 14 günlük EDX sonuçları.....	110
<i>Şekil 55.</i> Sıvı sodyum silikat numunesinin 14 günlük EDX sonuçları.....	111
<i>Şekil 56.</i> Sodyum hidroksit numunesinin 14 günlük EDX sonuçları.....	111
<i>Şekil 57.</i> Referans numunesinin element haritalaması.....	112
<i>Şekil 58.</i> Metasilikat ile aktive edilen numunenin element haritalaması.....	113
<i>Şekil 59.</i> Sodyum silikat ile aktive edilen numunenin element haritalaması	114
<i>Şekil 60.</i> Sodyum hidroksit ile aktive edilen numunenin element haritalaması	115

GİRİŞ

Beton dayanım, dayanıklılık, güvenilirlik, çok yönlü kullanımı vb. gibi özellikleriyle Dünyada kullanılan en yaygın yapı malzemesidir. Betonda kullanılan çimento ise karbondioksit salınımı, üretiminde yüksek enerji gereksinimi ve üretimi için pahalı işlemlerden geçmesinden dolayı son yıllarda bu malzemeye alternatif olarak bağlayıcılık özellik gösteren, daha az enerji gerektiren ve ucuz malzeme arayışına girilmiş; bu konuda araştırmalarda artış görülmüştür.

Çimentoya alternatif olarak kullanılmak üzere tek başlarına bağlayıcılık özelliği göstermeyen veya çok az bağlayıcılık özelliği olan ancak öğütülerek çok ince tanecikli hale getirildiklerinde bağlayıcılık özellikleri gösteren silisli veya silis ile alümin içeren puzolan isimli malzemeleri beton üretiminde değerlendirme yönünde çalışmalar son zamanlarda yoğunlaşmıştır. Puzolanlar doğal ve yapay puzolanlar olmak üzere ikiye ayrılırlar. Doğal puzolanlar çoğunlukla doğada volkanik kökenli olarak bulunan volkanik cam, volkanik tuf, tras, diatomik topraklar gibi puzolanlar; yapay puzolanlar ise doğal halde bulunmayıp endüstriyel malzeme üretimi esnasında yan ürün olarak ortaya çıkan uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi puzolanlardır. Bunların yanı sıra diğer puzolanlardan farklı olarak çok ince tanecikleri bulunan, yüksek oranda alüminosilikat içeren metakaolin gibi ısıl işlem görmüş özel üretilen mineral katkıları da mevcuttur [1].

Puzolanlar ve mineral katkıları beton içerisindeki çimento oranını azaltmak için kullanılmaktadır. Günümüzde içerisinde alümin, silis ve kalsiyum içeren uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi amorf malzemeler, sodyum ve potasyum gibi alkali aktivatörler kullanılarak çimentonun yerini bağlayıcı olarak alabilmektedir. Alkali ile aktivasyon ile alakalı olarak birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yürütülmüş, ancak bu çalışmaların hız kazanması 1940'lı yıllarda Purdon'un tarafından yapılmış çalışma ile gerçekleşmiştir. Purdon, sodyum hidroksit kullanarak yüksek fırın cürufunu aktifleştirmiştir. Purdon'a göre reaksiyon iki safhada tanımlanmıştır. İlk aşamada silika,

alüminyum ve kalsiyon hidroksit serbest kalmış, sonrasında alümina ve silika hidratlar oluşmuştur. Elde edilen sonuçlarla alkali hidroksitin katalizör görevi üstlendiğini görmüştür. Alkali aktivasyonlu sistemler genellikle yüksek fırın cürufu ve uçucu küller aktive edilerek üretilse de son zamanlarda metakaolinin aktive edilmesiyle betondaki dayanım ve dayanıklılık üzerine etkileri araştırılmaktadır [2].

Beton, betonarme yapı ve yapı elemanlarının servis ömürlerini gerekli işlevselliklerini kaybetmeden tamamlamaları beklenir. Fakat birçok faktör bu yapıların servis ömürlerini tamamlamadan işlevselliklerini yitirmesine sebep olabilir. Yapı elemanlarının dayanıklılıklarını fiziksel ve kimyasal olmak üzere belirleyen iç ve dış etmenlerden bahsedebiliriz. Dayanıklılığı etkileyen kimyasal faktörlerden birisi olan ve alkali ile agrega arasında gerçekleşen tepkimeler arasında en sık görülen reaksiyon Alkali-silika reaksiyonudur. Bu reaksiyon beton veya betonarme yapı elemanlarının içerisinde gerçekleşmekte ve yapı içerisinde istenilmeyen gerilmeler oluşturmak suretiyle betonun yapısında bozulmalara yol açmakta; betonun durabilitesini kötü yönde etkileyebilmektedir.

1920 ve 1930 yıllarında alkali silika reaksiyonu ilk olarak Amerika Birleşik Devletleri'nin Kaliforniya Eyaletindeki suyla bağlantısı fazla olan yapılarda nedeni belirsiz çatlakların oluşmasıyla gözlemlenmiştir. Sonrasında gerçekleştirilen incelemeler neticesinde bu yapılarda kullanılan malzemelerin belirli normlara uygun olduğu görülmüş ancak 1930'lu yılların bitimine doğru haritaya benzeyen çatlakların nedeninin alkali silika reaksiyonu olduğu 1940 yılında ilk kez Thomas E. Stanton tarafından betonun içerisinde ihtiva ettiği bileşenler arasında gerçekleşen içsel bir mekanizma olduğu açıklanmıştır. Stanton'un beton harç çubuklarıyla yaptığı çalışmalar, bu bozulmalara çimentonun içerisinde bulunan alkali miktarı, beton içerisindeki agreganın tipi, reaktif agrega miktarı, yeterli nem ve uygun sıcaklığın neden olduğunu göstermiştir. Bu mekanizma beton üzerinde genellikle haritayı andıran çatlak oluşumu, kapak atması ve siyah renkte bir çeşit jelin beton yüzeyinden ortaya çıkması biçiminde gözlemlenmiştir [3].

Betonun dayanıklılığına etki eden kimyasal faktörlerden birisi agrega ve alkali arasında gerçekleşen bir kimyasal reaksiyondur. Bu reaksiyonda reaktif agrega, yeterli nem ve yeterli alkali bulunan ortamda ortaya çıkan, zararlı genleşmelerle dayanım kaybı, çatlak, hacimce genleşme gibi betonda zararlı etkiler ortaya çıkabilmektedir. Beton içerisindeki boşluk suyunda bulunan hidroksil iyonları ile agregadan gelen reaktif silika arasında

gerçekleşen bu kimyasal reaksiyona alkali silika reaksiyonu (ASR) ismi verilir. Bu reaksiyonu tamamen engellemek veya etkilerini azaltmak için alkali aktive sistemlerle üretim, tercihler arasında bulunmaktadır. Yapılan çalışmalarda uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi malzemelerin alkali ile aktivasyonu ile bu zararlı reaksiyonun önüne geçilebildiği görülmüştür [4].

Bu çalışmanın amacı, farklı tipte aktivatörler ile farklı dozajlarda sodyum kullanılarak üretilen alkali aktive edilmiş harç numunelerinin iç ve dış etkiler karşısında dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin değişimini incelemektir. Üretilen alkali aktive harç örneklerinin büyük bir dayanıklılık problemi olan alkali silika reaksiyonuna karşı ne derece etkili olduğu görülmüş olacaktır.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Alkali Agregat Reaksiyonları

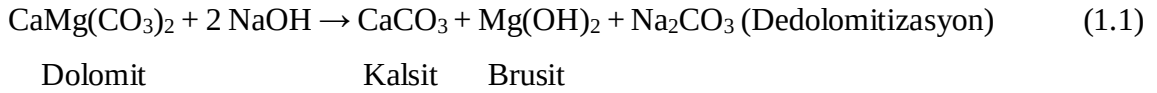
Alkali ve agregat arasında gerçekleşen reaksiyonlar temel olarak iki ana başlık altında toplanabilir. Bunlardan ilki alkali-karbonat reaksiyonu (ACR) ikincisi ise alkali-silika reaksiyonudur (ASR). Çimento içerisinde bulunan sodyum oksit (Na_2O) ve potasyum oksit (K_2O) gibi alkali oksitler ile agregat içerisinde bulunan reaktif silisler arasında zaman içerisinde bir reaksiyon gerçekleşebilmekte ve bu reaksiyon neticesinde oluşan jel ürünü zamanla şişerek betonda çatlamalara sebep veren hasarları oluşturabilmektedir. Her ne alkali ile agregat arasında karbonat kaynaklı kimyasal reaksiyonlar oluşabilse de bu çalışmada daha çok alkali-silika reaksiyonu üzerinde durulacaktır.

1.1.1. Alkali-Karbonat Reaksiyonu

Karbonat içeren agregatlar dünya genelinde beton içerisinde kullanılan önemli agregat türleridir. Hatta bazı bölgelerde beton için kullanılan tek uygun kaya türü olabilmektedirler. Karbonat içeren agregatlar betona zarar veren kimyasal reaksiyonlara sebep verebilmektedirler. Dünya genelinde ACR nadir gerçekleşen bir reaksiyondur ve reaktif ACR agregatları bazı taş ocaklarında bulunabilmektedir. Yaklaşık 60 yıl önce Kanada’da yapılan tanıma göre ACR çok hızlı tepki veren ve beton yapılar üzerinde birkaç yıl içerisinde büyük ölçüde bozulmalara sebep verebilen bir reaksiyondur. Bazı araştırmacılar ACR’nin olmadığını onun yerine ASR’nin var olduğunu iddia etmekte ise de bazı araştırmacılar daha önce Gillott tarafından tanımlanan ACR’yi ve Tang’ın dedolomitizasyon sürecini tanımlama şeklini kabul etmektedirler [5,6].

Alkali-karbonat reaksiyonu, alkali hidroksitler ile bazı killi dolomitik kireçtaşları arasında meydana gelmektedir. Reaksiyon betonun hızlı bir şekilde genişlemesi ve yoğun bir

şekilde çatlakların oluşumuyla kendini gösterir. ACR'den etkilenen yapılar genel olarak 5 yıl veya daha kısa bir süre içerisinde çatlama gösterir. Mekanizmanın tam olarak net olmamasıyla birlikte genel olarak literatürde kabul gören bir şekilde ACR oluşum mekanizması aşağıdaki gibi Hadley tarafından tanımlanmaktadır [7].



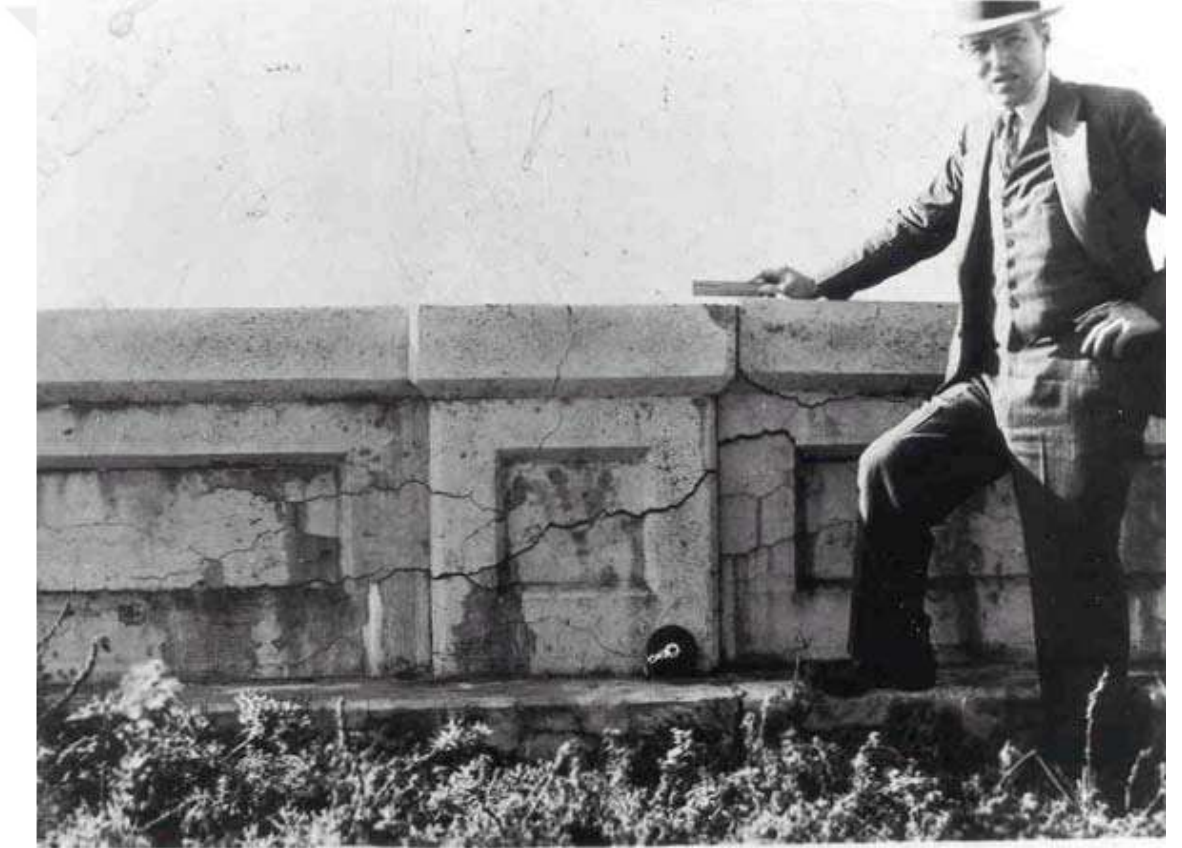
Hadley'in tanımladığı reaksiyon mekanizması hacimce bir genişmeden bahsetmemektedir. Aksine dedolomitizasyon sürecinde hacim değişimi negatiftir. Swenson ve Gillot 1964 yılında hacimce genişmeyi agregaların içerisindeki kil parçalarının su emme neticesinde şişmesine bağlamışlardır. Dedolomitizasyon sürecinin agregaların gözenekliliğini arttırarak su emilimini artırdığını iddia etmişlerdir [8].

1.1.2. Alkali Silika Reaksiyonu

Alkali silika reaksiyonu, hidrate çimento hamurunun boşluk suyunda bulunan alkaliler, hidroksil iyonları (OH^-) ile agregadaki kristal yapısı bozulmuş belirli reaktif silika fazları arasında meydana gelen kimyasal reaksiyondur. Bu reaksiyon sonucunda suyu emerek şişen; alkali-silika jeli oluşur. Bu şişme sonucunda jelin çevresindeki hamur ve agregalar üzerinde bir gerilme ortaya çıkar ve çatlakların oluşması bu gerilmeye sebep veren basıncı hafifletir. Bazı durumlarda betona veya yapıya verilen tek zarar, estetik olarak güzel görünmeyen harita şeklinde çatlamlar oluşması ve güzel görünmeyen lekelenmeye neden olan jel sızması olabilmektedir. Fakat çoğu ASR oluşumunda reaksiyon; çatlak oluşumu, beton yapıda dayanım ve dayanıklılık kaybına sebep olan ciddi hasarlara yol açabilmektedir [9].

ASR'ye bağlı olarak ortaya çıkan ilk problemler 1920'li ve 1930'lu yıllarda Amerika Birleşik Devletleri'ne bağlı Kaliforniya'da gözlemlenmiştir. Oldukça kabul edilebilir inşaat standartları ve malzeme kalite kontrolü bulunmasına rağmen Kaliforniya'da birçok sayıda yapıda inşaatlarından sonraki birkaç yıl içerisinde ciddi çatlaklar gözlemlenmiştir. Bölgede yapılmış olan otoyol ayak ve Şekil 1'de görülen köprü parapetlerinde çatlamlar gözlemlenmiştir. Bunun üzerine Stanton'un 1940 yılında beton bileşenleri arasında gerçekleşen zararlı bir reaksiyon olan alkali-agrega reaksiyonunu ortaya koyması, geniş

ve kapsamlı sonuçları olan büyük bir bilimsel başarı olarak ortaya çıkmıştır. Kısa süre sonra yapılardaki betonun bozulmasında; kullanılan çimento ve agreganın betonun maruz kaldığı çevresel faktörlerden daha önemli ortaya çıkmıştır. Stanton'un çalışmaları harç çubuklarındaki uzamaların çimentodaki alkali miktarı, agregadaki reaktif silisin çeşidi ve miktarı, ortamdaki nem varlığı ve sıcaklıkla ilgili olduğunu göstermiştir. Daha sonra harç çubuklarındaki uzamaların ise çimentodaki alkali miktarının %0,60'tan daha az olması halinde ihmal edilebilir düzeyde kalabileceğini gösterdi. Stanton'un daha sonraki deneysel çalışmaları, betonda oluşan genleşme ve çatlamların yüksek alkali içeren çimento ve opalin agregaların birleşiminden kaynaklı olduğunu gösterdi [10].



Şekil 1. Thomas Stanton ve ASR nedeniyle hasar gören köprü parapet duvarı

Stanton'un çalışmasını yayınlamasının üzerine Blanks ve Meissner de Parker Barajı'nda oluşan çatlama ve bozulmaları açıkladılar. Böylelikle betonda bir alkali-silika reaksiyon ürününün ortaya çıktığı ve agregadaki reaktif bileşenlerin, toplam agreganın yalnızca yaklaşık olarak %2'sini temsil eden andezit ve riyolit parçaları olduğunu gösterdiler [11].

Sonraki yıllarda alkali-agrega reaksiyonu üzerine araştırmalar önce ABD’de, daha sonra Avrupa, Kanada ve dünyanın diğer yerlerinde olmak üzere birçok laboratuvar da gerçekleştirildi. Reaksiyona dahil olan agrega mineral bileşenlerinden, reaksiyon mekanizması ve kontrolü, reaksiyon etkilerinin belirlenmesinden test edilmesi ve değerlendirmesine kadar birçok yönde araştırmalar ivme kazanmıştır. Bu konudaki bilgi birikimine dünyanın birçok yerinden gelen bilim adamlarının çalışmaları önemli katkıda bulunmuştur. Bunların arasında karbonat içeren agregaların reaksiyonunu tanımlayan Kanadalı Swenson, ASR kaynaklı betonda oluşan bozulmaları araştıran ilk Avrupalı bilim adamlarından olan Danimarkalı Idorn ve ASR oluşum mekanizmalarının anlaşılmasına büyük katkı sağlayan Avustralyalı Vivian bulunmaktadır. Bu bilim adamlarının yanı sıra birçok araştırmacı da bulunmaktadır [12].

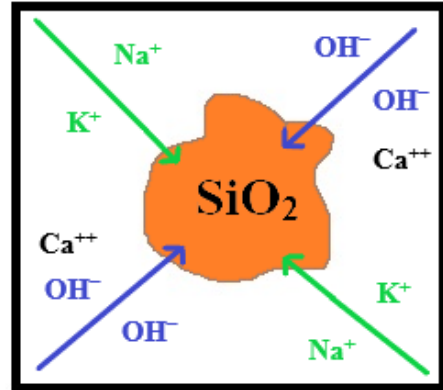
ASR, Türkiye’de ilk defa 1995 yılında İzmir yöresindeki bazı karayollarına ait köprü ayaklarında oluşan çatlamlarla görülmüştür. Karayolları ve Japonya’dan Jica isimli firmanın birlikte çalışmalarıyla yapılan gözlemlerde köprü ayaklarındaki deformasyonların kaynağının ASR olduğu belirtilmiştir. Reaksiyondan etkilenmiş olan Turan, Buca, Naldöken, Turgutlu ve Hilal2 köprü ayaklarından karot numuneleri alınmış ve karotlarda bulunan çimento ile agregalar incelenmiştir. Bu köprülerin yapımlarında kullanılan agrega örneklerinde de hızlandırılmış harç çubuğu deneyleri gerçekleştirilmiş ve petrografik deneyler yapılmıştır. Bütün bu çalışmalar sonucunda Gediz ve Nif dere yatak ve teraslarında bulunan doğal agregaların içerdikleri reaktif silis formlarının (kalkerli çört, riyolit tuf ve riyolit) alkali silika reaksiyonuna sebep verdiği görülmüştür. Bu çalışmaların sonucunda yeni yapılacak yapılarda Nif ve Gediz Dere yatak ve teraslarından elde edilen doğal kumların kullanılmaması yönünde karar alınmıştır [13].

1.1.2.1. Alkali Silika Reaksiyonu Mekanizması

Girişte açıklandığı gibi alkali-silika reaksiyonu, betonun (veya harcın) boşluk suyundaki alkali hidroksitler ile bazı çeşit agregalarda bulunan kristal yapısı bozuk silika mineralleri arasındaki bir reaksiyondur. ASR sonucunda ortaya çıkan ve değişen miktarlarda kalsiyum içeren ASR jel ürünü higroskopik ve suyu emerek şişme eğilimi gösteren bir yapıdadır. Belirli şartlar altında oluşan reaksiyon betonun genişmesine ve sonunda çatlamasına neden olabilir. Bu durum Şekil 2’de görsel olarak gösterilmiştir.

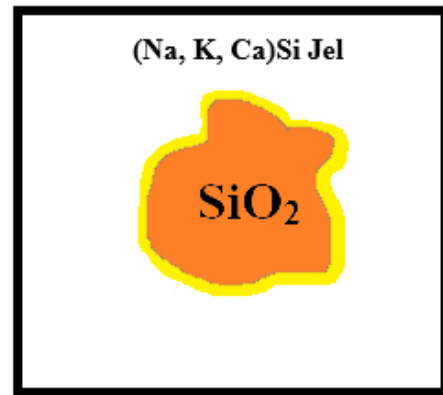
Beton boşluk suyuna az miktarda Ca ile birlikte Na, K ve OH hakimdir.

Agregadaki silika reaktif ise - OH ve ardından Na ve K, SiO_2 ile reaksiyona girecektir.



Reaksiyon ürünü Na, K, Ca ve Si'den oluşan alkali silika jeldir.

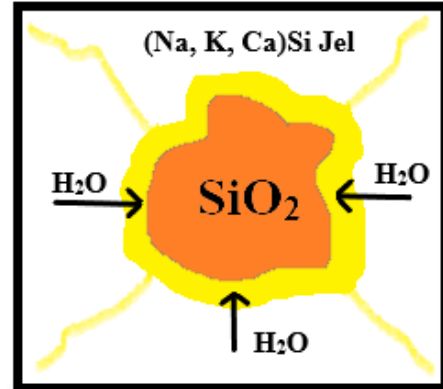
Jel agreganın etrafında ve içinde oluşur.



Jel çevredeki çimento hamurundan suyu emer.

Jel genişler.

Sonunda şişme basınçları çevredeki hamurun çekme mukavemetini aşabilir ve betonun genişlemesine ve çatlamasına neden olabilir.



Şekil 2. Alkali silika reaksiyonu şeması

Şekil 2'de de belirtildiği üzere hasar alkali-silika reaksiyonunun meydana gelebilmesi için temel olarak üç gereksinimin olduğu bilinmektedir; bunlar:

- Yeterli miktarda reaktif silika (Agregaların içinde)
- Yeterli alkali konsantrasyonu (Öncelikle Portland çimentosundan)
- Yeterli nem

Bu gerekliliklerden herhangi birinin ortamda olmaması alkali-silika reaksiyonunu önleyecektir [14].

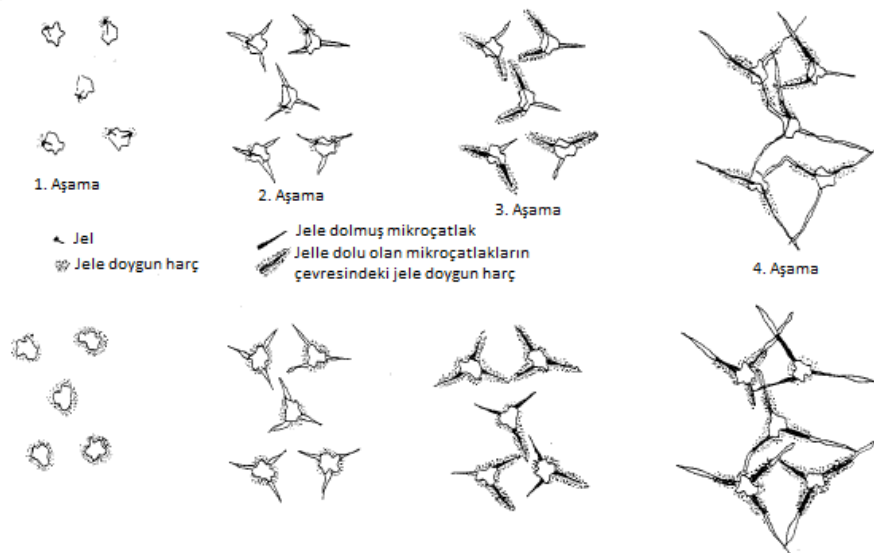
ASR gelişiminde en önemli etkenlerden birisi agregaların mineralojik yapısıdır. Agregalarda bulunan amorf veya yarı kristalin silika türleri (opal, kristobalit, tridimit, mikrokristalin kuvars) yüksek reaktivite gösterebilmektedir. Örnek verilecek olursa, opalin reaksiyon hızı oldukça yüksektir ve bu cins agregalar ASR açısından oldukça risklidir. Kuvars ise genel itibarıyla inert kabul edilse de, mikrokristalin formda olduğu zaman reaksiyon potansiyeli taşımaktadır [12].

ASR gelişiminde alkali iyonlarının da bulunması gerekmekte ve bu alkalilerin kaynağı, başlıca çimentodur. Çimento içerisindeki alkali oksitler (Na_2O ve K_2O) beton boşluk çözeltisinde çözünerek hidroksit iyonlarını meydana getirir ve pH'ı 13 civarı ve üzerine kadar artırır. Çimentoda mevcut olan bu alkali konsantrasyonu Na_2O eşdeğeri %0,6'dan büyükse alkali silika reaksiyonu açısından risk içermektedir. Bunun yanı sıra, mineral katkıları, kimyasal katkıları, hatta karışım suyundaki tuzlar da alkali miktarını artırabilmektedir. Yüksek alkali içeriğine sahip olan çimentolar, ASR riskini önemli ölçüde artırmaktadır [15].

Alkali silika reaksiyonu için ortamda olması gereken reaktif agrega, yeterli alkali ve nem varlığında reaksiyon temel olarak iki aşamada gerçekleşmektedir. 1. Aşamada alkali ve silisler nem yardımıyla reaksiyona girerek alkali-silika jel reaksiyon ürününü meydana getirmektedir. 2. Aşamada ise alkali-silika jeli nem alıp şişerek genleşmelere sebep olmaktadır. Oluşan bu genleşmeler beton içerisinde içsel gerilmelere sebep olup çatlamlara sebep olmaktadır. Eğer bu çatlamların oluşumu beton yüzeyinde etkili olursa betonun dışarıdan daha fazla nem ve kimyasallara karşı daha savunmasız hale gelmesini ve bu sebepten dolayı daha fazla alkali-silika jel formunun oluşmasına neden olur. Betonun daha geçirimsiz olması bu reaksiyonun etkilerinin azaltılmasına kritik rol oynadığı söylenebilir. Bu sayede beton üzerinde daha az kanal oluşur ve daha az su beton içerisine girmiş olur. Beton içerisine giren suyun az olması ise reaksiyon jelinin daha az su almasına ve daha az genleşmesine sebep olacağından dolayı zararlı etkilerin azalmasına sebep olur. Daha yüksek kalitede beton üretimiyle alkali silika reaksiyonunun zararlı etkilerinden korunmuş olursa da reaksiyonun tamamen bitirilmesi söz konusu olmayacaktır [16].

ASR, temel olarak betonun alkali pH ortamında silika minerallerinin çözünmesi ile başlar. Beton gözenek çözeltisinde pH değerinin 13'ün üzerinde olması, silikanın çözünürlüğünü artırmaktadır. Bu aşamada, reaktif silika amorf veya zayıf kristalin yapıdadır ve yüksek pH koşullarında çözünerek alkali iyonları (Na^+ , K^+) ile birleşir. Oluşan alkali-silika jeli, higroskopik özelliğe sahiptir ve çevresinden su alarak şişme eğilimi gösterir [17].

Reaksiyon sonucu oluşan jel tek başına zararlı değildir. Jelin zararlı olabilmesi için ortamda nemin varlığından söz etmek gerekir. Ortamdaki nem varlığının %80'in üzerinde olması gerektiği yapılan çalışmalarda gösterilmiştir [18]. Bazı çalışmalarda ise bu oranın altında da reaksiyondan kaynaklı genleşmelerin olduğu belirtilmektedir. Hobbs'a göre alkali silika jelinin şişmesi 4 aşamada gerçekleşmektedir. Öncelikle sistem içerisinde gerilme kuvvetleri artmaya başlar ve küçük çatlaklar oluşmaya başlar. Oluşan çatlaklar sistem üzerinde rastgele yayılmaya başlar. Bu yayılma sonucunda alkali silika reaksiyonu sonucunda Şekil 4'te görüldüğü gibi klasik bir görünüme sahip olan harita şeklindeki çatlaklar oluşmaya başlar. Oluşan çatlakların içerisi incelendiğinde OH^- iyonlarının varlığı görülebilir. Hobbs'un çalışmasında belirttiği reaksiyon mekanizması Şekil 3'de gösterilmiştir [19].



Şekil 3. ASR jelinin şişerek ilerleme ve sonuç şeması



Şekil 4. ASR kaynaklı tipik harita çatlağı

Yapılan çalışmalarda alkali-silika jelinin varlığının her zaman zararlı olmadığını öne sürmüştür. Araştırmacılar, bazı jellerin çok sınırlı ölçüde genleşme gösterebileceğini ya da hiç genleşmeyebileceğini ifade etmişlerdir [20]. 1981’de yapılmış bir çalışmada şişme oranı %4’ün altında kalan jel türlerinin beton içerisinde yalnızca 0,5 MPa’dan daha düşük iç gerilmelere yol açacağı, dolayısıyla bu gerilmelerin yapısal hasar oluşturacak seviyede olmadığı ileri sürülmüştür. Buna karşın, %60–80 aralığında genleşme gösteren jellerin, 4–11 MPa düzeyinde iç gerilmeler üretebileceği ve bu durumun beton için önemli bir tehdit oluşturabileceği vurgulanmıştır [21].

Jelin şişmesiyle ortaya çıkan iç basınç; reaksiyon bölgesine taşınan boşluk suyu miktarından ve çevresel sıcaklıktan büyük ölçüde etkilenmektedir. Bu nedenle, alkali-silika reaksiyon ürünlerinin, aşırı boyutlardaki genleşmeler ve yapısal olarak tehlikeli çatlak oluşumlarıyla ilişkilendirilmesi yerinde bir yaklaşım olacaktır.

Reaksiyonun mekanizmasına rağmen, genleşmenin temel nedeni termodinamik prensiplerle aynıdır. Deneysel çalışmalar, genleşmenin başlıca belirleyici etkeninin ortamda yeterli miktarda kalsiyum (özellikle $[Ca(OH)_2]$ formunda) bulunması olduğunu ortaya koymuştur. Bol miktarda alkali hidroksit ve reaktif silika içeren, ancak kalsiyum hidroksit içermeyen sistemlerde, silikalar çözünerek çözeltide kalır; böylece zararlı

genişleme meydana gelmez. Kalsiyumun jel genişlemesindeki rolü tam olarak net olmasa da, aşağıdaki mekanizmaların katkıda bulunduğu düşünülmektedir [14]:

Kalsiyum, reaksiyon ürünüde alkali iyonlarının yerini alarak yeni alkali kaynakları oluşturur ve böylece reaksiyon döngüsünü sürdürür [22, 23].

Ca(OH)_2 , çözeltideki OH^- iyonlarının kaynağı olarak işlev görerek alkali rezervuarı sağlar [24].

Boşluk suyundaki yüksek kalsiyum konsantrasyonu, silikanın agregalardan çözünerek difüzyonunu sınırlandırır [25, 26].

Kalsiyumun bulunmadığı ortamlarda, reaktif silika alkali hidroksit çözeltisinde zarar vermeden çözünür [27].

Kalsiyum açısından zengin jel yapıları, genişlemenin gerçekleşebilmesi için agrega çevresinde yarı geçirgen zar görevi görür ve böylece dolaylı yoldan şişmeyi destekler [27].

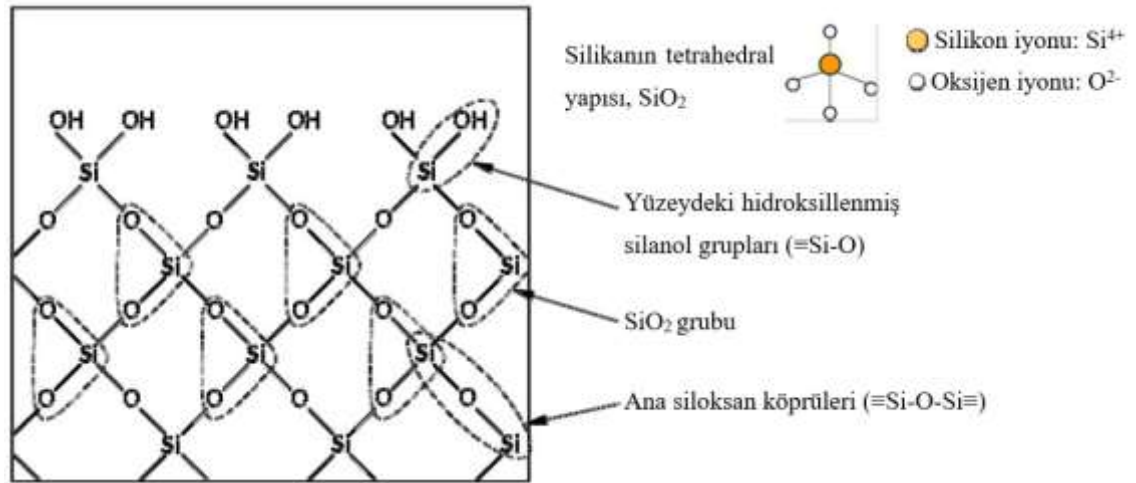
Reaktif agregaya sahip harç veya betonlarda genişleme, alkali çözeltiden Ca(OH)_2 'nin uzaklaştırılması yoluyla sınırlandırılabilir. Örneğin, Chatterji Ca(OH)_2 'yi beton çözeltisinden süzerek; Thomas ise zenginleştirilmiş karbondioksit ortamında harç çubuklarında Ca(OH)_2 'yi karbonatlaştırarak sistemden uzaklaştırmıştır [24].

Kalsiyum hidroksitin kesin olarak hangi mekanizmada baskın rol üstlendiği henüz tam olarak açıklığa kavuşmamış olsa da, kalsiyumun reaksiyonun gerçekleşmesinde zorunlu bir bileşen olduğu açıktır. Dolayısıyla, ortamda kalsiyumun azaltılması (örneğin Ca(OH)_2 'nin puzolanik reaksiyonlarla tüketilmesi yoluyla) alkali-silika reaksiyonuna bağlı genişlemenin sınırlandırılmasına katkı sağlar [14].

Hobbs'a göre, opal, gözenekli silisli şist ve mıcır taşı gibi silika içeren ve hızlı reaksiyona girme eğilimindeki agregalarda belirli oranda reaktif malzeme bulunmaktadır. Bu agregalarda, maksimum genişlemeye yol açan reaktif madde miktarına pesimum içerik adı verilir. Bu özel davranış, "pesimum davranış" ya da "pesimum etki" olarak da adlandırılmaktadır. Eğer agregadaki reaktif malzeme miktarı pesimum içerikten daha düşük veya daha yüksek olursa, genişleme miktarı buna bağlı olarak azalır [8].

1.1.2.2. Alkali Silika Reaksiyonunun Kimyası

Alkali-silika reaksiyonu, betonun boşluk suyundaki hidroksil iyonları ile agregadaki belirli silika türleri arasında oluşan reaksiyonla başlar. Silika (SiO_2) temel olarak siloksan gruplarından (Si-O-Si) oluşur. Fakat iyi kristalize olmuş silika bile yüzeylerinde düzensizdir ve yüzey oksijenleri hidroksillenerek (saf suda bile) silanol grupları (Si-OH) oluştururlar (Şekil 5). Yüksek konsantrasyonda hidroksil iyonları (OH^-) varlığında silika, öncelikle silanol gruplarının nötrleştirilmesi ve arkasından siloksan gruplarına saldırı yoluyla çözünme eğilimi gösterir; reaksiyonlar aşağıdaki gibi gösterilebilir:



Şekil 5. Silika yapısı

Siloksan köprüleri kırıldıkça Şekil 7’te görüldüğü gibi yapıda bozulmalar başlar [28,29]. (Şekil 6’teki noktalı çizgi silika ve su arasındaki arayüzü temsil eder) Negatif yüklü Si-O^- iyonları beton boşluk suyu içerisinde bol miktarda bulunan potasyum ve sodyum gibi pozitif yüklü türleri çeker. İlk sonuç, nem ihtivasına bağlı olarak alkali-silikat çözeltisi veya jelidir. Bunun yanı sıra kalsiyumun varlığında silika, esas olarak az miktarda kalsiyum içeren sodyum, potasyum ve silikadan oluşan alkali-silika jelinden ($\text{CaO-Na}_2\text{O/K}_2\text{O-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$) ayrışır. Silika çözündükçe hidroksil iyon konsantrasyonu ve pH azalır. Sadece alkali hidroksit ve silikadan meydana gelen bir sistemde silika, çözeltideki konsantrasyon silika-pH denge eğrisine ulaşıncaya kadar çözünmeye devam eder (Şekil 7) [30]. Nihai silika konsantrasyonunun başlangıçtaki $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranına bağlı olduğu

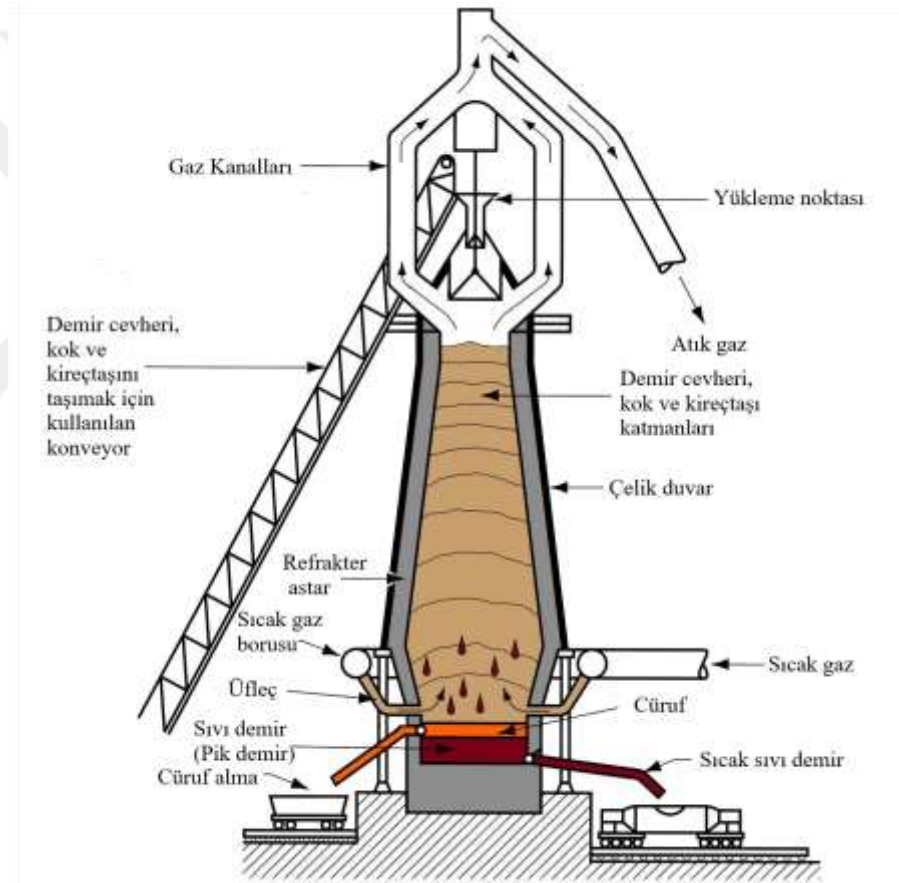
- 1774 Yüksek fırın cürufu sönmüş kireçle birlikte harç üretiminde ilk defa kullanılmaya başlanmıştır.
- 1862 Yüksek fırın cürufunun bağlayıcı olabilme özelliği Almanya'da Emil Langen tarafından bulunmuştur.
- 1865 Öğütülmüş yüksek fırın cürufu kireç ile karıştırılarak Almanya'da üretimine başlanmıştır.
- 1880 Öğütülmüş yüksek fırın cürufu klinker ile birlikte üretilerek Almanya'da satılmaya başlanmıştır.
- 1888 Yüksek fırın cürufu çimentonun Almanya'da üretimi başlamıştır.
- 1889 Yüksek fırın cürufu çimento ilk defa Fransa'da yer altı metrosu yapımında kullanılmıştır.
- 1896 Yüksek fırın cürufu çimentonun üretimi Amerika'da başlamıştır.
- 1917 Yüksek fırın cürufu çimento ile ilgili ilk norm Almanya'da yürürlüğe girmiştir.
- 1950'ler Yüksek fırın cürufu çimento ile birlikte beton üretimi İngiltere'de, Amerika'da, Avustralya'da, Güney Afrika'da, Kanada'da ve Japonya'da kullanılmaya başlanmıştır [31].

1.2.1. Yüksek Fırın Cürufu Üretim Aşamaları

Yüksek fırın cürufu (YFC), yüksek fırında pik demir üretiminde elde edilen bir yan üründür. Demir cevherinin demir içermeyen malzemesinin, esas olarak silika ve alümina bileşiklerinin, termal olarak ayrılmış karbonatik akışın kalsiyum ve magnezyum oksitleri ile kok kömürünün yandıktan sonra ortaya kalan kalıntıları ile füzyon yoluyla oluşur. Demir üretiminde demir cevheri, kireçtaşı ve kok kömürü hammadde olarak kullanılmaktadır. Demir cevheri çeşitli demir oksitlerle birlikte kükürt, alümin ve silis gibi demir haricinde materyaller de içermektedir. Yüksek fırındaki demiri işleme sonucunda bu maddeler birbirlerinden ayrışırlar. Kireçtaşı bu işlemde yardımcı bir madde olarak rol alır. Kok kömürü ise gereken ısıyı sağlar. Yüksek fırın içerisinde olan

reaksiyonlar 1300°C ile 1600°C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleşir. Cüruf sıvı demirin üzerinde yüzer ve düzenli aralıklarla boşaltılır. Yüksek fırından çıkarken erimiş YFC yaklaşık 1450°C'lik bir sıcaklığa sahiptir ve açık ocaklarda hava ile yavaşça temas ederek veya granülasyon veya peletleme yoluyla hızla soğutulur. Peletleme en yaygın yöntemlerdendir. Erimiş cürufun su jetleri ile hızlı bir şekilde söndürülmesini ve mekanik olarak yayılmasını sağlar. Ayrıca kuru cüruf granülasyon teknikleri de mevcuttur, fakat çok yaygın bir şekilde kullanılmamaktadır [32].

Şekil 8'de yüksek fırının yapısı ve Şekil 9'da cürufun oluşum aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 8. Yüksek fırında cüruf üretimi



Şekil 9. Cüruf üretim süreci

Şekillerde gösterildiği üzere yüksek fırın cürufu üretim sürecinde bir veya daha fazla fırın kullanılabilmekte ve bunun sonucunda ise farklı yapıda ve özelliklerde cüruflar elde edilebilmektedir [33].

Yaklaşık 1500°C’de olan yüksek fırın cürufunun tahliye edilmesinden sonraki uygulanacak olan soğutma metodu, oluşacak ürünün niteliklerini ve kullanım alanlarını belirler. Bu soğutma yöntemlerini aşağıda gösterildiği üzere üçe ayırabiliriz:

- Havada soğutma: Yüksek fırın cürufu havada soğutma metoduyla atmosferik şartlarda yavaş yavaş soğutulur ve yapısal olarak iri kristalli bir cüruf elde edilir. Camsı fazlı düşük olan bu cüruf kırılmak suretiyle betonda, asfalt agregası veya stabilizasyon işlerinde kullanılabilir.
- Genleştirme: Yüksek fırın cürufu kontrollü bir şekilde su, basınçlı hava ile buhar etkisiyle soğutulması halinde gözenekli bir yapıda, iri kristalli bir cüruf oluşur. Bu malzeme hafif olmasından dolayı hafif beton imalatında kullanılabilir.
- Granülasyon: Genleştirmede olduğundan daha çok miktarda su ile yapılan ani soğutma sonucunda kuma benzeyen camsı yapıda, hidrolik özelliği bulunan bir cüruf elde edilir. Bu malzemeler değirmende öğütülerek öğütülmüş granüle yüksek fırını cürufu elde edilir. Son zamanlarda peletleme yöntemi daha ekonomik olduğundan dolayı peletleme yöntemiyle YFC elde edilmektedir [34,35].

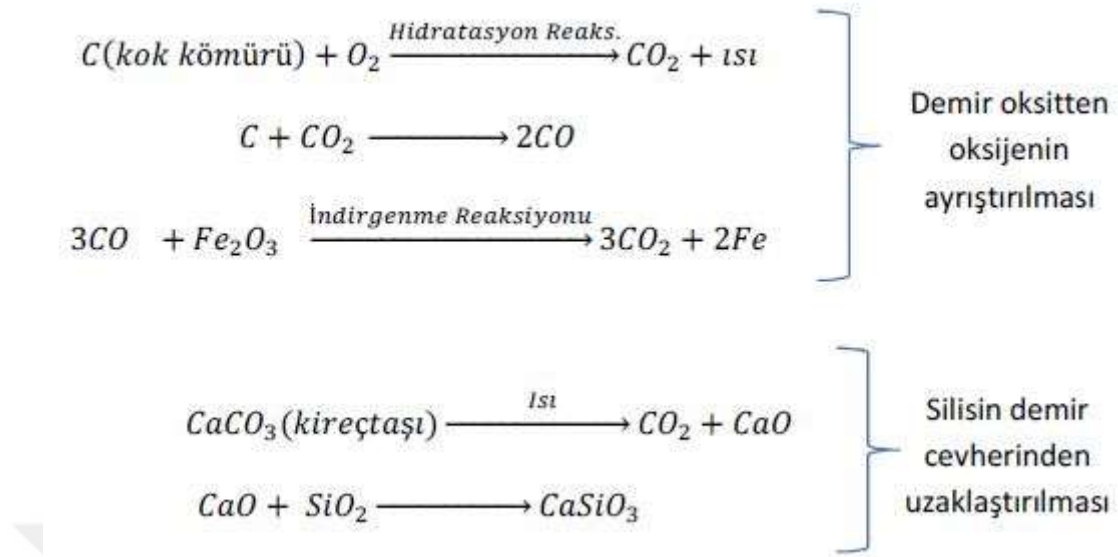
1.2.2. Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Yüksek fırın cürufunun bileşimi, yüksek fırında kullanılan kok kömürünün içeriğine, fırının içerisine koyulan malzemelere ve eritici malzemelerin yapısına bağlı olarak değişmektedir. Normalde yüksek fırın cürufunun bileşiminde silika, kalsiyum, alüminyum, magnezyum ve oksijen %95'ten fazladır. Matthes yapmış olduğu çalışmada dünyanın farklı bölgelerindeki cürufların kimyasal kompozisyonunu incelemiştir [32]. Tabloya tipik olarak Türkiye'deki cürufların kimyasal yapısı da Tablo 1'e eklenmiştir.

Tablo 1. Çeşitli bölgelerdeki cürufların kimyasal yapıları

Parametre	Min. (%)	Maks. (%)	Kuzey Amerika	Orta ve Güney Amerika	Batı Avrupa	Doğu Avrupa	Hindistan, Japonya, Avusturalya	Türkiye
SiO ₂	32	42	34,6-39,9	33,5-34,8	32,0-39,4	33,5-41,5	32,6-36,9	34-36
CaO	35	48	35,3-42,8	39,1-43,8	34,9-44,3	36,9-47,5	33,0-43,0	34-41
Al ₂ O ₃	6	>19	6,6-11,5	10,0-13,0	9,5-12,5	5,5-12,4	10,2-19,3	13-19
MgO	3	14	7,0-13,1	5,9-9,9	5,0-13,4	2,5-11,2	4,9-13,8	3,5-7
TiO ₂	0,2	>2	0,3-0,8	0,5-0,6	0,4-1,3	0,2-1,3	0,6-2,1	-
Na ₂ O _{eq}	0,3	1,2	0,3-0,8	0,4-0,8	0,3-1,2	0,6-1,1	0,4-0,8	-
SO ₃ ^a	1	4	2,0-3,0	1,1-3,7	2,0-4,5	1,6-3,8	1,7-4,0	1,2
CaO/SiO ₂	0,9	1,3	0,9-1,2	1,1-1,3	1,0-1,3	0,9-1,3	0,9-1,3	1,0-1,3

Yüksek fırınlarda demir elde edilirken demir dışındaki malzemeleri ve demirde bağlı oksijeni ayırmak temel amaçtır. Fırın içerisinde gerçekleşen reaksiyonlar Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Yüksek fırın içerisindeki reaksiyonlar

Daha iyi hidrolik aktivite için cürufun kimyasal bileşimi çok önemlidir. Kimyasal olarak cüruflar baziklik indekslerine göre sınıflandırılabilirler. Nkinamubanzi ve arkadaşları tarafından verilen CaO/SiO_2 oranı en basit baziklik indeksidir ve kalsiyumun silisli oksit oranının 1'den büyük olması gerektiğinden bahsedilmiştir [36,37].

Hidrolik aktivite cürufun bazikliğine bağlıdır; cüruf ne kadar bazik olursa alkali aktivatörlerin varlığında hidrolik aktivitesi o kadar fazla olur. Bazikliğin sabit tutulması, Al_2O_3 içeriğinin artırılması mukavemeti artırır ve CaO 'daki bir eksiklik daha büyük miktarda alümina ile telafi edilebilir. CaO yerine MgO 'nun etkisinin cürufun hem bazikliği hem de MgO içeriği üzerinde etkili olduğu görülmektedir. MgO içeriğindeki yaklaşık %8-10'a varan sapmalar, mukavemet gelişimi üzerinde hafif bir etkiye sahip olabilir; ancak MgO 'nun %10'dan fazla olması halinde bu durumun olumsuz etkileri olabilir. Ayrıca hidrolik aktivitenin kalsiyum, alüminyum ve magnezyum oksit içeriğinin artmasıyla arttığı, SiO_2 içeriğinin artmasıyla da azaldığı belirtilmiştir. EN 197-1 ve İngiliz standartlarına göre CaO ile MgO kütlelerinin toplamının SiO_2 kütlelerine oranının 1,0'ı aşması gerekmektedir. Bu oran cürufun hidrolik olarak aktif olmadığı yüksek alkaliniteyi gösterir [37,38,39].

Yüksek fırın cürufunun özgül yüzeyi Portland çimentosuna göre daha düşüktür. Fiziki olarak bakıldığına da Portland çimentosuna nazaran daha açık renklidir. Açık renkli olmasının sebebi çimentoya gri rengi veren C_4AF bileşeninin yüksek fırın cürufunda olmamasıdır. Bu renk tonundaki farklılık beton fazında da görülmektedir. Durumun böyle olması bazen yanlış değerlendirmelere sebebiyet verebilmektedir. Beton ve çimentonun rengi kalitesinin bir göstergesi olarak algılanmamalıdır.

Granül yüksek fırın cürufunun ayrı olarak öğütülmesi ve portland çimento betonlarında katkı olarak kullanılmasının, beton yapımında kullanılacak portland yüksek fırın cürufu çimentolarının üretiminde katkı olarak kullanılmasından daha avantajlı olduğu iddia edilmektedir. Cürufun katkı malzemesi olarak kullanılmasının avantajları şu şekilde belirtilmektedir:

- Ayrı ayrı öğütme daha verimli bir öğütme işlemidir.

Granüle yüksek fırın cürufu Portland çimentosu klinkerinden daha serttir. Bu nedenle, Portland yüksek fırın cürufu çimentolarının üretimine yönelik ara öğütme prosesinde, cüruf kısmı kaba iken klinker parçacıkları çok ince öğütülür. Başka bir deyişle ara öğütme işleminde cürufu optimum inceliğe indirmek bir hayli zordur.

- Ayrı ayrı öğütme, üretim kalitesinin daha iyi kontrol edilmesini sağlar.

Öğütülmüş yüksek fırın cüruflarının incelik derecesi ve homojenliği ayrı olarak öğütüldüklerinde daha iyi kontrol edilebilir. Ayrıca cürufun kalitesi geliştirilebilir. Farklı kaynaklardan gelen cürufların farklı öğütme özellikleri olabilir; ayrı öğütme ile kontrollü bir ürün elde edilebilir.

- Öğütülmüş cürufların harmanlanmış çimentolara göre daha iyi depolama özellikleri vardır.

Portland yüksek fırın cürufu çimentolar, uzun süreli ve uygunsuz depolama sebebiyle ön hidrasyon veya karbonatlaşmaya maruz kalabilir; öğütülmüş cüruflarda bu tür sorunlar görülmez.

- Ayrı öğütülmüş cürufun kullanılması, bireysel iş koşullarında esneklikler sağlar.

Ayrı öğütülmüş cüruf istenilen incelik ve kaliteye getirilebilmekte; elde edilecek betonun kalitesine bağlı olarak istenilen oranlarda kullanılabilir.

- İnce öğütülmüş cüruf betonun işlenebilirliğini ve mukavemeti artırırken kuruma rötresini azaltır [40,41].

1.3. Alkali Aktivasyonu

Çimento yerine alternatif bağlayıcı arayışı, artış gösteren çevresel faktörlerden kaynaklı kaygılar ve çimento üretiminin karbon ayak izi nedeniyle giderek artan bir ilgi alanıdır. Alkali ile aktiveleştirilen kompozit malzemeler gibi alternatif bağlayıcıların geliştirilmesiyle CO₂ emisyonları büyük ölçüde azaltılabilir. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi yan ürün veya atık olan ayrıca düşük maliyetli kaynak malzemeler, geleneksel çimento kompozitlerinden çok daha iyi performansa sahip, 21. yüzyıl için alternatif bir sürdürülebilir yeşil yapı malzemesidir. Alkali aktivasyonu, çözünme, difüzyon, polikondensasyon ve sertleşme gibi bir dizi işlemi içerir. Böylesine karmaşık bir sistemin optimizasyonu, bir dizi sentez parametresinin ve bunların etkileşimlerinin derinlemesine anlaşılmasını gerektirir. İkinci olarak, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi kaynak malzemelerini harmanlamanın avantajları, çeşitli sentez parametrelerinin etkilerini ve bunların mekanik özellikler ve mikro yapı ile olan ilişkilerini göstererek, yüksek performanslı alkali ile aktiveleştirilen kompozitler üretmek için açıklanmıştır. Aynı kimyasal özelliklere sahip iki malzeme birbirine karıştırılır ve alkali aktivasyonuna tabi tutulur; reaksiyon ürünlerinin doğası karışım oranına göre değişir. Yapılan deneysel gözlemlere dayanarak, daha iyi bir genel performans sağlayan optimal karışım oranının bulunduğunu gösteren araştırmalar da mevcuttur. Sentez parametrelerinin tam rolünün tanımlanması ve mikro yapı ile ilişkisi de vurgulanmıştır. Cürufun mukavemet ve işlenebilirlik açısından daha etkili olduğu, uçucu külün ise dayanıklılık açısından bu dezavantajı telafi ettiği gözlenmiştir. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi atık/düşük maliyetli kaynak malzemelerden elde edilen, geleneksel çimento kompozitlerinden çok daha iyi performansa sahip, gerçekten sürdürülebilir bir yeşil malzemedir. Alkali aktivasyon ile birlikte atıkları verimli bir şekilde kullanan geleneksel çimentonun yerini alacak ve yeşil teknolojiyi destekleyen çözümler günümüzde halen gelişmektedirler [42].

Portland çimentosu beton üretimi için son derece popülerdir. Avantajları olduğu gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Yüksek mukavemet sağlar ancak çok dayanıklı değildir. Önceleri puzolan katkılı Portland çimentoları kireçtaşının az olması ve farklı endüstrilerden atık olarak çıkan uçucu kül, cüruf vb. maddelerin değerlendirilmesi amacıyla üretilmekteydi. Alkali aktivasyon da bir noktada Portland çimentosunun kullanımına alternatif üretmiş olup tarih boyunca bu konuda yapılan önemli çalışmalar Tablo 2 ve Tablo 3’de özet olarak belirtilmiştir [43,44].

Tablo 2. 2000 Yılına kadar alkali Aktivasyon gelişiminin tarihçesi

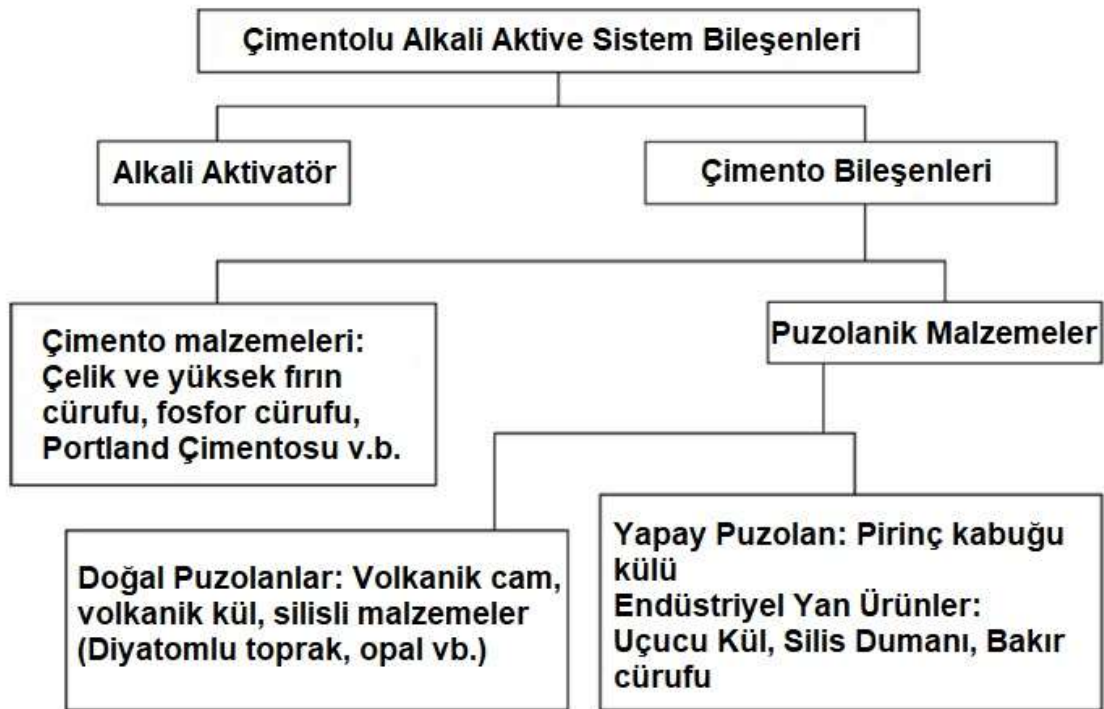
Tarih	Gelişme	Yazar
1939	Çimentoda cüruf kullanımı	Feret
1940	Alkali-cüruf kombinasyonları	Purdon
1959	Alkali çimentoların teorik temeli ve gelişimi	Glukhovsky
1965	İlk olarak “alkalin çimento” isimlendirmesi	Glukhovsky
1979	“Geopolimer” terimi	Davidovits
1979	Antik su kemerleri karakterize edilişi	Malinowski
1983	F-Çimentosu (cüruf-alkali-süperakışkanlaştırıcı)	Forss
1984	Antik yapı malzemeleri karakterize edildi	Langton ve Roy
1986	Sentetik melilit cüruflarının aktivasyonu	Malolepsy ve Petri
1986	Düşük seviyede radyoaktif atıklı cüruf çimentosu	Malek ve ark.
1987	Antik ve modern beton karşılaştırması	Davidovits
1989	Klorüre karşı dayanıklılık gösterimi	Deja ve Malolepsy
1989	Antik beton analogları	Roy ve Langton
1989	C ₁₂ A ₇ cüruf aktivasyonu	Majundar ve ark.
1989	Alkali aktive edilmiş cüruf	Talling ve Brandstetr
1990	Cüruf çimentosunun aktivasyonu	We ve ark.
1991	Hızlı sertleşen alkaliyle aktifleşen çimentolar	Roy ve ark.
1992	Alkali aktive edilmiş çimentolar: Genel bakış	Roy ve Silsbee
1992	Metakaolin ile birlikte kalsiyum içeren bileşik	Palomo ve Glasser
1993	Cüruf çimentosu	Roy ve Malek
1994	Antik, modern ve geleceğin çimentoları	Glukhovsky
1994	Alkalın çimentolar	Krivenko
1995	Cüruf ve alkali aktivasyonun mikroyapısı	Wang ve Scrivener
1996	Alkaliyle aktive edilmiş cürufun mukavemeti, gözenek yapısı ve geçirgenliği	Shi
1997	Alkali ile aktifleştirilen cüruf çimentolarının kinetik çalışmaları	Fernandez-Jimenez ve Puertas
1998	Alkali aktifleştirilen uçucu külün mikroyapısı	Katz
1999	Geopolimerik sistemlerin kimyası ve teknolojisi	Davidovits

Tablo 3. 2000 Yılından sonra alkali Aktivasyon gelişiminin tarihçesi

Tarih	Gelişme	Yazar
2000	Alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül/cüruf çimentosu	Puertas
2001-2002	Alkali ile aktifleştirilmiş cüruf betonu	Bakharev
2003	Tehlikeli atıkların immobilizasyonu	Palomo ve Palacios
2004	Zeolit formasyonu	Grutzeck
2006	Sialit teknolojisi	Sun
2009	Geopolimerler: yapısı, işlenmesi, özellikleri ve endüstriye uygulamaları	Provis ve van Deventer
2010	Uçucu kül ve cüruf içeren çimentonun aktive edilmesi	Ravikumar ve ark.
2011	Aktive edilmiş cüruf çimentolarında C-A-S-H jel modeli	Puertas ve ark.
2012	Cüruf/metakaolin bazlı alkaliyle aktive edilmiş betonun dayanıklılığı	Tanzer ve ark.
2013	Oda sıcaklığında kürlenmiş alkali-aktif uçucu kül/cüruf betonu	Lee
2014	Alkali aktive edilmiş cüruf betonu için büzülme iyileştirmesi	Yuan ve ark.
2015	Alkali aktif çimentonun mühendislik özellikleri	Thomas ve Peethamparan
2016	Alkali aktif çimentonun mekanik özellikleri	Ding ve ark.
2017	Uçucu kül/cüruf bazlı alkali aktif sistemlerin karışım oranları	Rafeet ve ark.
2018	Nano silika kullanılarak ortamda kürlenmiş alkali aktif çimentonun karakterizasyonu	İbrahim ve ark.
2019	Çelik ve makro-PP fiber takviyeli gazbetonun eğilme davranışı	Koenig ve ark.
2020	Alkali aktif çimentonun imalat ve mühendislik özellikleri	Zhang ve ark.

1.3.1. Alkali Aktivasyon Süreci

Bir veya daha fazla alüminosilikat kaynakları kombine edilmiş ve alkali aktivatörlerden oluşan sistemlere alkali ile aktifleştirilmiş sistem adı verilir. Aktivatör çözeltileri, yüksek pH değerine sahip bir ortam oluşturur (örn. hidroksitler, silikatlar, karbonatlar veya sülfatlar). Alümino-silikat kaynağı ve alkali aktivatör, kuru haldeyken önceden karıştırılır, daha sonra bu kuru bağlayıcı, bir harç veya beton üretmek için su ve agregalarla karıştırılabilir. Bundan farklı olarak, alkali aktivatör çözeltisi, alümino-silikat kaynağına ayrı olarak eklenebilir, daha sonra bu ıslak bağlayıcı, bir harç veya beton üretmek için ilave su ve agregalarla karıştırılabilir. Alternatif olarak, alümino-silikat kaynağı, alkali aktivatör, su, agrega ve katkıların, alkali ile aktifleştirilen bağlayıcıyı ayrı ayrı önceden üretmeden karıştırılmasıyla alkali aktive beton üretmek mümkündür. Şekil 11’de, alkali ile aktifleşen sistemin bileşenlerini göstermektedir [45].



Şekil 11. Alkali aktive sistemlerin bileşenleri

Alkali aktivatörler, aktive edilmiş malzemeler üretmek için alümino-silikat kaynağı ile reaksiyona sokulması gereklidir. Genellikle, alkali tuzları alkali aktive edilmiş beton için alkaline aktivatörleri olarak kullanılır. Tüm bu aktivatörler arasında sodyum hidroksit ve sodyum silikat en yaygın olarak bulunabilen kimyasallardır [46,47]. Bunların yanı sıra

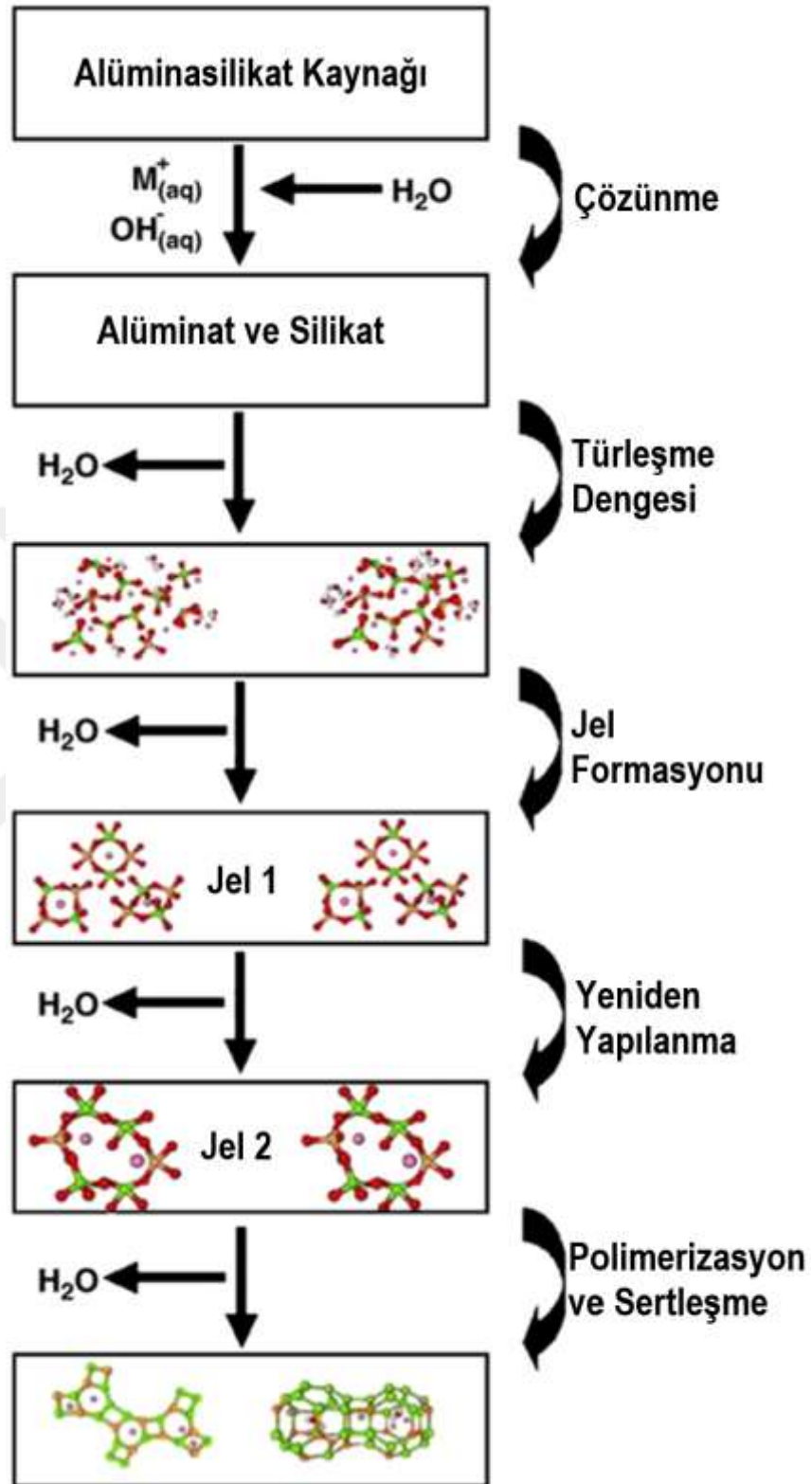
kostik alkaliler, silikatlar, zayıf asitli tuzlar, alüminatlar, alüminosilikatlar ve güçlü asitli tuzlar da kullanılabilir. Alkali aktive sistemlerde alkali aktivatörün yanında aktifleştirilen en yaygın olarak kullanılan malzemeler cüruf, uçucu kül, silis dumanı ve metakaolindir.

1.3.2. Alkali Aktivasyon Kimyası

Temelde silika ve alümin içeren alkali olarak aktive edilmiş malzemeler için genel bir reaksiyon mekanizması bulunmaktadır. Geopolimerler çoğunlukla, bağlanma fazının neredeyse tamamen alüminosilikat olduğu, en yüksek alüminyum ve en düşük kalsiyum konsantrasyonlarına sahip alkali aktif malzemelerin bir alt kümesi olarak görülür. Çözünme, difüzyon, kondensasyon ve kristalizasyon mekanizma modelinin bileşenlerini temsil eden bağlantılı reaksiyonlardır. İlk adım, alkali çözeltinin pH değeri artırıldığında oluşan Si-O-Si ve Al-O-Si bağlarının kırılması ve bu bağların kolloid faza dönüştürülmesidir. Sonuçta, pıhtılaşmış bir yapı oluşturabilmek için birbirleriyle reaksiyona giren ayrılmış ürünler birleşir ve üçüncü bir fazda yoğunlaştırılmış ve kristalize bir yapı oluşturulur. Şekil 12, alkali aktive malzemelerin geo-polimerizasyonu için basitleştirilmiş bir reaksiyon mekanizmasını göstermektedir. Bu şekil, katı bir alümino-silikatın sentetik bir alkali alümino-silikata dönüşüm sürecinin ana hatlarını sunmaktadır [48].

Granüle yüksek fırın cürufu esasen akermanit ($2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$), gehlenit ($2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) ve depolimerize kalsiyum alümino-silikat cam ile faz karışımı olarak tanımlanan $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$ sisteminden oluşur. Si^{4+} ve Al^{3+} katyonları temel camsı ağı oluşturur ve Ca^{2+} ve Mg^{2+} mevcut alkalilerle ağı için değiştiriciler olarak çalışır. Cürufun alkali hidrasyonu, cürufun başlangıçta parçalanması ve ardından reaksiyon ürünlerinin polikondensasyonunu içeren bir adımdan daha fazlasını içerir [49].

Cürufun aktive edilmesinden dolayı ortaya bir ısı açığa çıkmaktadır. Hidrasyon sürecini Na_2O içeriği ve silika modülünün etkilediği daha önce yapılan çalışmalarda görülmüştür. Na_2O ve silika modülünün daha yüksek olması hidrasyon seviyesinin de yükselmesine sebep olduğu gözlemlenmiştir. Bu işlem, cüruftaki bağların Ca-O, Si-O-Si, Al-O-Al, Al-O-Si ve Mg-O'yu yok etmesiyle başlar ve ardından cüruf parçacıkları yüzeyinin her yerinde Si-Al tabakası bulunur ve son olarak hidrasyon ürünleri oluşturulur [49].



Şekil 12. Alkali aktive malzemelerin basitleştirilmiş reaksiyon mekanizması

Alkali ile aktive edilmiş granüle cürufun reaksiyon mekanizması, yüksek CaO içeriğinden ötürü geopolimerlerden daha karmaşıktır, bu nedenle kalsiyumun polimerizasyon sürecindeki rolünü araştırmak için birçok araştırma yapılmıştır. Kalsiyumun jeopolimerik bağlanma mukavemeti üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu, reaksiyon yolunu ve hidrasyon süreç ürünlerinin fiziksel özelliklerini belirlemede önemli rollere sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca kalsiyum bileşiklerinin oluşumunun büyük oranda Si/Al oranına ve pH değerine bağlı olduğu araştırmalarda görülmüştür [49].

Alkali ile aktive edilmiş granüle cürufun hidrasyon ürünleri cüruf bileşimlerinden, alkali çözelti tipinden ve pH değerinden etkilenir. Kalsiyum silikat hidratın temel hidrasyon ürünü olduğu ve kullanılan alkali aktivatörün göz ardı edilmesi halinde kristallik miktarının düşük C/S oranıyla değiştiği gözlemlenmiştir. Aktive edilmiş cürufllu çimento hamurlarının farklı tipte alkali çözelti (NaOH ve camsuyu) ile reaksiyon ürünlerinin yapısı XRD analizi kullanılarak incelenmiştir. NaOH ile aktive edilen cüruf için tanımlanan fazların CSH, kalsiyum karbonat (CaCO_3) ve hidro-talsit ($\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) olduğu görülmüştür. Oysa cam suyu ile aktive edilen aktif cürufta hidro-talsit tespit edilmemiş ve CSH'nin görülmesi daha zor olmuştur [50].

Alkali ile aktive edilmiş cürufun NaOH ile hidrasyonu, pH kontrollü ortamlarda 25°C'de gözlemlenmiştir. Ana hidrasyon ürününün CSH olduğu, hidro-talsitin ise hidrasyonun sürecinin ilerleyen fazlarında fark edildiği, sadece yüksek pH'lı hamurlarda görüldüğü tespit edilmiştir. Ayrıca reaksiyon hızının başlangıçtaki alkali çözeltinin pH değerine bağlı olduğu ve cürufu etkin olarak aktive etmek için pH değerinin 11,5'ten daha fazla olması gerektiği de gözlemlenmiştir [49, 51].

Sadece düşük alkaliniteli sistemlerde, jeopolimerik jel ile birlikte CSH jeli oluşur. Ancak yüksek alkalilik halinde ($\text{NaOH} > 7,5 \text{ M}$), ana faz küçük kalsiyum çökeltileri içeren jeopolimerik jeldir. Başlangıçta yüksek miktarda reaktif kalsiyum yoksa iki fazın oluşumu görülmeyecektir. Cürufun alkali aktivasyonu ile ilişkili yeni bir kristal pik noktası olmadığı bildirildi. Bu nedenle kristalize CSH'nin bir ürün olmadığı veya alkali aktivasyon prosesi neticesinde oluşan baskın bir ürün olmadığı sonucuna varılmıştır [49].

Normal Portland Çimentosu ile alkaliyle aktifleştirilmiş olan çimento arasındaki farklardan biri, ilk bağlayıcıda, hidrasyon işlemi bir dizi hidratlanmamış parçacık ve çeşitli tiplerden geçerken yavaş yavaş alkaliye (12-13) dönüşen başlangıç nötr pH'ına sahip su kullanmasıdır. Kristalize CSH jeli, alkali ile aktifleştirilen bağlayıcının ise çözünme sürecini başlatmak için güçlü bir alkali çözeltisine ihtiyacı vardır. Nihai üründe iyi fiziksel ve kimyasal özellikler elde etmek için, çözünür silikanın (sodyum silikat) eklenmesi gerekir, ancak başlangıç pH'ı yüksek olduğundan bu, silikatın pıhtılaşmasını ve polimerizasyonunu önler. Primer maddelerin çözünmesi nedeniyle $\text{pH} < 14$ 'e düştüğünde çok hızlı bir şekilde yoğunlaşma meydana gelir. Daha sonra amorf bir alüminosilikat yapısında çözünmemiş alüminosilikat türlerinin nihai ürününde polisializasyon, pıhtılaşma, kolloid oluşumu ve sertleşmeden oluşan bir grup reaksiyon meydana gelir [49,52].

1.4. Literatür Taraması

Silikat ve alüminat içeren uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi beton katkı malzemeleri kullanılarak çimentosuz veya belirli oranlarda çimento kullanılarak bağlayıcı özelliği olan aktive edilmiş beton üretimi son yıllarda akademik çalışma alanında kendine yer bulmuştur. Bu konuda yapılan çalışmalarla betonun kanseri olarak bilenen alkali silika reaksiyonu üzerindeki etkileri araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Aşağıda alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların kullanıldığı betonların dayanım, dayanıklılık, içyapı ve özellikle alkali silika reaksiyonuna olan etkilerinin incelendiği literatür özeti sunulmuştur.

Kunal Kupwade-Patil ve Erez Allouche yapmış oldukları çalışmada C Sınıfı ve F sınıfı uçucu kül kullanarak geopolimerdeki ASR etkilerini gözlemlemişlerdir. Çalışmada üretilen numuneler sodyum silikat ve 14 M sodyum hidroksit aktivasyonu ile kullanılmıştır. Daha sonra numuneler 14 gün boyunca 80°C 1M NaOH solüsyonunda bekletilmiştir. Normal Portland çimento ile üretilen numunelerin boyca uzaması %0,10'u geçerken geopolimer numunelerde uzama %0,10'u geçmeyerek ASR'ye karşı dayanıklılık göstermiştir. Normalde %0,18, %0,12 ve %0,16 genleşme gösteren reaktif agrega kullanılarak üretilen numuneler uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimerde %0,024, %0,021 ve %0,031 gibi çok daha düşük genleşmeleri görmüşlerdir. ASTM C 1260 metodundaki 1M NaOH çözeltisinde bekletilme durumu 5-8 M seviyesine çıktığında geopolimer matriksinin dağıldığı da gözlemlenmiştir. Çimento kullanılarak

üretileen numunelerde 34 günlük NaOH kürü sonrası sızıntılar olurken geopolimerlerde numunelerden herhangi bir sızıntı gözlemlenmemiştir. Yapılan araştırmada geopolimerlerdeki alkalilerin aktivasyon reaksiyonuna girdiği için ASR'ye sebep vermediği ve 14 gün sonundaki genişlemenin %0,1'den aşağı olduğu görülmüştür. Buna sebep olarak ise alkalilerin uçucu külün amorf bileşenleri tarafından tutularak bağlayıcı ve zeolit kristallere dönüşmesi olduğu görülmüştür. Bazı durumlarda da beklenmedik şekilde alkalinin reaktif agregalara saldırısı görülmüştür. Ancak kalsiyum eksikliğinden dolayı genişleme gerçekleşmemiştir [53].

Raphaëlle Pouhet ve Martin Cyr 6 farklı agrega örneği (Quartz, kireçtaşı, alüvyal kum, cam kırığı vb.) malzemeler ile metakaolin esaslı alkali aktive sistem üzerinde çalışmışlardır. Metakaolin, eşdeğer alkali oranı %0,45 olan CEM I 52,5 çimento ile $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı 3.3 olan cam suyu, NaOH ve KOH aktivatör olarak kullanılmıştır. ASR numunelerindeki uzamaları ölçmek için $2 \times 2 \times 16$ cm prizmalar ve diğer testler için $2 \times 2 \times 2$ cm boyutlarında küp şeklinde numuneler dökülmüştür. Numuneler 24 saat boyunca kalıpta 20°C ve %95 nemde kür edildikten sonra kalıptan çıkarılmıştır. Daha sonra 60°C 'de %95 nemde kür edilmiştir. ASR deneyleri NFP 18-454 standardına göre yapılmıştır. 250 güne kadar ölçüm alınmıştır. Opal içeren alüvyal kumda maksimum ASR uzaması gözlemlenmiştir. Alkali aktive edilmiş sistemlerde ASR oluşmadığı normal çimento çimentosunda ise oluştuğu görülmüştür [54].

Pavel Krivenko ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada eşdeğer alkali oranı yüksek olan ve düşük olan çimento ile agrega olarak olivin, bazalt, andezit, perlit kullanmışlardır. Bu agregalardan çözünür silis oranı en yüksek çıkan perlit olmuştur. Aktivatör olarak sodyum karbonat ve sodyum metasilikat pentahidrat kullanılmıştır. Karışımlarda su/çimento oranı 0,35-0,40 arasında kullanılmıştır. Çimento/agrega oranı ise 1/2,25 olarak kullanılmıştır. $4 \times 4 \times 16$ cm boyutlarındaki numuneler basınç dayanımı için; $2,5 \times 2,5 \times 28,5$ cm boyutlarındaki numuneler ASR deneyleri için kullanılmıştır. Çalışmada alkali ile aktive edilmiş cüruf, cüruf çimento karışımı ve eşdeğer alkali oranı %1,3 olan normal çimento kullanılmıştır. Boyca en yüksek uzamalar ilk iki tipte ve agrega olarak andezit kullanılan karışımlarda oluşmuştur. Alkali ile aktive edilmiş cürufllu Portland çimento karışımı için klinker/cüruf oranı 40/60 olan numunelerde genişleme 28 gün sonunda 2,5 milimetrelere kadar çıkmıştır. Ayrıca bu çalışmada agrega tane boyutunun değiştirilmesiyle farklı kombinasyonlar denenerek deneyler de gerçekleştirilmiştir [55].

Trevor Williamson ve Maria CG Juenger çalışmalarında aktive edilmiş uçucu külde kullanılan alkalilerden dolayı oluşabilecek ASR problemlerini incelemiştir. ASR oluşma ihtimalinin çözeltilerdeki çözünmemiş alkaliler ile reaktif agregaların reaksiyona girmesiyle ortaya çıkabileceği belirtilmiştir. Çalışmada ASTM 1260 yerine 2 yıl ölçüm yapılan ASTM 1293 metodu kullanılmıştır. Bu metotta numune kabında 20 mm yüksekliğinde su bulunmakta ve suya teması olmaksızın numuneler 38°C sıcaklıkta tutulup 7 ve 28 günlük daha sonra 3, 6, 9, 12, 18, 24 ay boyunca uzama ölçümleri yapılmıştır. İlk gün 60°C’de kürlendikten sonra 38°C’ye koyulan numunelerde 7 ve 28 günlük basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Deneyler için 500g uçucu kül 1375g kum 176mL NaOH çözeltisi kullanılmıştır ve basınç dayanımı için 50×50×50 mm boyutlarında numuneler üretilmiştir. Basınç dayanımı 8 molar NaOH kullanılan numunede en yüksek değeri vermiştir. Araştırmacılar ASTM C1260 metodunda uygulanan 1 Molar NaOH çözeltinin zaten aktive edilen numunedeki aktivatör oranından daha az olduğu için bu metodun uygun olmadığı kanısına varmışlardır [56].

Zhenguo Shi ve arkadaşları silikat modülü 1.5 olan cam suyu ile aktive edilmiş cürufu çalışmalarında kullanmışlardır. Normal Portland çimentolu numuneler 24 saat kalıpta durduktan sonra 24 saat 80°C’de suya konmuş, aktive edilmiş cürufur farklı olarak 80°C buharda kür edilmişlerdir. Çalışmada ASTM C 1260 metodu kullanılmış ancak metottan farklı olarak 0, 1, 3, 5, 7, 10, 14, 28, 35, 42, 49 ve 56 günlük uzamalara bakılmıştır. Modifiye edilmiş bu metotta kum ve çakıl olarak kullanılan agregalar 1M NaOH 80°C’de suda ve buharda olmak üzere üç farklı şekilde kürlenmeye tabi tutulmuşlardır. Çalışma sonunda aktive edilmiş cüruf sistemlerinde ASR kaynaklı genleşmelerin daha az olduğu görülmüştür. ASR deneyleri yanı sıra SEM/EDX’e bakılmış, boşluk suyunda hidroksil iyon konsantrasyonunun arttığı gözlemlenmiştir [57].

Zhenguo Shi ve arkadaşları alkali aktive sistemlerde ASR’yi etkileyen aktivatörün dozajı, bağlayıcılar, agreganın yapısı ve test metodu gibi birçok faktörü ele almışlardır. Literatürde alkali dozajına dair pek fazla bir çalışma bulunmamaktadır. Çalışmada sodyum hidroksit ile aktive edilmiş cürufta alkali dozajının alkali silika reaksiyonuna etkisini gözlemlemiştir. ASTM C 1260 metodu uzamaları ölçmek için kullanılmış, SEM/EDX ile de ürünün görüntüleri incelenmiş, boşluk suyunun kimyası gözlemlenmiştir. %99 saflıkta NaOH aktivatör olarak kullanılmıştır. Ağırlıkça agrega/çimento oranı 2,25 kullanılmış, su/çimento oranı da 0,47 olarak belirlenmiştir.

Cürufun aktivasyonu yapılırken ağırlıkça %4, %6 ve %8'i oranında Na_2O içeren aktivatör kullanılmıştır. Bu sonuçlara göre %4 oranında Na_2O kullanılan numunelerde boyca uzamalar en yüksek çıkmıştır [58].

Faten Slaty ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada kaolinit kille üretilmiş çimentonun aktive edildiği ve bu sistemlerde kimyasal testler, ıslanma kuruma, asit atağı, basınç dayanımı vb. testler yapmış oldukları gibi alkali silika reaksiyonundan kaynaklanan uzamaların ölçümü için 1M NaOH çözeltisinde 40°C ve 80°C 'de bekletilerek 7, 30, 60, 90, 180. günlerdeki uzamalarına bakılmıştır. Kaolinitik kille üretilen çimento ile üretilen aktive sistem numunelerinde yapılan testlerde ASR kaynaklı çatlaklar ve jel çıkışları gözlemlenmiştir [59].

F. Puertas ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada camsuyu ile aktive edilmiş cüruf ve Portland çimentosu ile silis ve kalsiyum içeren 3 farklı agrega kullanarak numunelerde ASR gözlemlenmiştir. Harç çubukları reaktif silisli agrega kullanıldığında uzamaların Portland çimentosunda aktive edilmiş cüruf harç çubuklarından 4 kat fazla olduğu görülmüştür. Kalsiyumlu reaktif dolomit kullanıldığında uzama gözlemlenmemiştir. Alkali ile aktive edilmiş cürufu numunelerde uzamaların az olması muhtemelen portlanditin bitmesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Alkali oranının %3'ü geçtiği numunelerde ASR'ye karşı daha dayanıksız bir durum olduğu bilinse de ortamda Ca iyonunun olmayışı ASR oluşumunun önüne geçmektedir. Cam suyu çözeltisi cürufun kütlece %4 oranında kullanılmış ve $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$ oranı 1,08 olarak seçilmiştir. Aktive edilmiş cüruf harç çubuklarında her ne kadar ASTM 1260'da daha farklı bir su bağlayıcı oranı olsa da çalışılabilir olmadığı için su+çözelti/çimento oranı 0,52'ye çıkarılmıştır. Portland çimentosu ile üretilen numunelerde ise bu oran 0,47 olarak kullanılmıştır. Numuneler 14 gün boyunca 80°C NaOH çözeltisinde bekletilmiştir. Çalışmadan çıkan sonuca göre 14 günlük bir periyot alkali ile aktive edilmiş cüruf için yeterli olmadığı için bu süre 4 aya uzatılmıştır [60].

Inés García-Lodeiro, A. Y. Palomo, ve Ana Fernández-Jiménez yapmış oldukları çalışmada Portland çimentosu ile üretilen numuneler ile alkali ile aktive edilen F sınıfı uçucu kül geopolimeri karşılaştırılmıştır. ASTM C1260 metoduna göre testler yapılmıştır. Karışımlarda silisli agrega, opalin agrega ve %90 silis %10 oranında opal karıştırılarak kullanılmıştır. Uçucu kül ile aktive edilen numunelerde NaOH aktivatörü 8

M olarak kullanılmıştır. Opalin agregada ile üretilen numunelerde uzamalar gözlemlenmezken reaktif silisli agregalarda %2,4'e varan yüksek seviyelerde uzamalar gözlemlenmiştir. Bu uzamalar uçucu külün aktive edildiği numunelerde zararsız seviyelere inmiştir. Reaktif opalin agregada yüksek seviyede reaktif silis olmasına karşın Ca oranı %6 gibi çok az olduğu için genleşme gözlemlenmemiştir [61].

Wei Wang ve Takafumi Noguchi yapmış oldukları taramada şimdiye kadar yapılan çalışmalara bakarak sonuçları 3 ayrı kategoriye ayrılabilir. a) Neredeyse hiç ASR gözlemlenmeyen alkali aktive edilmiş çimento sistemleri b) ASR uzamaları gözlemlenen ancak Portland çimento sisteminden de az uzama görülen alkali aktive çimento sistemleri c) Portland çimento sistemlerinden de fazla uzama gösteren alkali aktive edilen çimento sistemleri. Başlangıcı 1908lere varan yüksek kalsiyum içeren cürufu sistemlerin aktivasyonu (C-A-S-H) Davidovits ile 1979'dan itibaren düşük kalsiyumlu uçucu kül ve metakaolinin (N-A-S-H) aktivasyonu ile yeni bir şekil almaya başlamıştır. Son yıllarda ise bu iki sistemin birleştiği hibrit sistemler ise dayanım ve dayanıklılık açısından daha çok ilgi çekmeye başlamıştır. Alkali aktive edilen çimento sistemlerinde ASR incelendiğinde aslında aktivasyon ve ASR'nin benzer mekanizmalarının bulunduğu görülmüştür. İki durum da silika bağlarının çözülmesiyle başlamaktadır. Genellikle alkali aktive edilen çimento sistemlerinde boşluk suyundaki Ca konsantrasyonu portland çimento sistemine göre daha azdır. Bunun yanı sıra Si, Al ve Na daha fazla görülmektedir. ASTM C1260 metodunda 80°C'de 14 gün 1M NaOH çözeltisinde kürlenme sonucunda ulaşılan sonuca alkali aktive edilen sistemlerde reaksiyona dışarıdan gelecek NaOH'un etki edeceği düşünülerek bu metodun kullanılmasının çok uygun olmayabileceği düşünülmektedir. Onun yerine 38°C'de tabanında belli bir miktar su bulunan numune kabıyla etüve koyularak 14 gün - 1 aydan 6 aya kadar ölçüm yapılan ASTM C227 metodunun daha uygun olabileceği düşünülmektedir. (Bu metod yaygın kullanılmadığından dolayı ASTM'ce 2018'de iptal edilmiştir.) Yapılan araştırmalara göre ASTM C1293 ve Kanada metodunun alkali ile aktive edilen çimento sistemlerinde ASR tespitinde daha etkin olduğu belirtilmiş fakat bu metodlar için 2 yıl beklenmesi gerektiğinden zaman aldığı belirtilmiştir. Yapılan bir çalışmada potasyum bazlı aktivatörün sodyum bazlı aktivatörden ASR açısından daha iyi bir performans verdiği görülmüştür. ASTM C1260'a göre yapılan bir ölçümde ise cam suyu aktivatör kullanılan bir deneyde NaOH kullanılan deneye göre uzamaların daha fazla olduğu görülmüştür.

Aktivatör dozajı %2'den %6,5'e çıkarıldığında ASR kaynaklı uzamaların arttığı gözlemlenmiştir. NaOH'un aktivatör olarak kullanıldığı sistemde %4, %6, %8 uzamaların %8 NaOH'da daha az olduğu görülmüştür. Cam suyu kullanılan sistemlerde silikat modülünün değişimi de uzamaları etkilediği görülmüştür. Diğer yan ürünlerle karşılaştırıldığında cüruf esaslı yüksek kalsiyumlu sistemlerin ASR'ye karşı daha dayanıksız olduğu görülmektedir. F sınıfı uçucu kül ve metakaolin gibi düşük kalsiyumlu sistemler ASR'ye daha dayanıklı olmaktadır. Ancak ona rağmen aktivatör olarak camsuyu kullanılan bazı sistemlerde ASR kaynaklı uzamalar olabilmektedir. Karışık olan hibrit sistemlerde ise cüruf oranı arttıkça genleşmeler artmaktadır. Normalde birçok ülkede portland çimento sistemlerinde eşdeğer alkali oranı %0,6'nın altında tutulurken söz konusu alkali aktive edilen çimento olduğunda bu durum geçersiz olmaktadır. Alkali aktivatörün dozaj ve modülünde de bir pesimum oran mevcuttur ve geopolimerde bu pesimum oranın altındaki her değer için dozaj ve modül arttıkça mekanik dayanım ve dayanıklılık artmaktadır. Pesimum oranın üstündeki her değer için ise tam tersi olarak dozaj ve modül arttıkça bu özellikler kötü yönde etkilenmektedir [62].

Alexandre Rodrigue ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada; geopolimer sistemlerindeki diğer birçok ASR üzerine olan çalışmanın 1M NaOH çözeltisinde bekletilerek yapıldığı belirtilmiştir. Bu sebepten dolayı uzamaya sebep olan etkinin gözlemlenmesi, alkali aktivasyonu ve ASR'nin birbirine karıştırılmasıyla ASR'nin tek başına araştırılamamasından bahsedilmektedir. Bu sebepten dolayı çalışmada 2 yıllık deney benimsenmiştir. Çalışmada cüruf ve F sınıfı uçucu kül kullanılmış; alkali aktivatör olarak sodyum silikat 8 M sodyum hidroksit ile birlikte kullanılmıştır. Sodyum Silikat/NaOH oranı 0,50, aktivatör/bağlayıcı oranı 0,35 olarak belirlenmiştir. Bu karışımlar %100 nemde 24 saat 80°C'de kür edilmiştir. Çalışmanın sonunda %100 Cüruf ve reaktif agrega içeren geopolimerde limit değerleri aşan uzamalar kaydedilmiştir. Cüruf ve uçucu külün birlikte kullanıldığı sistemlerde reaktif agrega %80 cüruf ve %20 oranında uçucu kül içeren sistemlerde halen limit değerinin üzerinde uzamalar görülürken uçucu kül oranının %40lara çıkmasıyla 2 yılın sonunda limit olan %0,040'ın altında kalan uzama değerleri görülmüştür [63].

Zhenguo Shi ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada cüruf, F sınıfı uçucu kül ve metakaolin aktive edilmiştir. Aktivatör olarak camsuyu kütlece modülü ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) 1,5 olarak belirlenmiştir. Karışım ağırlıkça %6 oranında Na_2O içeren camsuyu ile aktive

edilmiştir. ASTM C1260 metodu kullanılmış, su/çimento oranı 0,47 olarak seçilmiştir. Dökülen harç çubuklarında 14 günün yanı sıra 21 ve 28 günlük uzamalar da ölçülmüştür. Uçucu kül ve metakaolin %10 %30 %50 %70 oranlarında cüruflla yer değiştirmiştir. ASR açısından en olumlu sonuç uçucu külün %30 oranında ikamesinde ve metakaolinin %70 oranında ikamesinde görülmüştür [64].

Zihui Li, Robert J. Thomas, ve Sulapha Peethamparan yapmış oldukları çalışmada hızlandırılmış (16 gün) ve uzun vadeli (1 yıl) deneylerle cüruf ve C sınıfı uçucu külün aktivasyonunda ASR kaynaklı genleşmelerin ne kadar olduğunu gözlemlemiş ve test metodlarının bu genleşmeleri tespit noktasında ne kadar etkili olduğu gözlemlemiştir. Çalışmada silisli agregaların kalkerli agregalardan ASR'ye daha yatkın olduğu belirtilmiştir. Çalışmada öncelikle gerekli malzemeler kullanılıp daha sonra geri saçılmış tarama elektron mikroskobu (BSEM) ve sonra ikincil mod tarama elektron mikroskobu (SSEM) kullanılarak mikroyapıda oluşabilecek jeller gözlemlenmiştir. Böylece oluşan genleşme veya çatlağın ASR kaynaklı jelden mi olup olmadığına bakılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda hızlandırılmış testte uçucu kül kullanılarak aktive edilmiş sistemlerde reaktif agrega olmamasına karşın uzamalara sebep olduğu görülmüş, uzun vadeli deneylerde ise o kadar fazla uzamalara sebep olmadığı görülmüştür [65].

Pingping He ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada kalsiyum alüminatlı çimentonun atık cam parçacıklarıyla kullanıldığında ASR kaynaklı genleşmeleri azalttığını önceki çalışmalara dayanarak belirtmişlerdir. Kalsiyum alüminatlı çimento oranı %20'ye kadar çıkarıldığında ASR kaynaklı genleşmeleri azalttığı; %25lere çıktığında ise boyca uzamaların arttığı bunun sebebinin ise zeolit oluşumundan kaynaklı olabileceği çalışmada gösterilmiştir. Cam tozu aktive edilerek içerisindeki bol miktardaki reaktif silisten dolayı potansiyel olarak yüksek dayanıklılığa sahip beton elde edilebileceği belirtilmiştir. Cam tozunun içerisinde alümin çok az olduğundan alüminli çimento eklenerek aktive edilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Çalışmada agrega olarak cam parçaları ve geopolimer olarak %100 cam tozu ve sonra %10, %15, %20, %25 oranında CAC (kalsiyum alüminatlı çimento) kullanılmış ve 28 güne kadar ASTM C1260'a göre boyca uzamalar ölçülmüştür [66].

Mijia Yang, Shree Raj Paudel, ve Eric Asa yapmış oldukları çalışmada %9 Na₂O, %28 Si₂O ve ağırlıkça %63 sudan oluşmakta olan sodyum silikat ile uçucu külü %98 saflıkta

sodyum hidroksit çözeltisi ile aktive edilmiştir. Aktivatör modülü 1,4; %12 Na_2O , sıvı/katı oranı 0,3; bağlayıcı/kum/agrega oranı 1:2:3 olarak belirlenmiştir. Çalışma kısaca özetlenecek olursa üretilen beton küplerin içinde oluşan boşluk yapısı ve X,Y,Z koordinatlarında gerçekleşen uzamalara bakılmıştır. Deneyler herhangi standart bir metoda göre yapılmadığı için çıkan sonuçlar herhangi bir limit sınırla karşılaştırılamamıştır [67].

Jiménez Fernández Ana, Inés García-Lodeiro, ve A. Palomo çalışmalarında F sınıfı uçucu külün aktivasyonu ile beton içerisine nüfus eden deniz suyu, sülfat, asitler ve alkali silika reaksiyonu ele alınmıştır. Çalışmada kullanılan uçucu külün %90'ı 45 mikron altı %50'si ise 10 mikron altı olarak seçilmiştir. ASTM C1260 metoduna göre hızlandırılmış harç çubuk testleri yapılmıştır. İki ayrı çözelti kullanılmış; ilki için çözelti/uçucu kül oranı 0,47 ikincisi için bu oran 0,64 olarak seçilmiştir. Sonuç olarak Portland çimentosuna nazaran aktive edilmiş uçucu külle üretilen harç çubuklarının ASR'ye karşı daha dayanıklı oldukları görülmüştür [68].

Ricarda Tänzer, Jin Yu, ve Stephan Dietmar yapmış oldukları çalışmada modifiye edilmiş bir metot ile alkali silikat çözeltisi modülü 0,5, 0,75, 1,0 ve 2,0 olan çözeltiyle %75i standart kum, %25i cam tanecikleri(reaktif) olan agrega ile alkali aktive edilmiş cüruf sistemi kullanılarak ASR'nin etkileri araştırmışlardır. Çalışmanın sonuçlarına bakıldığında aynı alkali konsantrasyonunda dahi sonuçların farklılık gösterdiği görülmüştür. Genel olarak daha düşük silika modülüne sahip aktivatörlerde ASR riski daha az olduğu görülmektedir. Bu konuda daha çok çalışmanın cürufun aktivasyonuna ait reaksiyon kinetiği ve ASR için gerekli olduğu ve 0,75 modülü olan potasyum silikat aktivatörün daha az büzülme ve uzama eğiliminde olduğundan dolayı uygun olabileceği belirtilmiştir [69].

Zhenguo Shi ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada aktive edilmiş cüruf numunelerde silikat modülü ve alkali dozajının hızlandırılmış harç çubuğu metodu ile ASR üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Aktivatör olarak kütlece silikat modülü 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 olan camsuyu %99 saflıkta NaOH katılarak kullanılmıştır. Cüruf, farklı alkali dozajlarında kütlece %4, %6 %8 Na_2O kullanılarak NaOH ve camsuyu ile aktive edilmiştir. 28 gün boyunca uzama ölçümleri alınmıştır. Sonuçlara bakıldığında genellikle NaOH ile aktive edilmiş karışımlar belirli bir dozajda camsuyu ile aktive edilen çubuklara

göre daha az uzama eğilimindedir. Çalışmada görülen başka bir şey ise alkali dozajının ASR'ye olan etkisinin silikat modülünden bağımsız olmadığıdır. 1,5 2,0 gibi yüksek silikat modüllerinde alkali dozajı arttıkça ASR etkisi artmakta; tam tersi olarak 1,0 1,5 gibi düşük silikat modüllerinde alkali dozajının artması ASR kaynaklı genleşmeleri azaltmaktadır [70].

D. Mahanama ve arkadaşları uçucu kül/cüruf oranı kütlece 9/1, 4/1, 1/1 oranlarında kullanılarak çimentoyla birlikte aktive edilmesiyle ASR'ye olan etki araştırılmıştır. Metot olarak her ne kadar farklı bir metodun geliştirilmesi önerilse de ASTM C1260 kullanılmıştır. 160 gün boyunca ölçümler alınmıştır ve hiçbir aktive edilmiş numune örneği ilk 21 gün sonunda standartta belirtilen kritik seviyeyi geçmemiştir. 160 günün sonunda ise normal Portland çimentosuyla dökülen harç çubukları en fazla uzamayı gösterirken Uçucu kül/Cüruf oranı 9 olan numune en az uzama göstermiş uçucu kül/cüruf oranı 1 olan numuneler ise oranı 9 olan numunelerden daha fazla uzama göstermiştir [71].

Jagmeet Singh ve S. P. Singh yapmış oldukları çalışmada alkali miktarı %4, %6, %8, %10 ve silikat modülü 1,0, 1,25, 1,50 olan aktivatörle aktive edilmiş bakır kaynaklı cürufu kullanılmıştır. ASTM C1260 metodu kullanılarak yapılan ölçümlerde uzamaların normal portland çimentoyla üretilen numunelerin tamamında aktive edilmiş bakır cürufu numunelerinden daha çok olduğu görülmüştür. %4 ve %6 alkali miktarı olan numunelerde ASTM C1260'da belirtilen %0,10 değerinden daha düşük; %8 ve %10 alkali miktarı ile aktive edilen bakır cürufu geopolimer numunelerinde uzama değeri bu değerden fazla çıkmıştır. İdeal olarak alkali miktarı %6 ve silikat modülü 1,50 olan aktivatör kullanılması ASR açısından uygun olacağı belirtilmiştir [72].

Abdolhossein Naghizadeh ve Stephen O. Eklü yaptıkları çalışmada uçucu kül bazlı geopolimerde sıvı/katı oranı 0,3-0,6 oranında değişen aktivatör ile aktive edilmesiyle üretilen numunelerin özelliklerini araştırmışlardır. Farklı kombinasyonlarda sodyum silikat ve sodyum hidroksit 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 ve 3,0 oranlarında kullanılmıştır. Sodyum hidroksit konsantreleri 10M, 12M ve 14M NaOH olarak değişmektedir. Toplamda 46 karışım yapılmıştır. Yüksek oranda reaktif olan 2 tipte agrega kullanılmıştır. Çıkan sonuçlar sıvı/katı oranının ASR uzamalarını etkileyen en önemli faktör olduğunu göstermektedir. Sıvı/katı oranı 0,5 olan karışım en yüksek ASR uzamasına sebep olmuştur. Bu çalışmada ASTM C1260 metodu kullanılmıştır. Çalışmadan çıkan

sonuçlara bakıldığında ASR kaynaklı uzamaların sadece NaOH oranıyla değil aynı zamanda sıvı/katı oranı ve sodyum silikat/sodyum hidroksit oranıyla da ilgili olduğu görülmektedir. Sodyum silikat/Sodyum hidroksit oranı 1,0'dan 3,0'a arttıkça ASR uzamaları artmıştır. Sıvı/katı oranı 0,3'ten 0,6'ya arttıkça ASR uzaması artmıştır. NaOH konsantresi 10M'dan 14M'a arttıkça ASR uzamaları artmıştır [73].

Motoki Uehara, Takatsune Sato ve Atsushi Yamazaki yapmış oldukları çalışmada sodyum ve potasyum iyonlarıyla lityum iyonlarının yer değiştirmesinin ASR'yi engelleyici etki göstereceğinden bahsedilmektedir. Ancak bunun pahalı bir metot olacağından dolayı Na ve K'nın hidrojen iyonlarıyla yer değiştirmesinin daha uygulanabilir olacağı belirtilmiştir. Direkt H^+ tipi geopolimer üretmenin tek aşamada olamayacağından dolayı öncelikle Na tipi geopolimer üretilmiştir. Daha sonra sülfürik asit ile kürlenip H^+ tipi geopolimer elde edilmiştir. Daha sonra NaCl ve KCl ile tekrar pH düşürülmüştür. Böylelikle ASR etkileri hafifletilmiştir. Çalışmada ilerisi için çalışılabilecek bazı konular bulunmaktadır. Uçucu külden daha yüksek Al/Si oranı olan metakaolin daha yüksek iyon değiştirme kapasitesi olabileceği belirtilmektedir. Çalışmaya göre Si/Al oranı 0,10-0,25 arası olan numunelerin iyon değiştirme kapasitesinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Yani metakaolin bazlı H^+ tipi geopolimerler ASR'yi daha iyi engelleyebileceği düşünülmektedir [74].

Ana Fernández-Jiménez ve F. Puertas yapmış oldukları bir çalışmada cürufun ağırlıkça %4'ü kadar Na_2O kullanılarak aktive edilmiş cüruf esaslı numuneleri ASTM C1260 metoduna göre test edilmiş ve ASR kaynaklı genleşmelerin her ne kadar normal portland çimentosundan az da olsa gözlemlendiği görülmüştür. Sonuç olarak hızlandırılmış test metodunun uygun olmadığı da belirtilmiştir. Reaksiyonu gözlemleyebilmek için standardın belirttiği 16 gün yerine 140 gün ölçümler devam etmiştir. Bu çalışmada farklı olarak aynı tip numuneler standardın belirttiği 1M NaOH çözeltisinde ayrı; saf su içerisinde ayrı olarak küre tabi tutulmuşlardır [75].

Shi, Caijun ve arkadaşları yapmış oldukları derlemede bazı araştırmacıların alkali aktive edilen cüruf sistemlerinde ASR'nin mümkün olmadığını bunun sebebinin alkalilerin %80'den fazlasının başka hidratasyon reaksiyonlarına girdiği belirtilmişlerdir. Bazı araştırmacılar ise ASR'nin gerçekleştiğini fakat diğer geleneksel çimento sistemlerinden daha az şiddetli olduğu belirtmişlerdir. Bunun sebebinin ise CASH ve NASH'de bulunan

düşük Ca/Si oranından kaynaklandığı belirtilmektedir. Bazı çalışmalarda alkali aktive edilmiş sistemlerde ASR olmayacağı bahsedilirken bazı çalışmalarda ise tam tersi olarak aktive edilmiş cüruf sistemlerinde normal çimentoyla üretilen numunelerden daha fazla ASR kaynaklı genleşmelerin olabileceği belirtilmiştir. En çok ASR'ye sebep olan aktivatörün Na_2SiO_3 ve sonra sırayla Na_2CO_3 , Na_2SO_4 ve NaOH olduğu bilgisi de yer almaktadır [76].

Mukund Lahoti ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada alkali reaktif olan tortul kayaçlar kullanılmıştır. Bu kayaçlar normal betonda ASR'den dolayı kullanılamamasına karşın alkali aktivasyon metoduyla kullanılabileceği gösterilmiştir. Bu aktivasyonla %67 oranında kayaç toz haline getirilip %33 oranında metakaolinle birlikte aktive edilmiş ve 80 MPa'ya varan yüksek dayanım değerlerine ulaşılmıştır. Saf %100 aktive edilmiş metakaoline göre kayaç tozuyla aktive edilen sistemler %15-30 oranında daha yüksek dayanıma ulaşmışlardır. Bu çalışmada 0,3'ten 120 μm 'e kadar olan reaktif tortul kayaç tozu kullanılmıştır [77].

Tao Yang ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada yüksek magnezyum içeren nikel cürufunun (HMNS) kullanımının ASR açısından riskli olup olmadığını incelemişlerdir. Bu çalışmada yüksek fırın cürufu, uçucu kül, portland çimentosu ve yüksek magnezyumlu nikel cürufu numunelerin üretiminde karıştırılarak kullanılmıştır. Aktivatör olarak NaOH kullanılmış olup, cüruf ile uçucu kül %50 oranlarında karıştırılarak geopolimer üretilmiştir. Geopolimerlerde işlenebilirliğin iyi olabilmesi için sıvı/katı oranı 0,55 olarak belirlenmiştir. Geopolimerlerde agrega olarak kum ve HMNS kullanılmıştır. Portland çimentosuyla ise aktivatör yerine su ile kum ve HMNS kullanılmıştır. Reaktif kumun %50 cüruf %50 uçucu kül kullanılarak elde edilen geopolimerde %0,101 oranında genleşmeye sebep olduğu; portland çimentosuyla ise %0,586 oranında ciddi bir genleşmeye sebep olduğu gözlemlenmiştir. HMNS'nin kullanımında geopolimerde 14 gün sonunda -%0,067 oranında uzamaya portland çimentosuyla ise -%0,006 uzamaya sebep olduğu görülmüştür. Sonuç olarak geopolimerde HMNS kullanımının SEM görüntüleri de incelendiğinde HMNS'den ayrılan Al parçacıklarının HMNS yüzeyinde sağlam bir ASR jel tabakası oluşturduğu ve bu tabakanın çözünmüş silikanın geçişini engellediğinden dolayı alkali atağına karşı koruma sağladığı görülmüştür. Portland çimentosu ile dökülen numunelerde ise HMNS'nin puzolanik reaksiyonundan dolayı karışımdaki portlanditi tükettiği, buna bağlı

olarak kalsiyum oranı ve alkalinite de düşüş yaşanarak ASR'nin azaltıldığı gözlemlenmiştir [78].

Hassan Rashidian-Dezfouli ve Prasada Rao Rangaraju yapmış oldukları çalışmada öğütülmüş cam elyaf ve uçucu kül geopolimerlerin belirli parametrelerinin alkali silika reaksiyonuna etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada geopolimerler için ASR etkilerini gözlemlemek için standart bir deney metodu olmadığı için iki farklı deney metodu kullanılmış, 70 gün boyunca uzama ölçümleri alınmıştır. İlk metot ASTM C1260'a benzer bir şekilde uygulanmış, ikinci metotta ise 1M NaOH çözeltisinin geopolimerdeki geopolimerizasyonu beslememesi için numuneler bir kutuda su yüzeyinin üzerinde 80°C'de buharla kür edilmiştir. Bu çalışmada farklı reaktif agregalar kullanılarak agreganın etkisi ve farklı kür şartlarıyla kür şartlarının etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak çimentolu numunelerden geopolimerlerin ASR açısından daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Ancak çalışmada alternatif olarak kullanılan buhar metodu ASR gelişimini nasıl etkilediğini net bir şekilde ifade edemediğinden çok başarılı olduğu söylenememiştir [79].

Khan ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada ASR açısından riskli olan atık cam parçacıklarını agrega olarak kullanmışlardır. Dört farklı karışım ASTM C1293 standardına göre 1 yıl bekletilerek sonuçlar alınmıştır. Cam parçacıkları aktive edilmiş portland çimentosuyla ve aktive edilmiş yüksek fırın cüruf esaslı çimento ile birlikte agrega olarak kullanılmış ve 1 yılın sonunda standardın belirtmiş olduğu kritik değer olan %0,04 sınırını sırasıyla %0,21 ve %0,13 olacak şekilde aşmışlardır. Aynı şekilde atık cam parçaları yalnız F sınıfı uçucu kül ve uçucu külle cüruf karışımının aktive edildiği karışımlarda agrega olarak kullanılmış ve sınır değer in oldukça altında sonuçlar ortaya çıkarak ASR açısından riskli bir duruma sebebiyet vermemiştir. Alkali aktivasyonu için 8 M NaOH ve sodyum silikat kütleye %29,4 SiO₂, %14,7 Na₂O, ve %55,9 H₂O kullanılmıştır. Cam parçacıkları ince agrega olarak, kaba agrega olarak granit parçaları kullanılmıştır. Yapılan çalışmada ASR açısından en iyi değerleri %60 oranında cüruf ve %40 oranında uçucu külle aktive edilen numuneler boyca uzaması %0,015 olarak göstermişlerdir. Aynı zamanda SEM görüntülerinde portland çimentosu ve aktive edilmiş cüruf numunelerinde agrega olarak kullanılan cam yüzeylerinde ASR kaynaklı zarar görüldüğü kolaylıkla gözlemlenebilmektedir [80].

Türkiye’de ASR üzerine yapılmış bir çalışmada beton içerisinde kullanılması risk içeren agregaların yerleri tespit edilmiş bu kaynakların araştırılması yapılmış listesi Tablo 4’de gösterilmiştir [81].

Tablo 4. Türkiye'nin çeşitli yörelerinden alınan agregaların reaktivitesi

Agreganın Alındığı Yer	14 Günlük Hızlandırılmış Deney Sonucu (% Uzama)	Reaktif / Reaktif Değil / Şüpheli
Kızılırmak Havzası / Korgun Özçay Deresi / Çankırı	0,332	Reaktif
Bergama / İzmir	0,070	Reaktif Değil
Ceyhan Nehir Havzası/ Çakıt Deresi/Karaisalı-Adana	0,194	Şüpheli
Kızılırmak Havzası / Korgun Kartepe Deresi /Çankırı	0,454	Reaktif
Kızılırmak Havzası / Konak Deresi / Çankırı	0,353	Reaktif
Kızılırmak Havzası / Aktepe Köyü/ Avanos-Nevşehir	0,267	Reaktif
Kızılırmak Havzası / Doğantepe Köyü / Çankırı	0,347	Reaktif
Çoruh Nehri Havzası / Bayburt	0,216	Reaktif
Filyos Çayı Havzası / Çaycuma- Zonguldak	0,337	Reaktif
Mollaköy / Erzincan	0,163	Şüpheli
Gediz Nehri Havzası / Sancaklı İğdecik -Manisa	0,152	Şüpheli
Dağbelen Köyü / Bodrum- Muğla	0,005	Reaktif Değil
Bartın Nehri Havzası / Terkehaliller	0,281	Reaktif
Dicle Nehri kumtaşı / Bismil-Diyarbakır	0,406	Reaktif
Filyos Çayı Havzası / Çaycuma- Zonguldak	0,175	Şüpheli
Cebeci Taş ocağı / Dereboyu- İstanbul	0,074	Reaktif Değil
Saadet Köyü /Afyonkarahisar	0,023	Reaktif Değil
Bozköy Bölgesi /Manisa	0,165	Şüpheli
Konya Yolu 13. Km / Afyonkarahisar	0,011	Reaktif Değil
Bulancak/Giresun	0,056	Reaktif Değil
Köşebucağı / Ordu	0,164	Şüpheli
Erdek / Balıkesir	0,089	Reaktif Değil
Sakarya Nehri Havzası Selçuk Köyü / Bilecik	0,785	Reaktif
Horozgediği Bölgesi / Aliğa - İzmir	0,026	Reaktif Değil
Selçuklu / Konya	0,007	Reaktif Değil
Aksu Nehri Havzası / Narlı- Kahramanmaraş	0,203	Reaktif
Bögecik Köyü Ayrancı / Karaman	0,009	Reaktif Değil
Yeşilçay Nehri Havzası /Şile İstanbul	0,501	Reaktif
Topluca Köyü / Bartın	0,014	Reaktif Değil
Umurbey Barajı Gökköy / Lapseki - Canakkale	0,102	Şüpheli
Ekşisu Bölgesi / Erzincan	0,193	Şüpheli
Yeşilirmak Havzası / Çarşamba Samsun	0,405	Reaktif

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

Bu çalışmada öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile alkali aktivasyonlu harç üretilmiştir. Alkali aktivasyon ile üretimi yapılan yüksek fırın cürufu harçlar üzerinde farklı aktivatör tiplerinin belirli sodyum konsantrasyonundaki dayanım, dayanıklılık ve alkali silika reaksiyonu özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Alkali ile aktive edilen harç üretiminde öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Aktivatör olarak sodyum metasilikat (Na_2SiO_3), sodyum hidroksit (NaOH) ve sıvı halde bulunan sodyum silikat ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) ayrı ayrı kullanılmıştır. Bu çözeltilerdeki sodyum (Na) oranı %6, %8 ve %10 olarak belirlenmiştir. Çalışmada hazırlanan harç numuneleri için kür sıcaklığı oda sıcaklığı olarak belirlenmiş ve numunelerin tamamı kalıptan çıkana kadar %95 nem olan ortamda 1 gün bekletilmiştir. Sonrasında ASTM C1260 standardının şartlarına göre 1 gün boyunca su içerisinde 80°C sıcaklıkta bekletilmiş, sonrasında bütün deneyler için 1M sodyum hidroksit çözeltisi içerisinde kürleme yapılmıştır. Deneylerde kullanılan malzemeler, deneylerin karışım oranları, harcın üretimi ve kürlemesi ile deney yöntemleri aşağıda verilmiştir.

2.1. Malzemeler

2.1.1. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Bu çalışmada Hatay'ın İskenderun ilçesinde faaliyet gösteren İSDEMİR Demir Çelik Fabrikasının artık ürünü olarak ortaya çıkan granüle öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Kullanılan cüruf 45 mikronluk eleklerden elenmiş ve özgül ağırlığı $2,89 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Yüksek fırın cürufunun puzolanik aktivite indeksi yapılan deneylerde 7 gün için %50, 28 gün için ise %85 olarak bulunmuştur. Cürufun baziklik katsayısı 0,84'dir.

Bu değeri hesaplanırken cüruf içerisinde bulunan CaO ile MgO toplamının SiO₂ ile Al₂O₃ toplamına bölünmesi ile bulunmuştur. Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezine (TAUM) cüruf numunesi gönderilmiş ve yapılan kimyasal analizde Tablo 5’de gösterilen değerlere ulaşılmıştır.

Tablo 5. Yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	Bileşenler (%)
SiO ₂	39,271
CaO	34,236
Al ₂ O ₃	10,043
MgO	7,126
ZnO	0,008
NiO	0,006
Fe ₂ O ₃	1,478
Mn ₃ O ₄	1,953
Cr ₂ O ₃	0,018
V ₂ O ₅	0,021
BaO	0,223
TiO ₂	0,548
K ₂ O	0,757
SO ₃	0,923
ZrO ₂	0,013
P ₂ O ₅	0,040
SrO	0,073
Na ₂ O	0,298
Kızdırma Kaybı	2,965

2.1.2. Çimento

Çalışmadaki referans olarak belirlenen harç numunelerinde TS EN 197-1 [82] standardında belirtilen kriterlere uygun nitelikte olan CEM I 42,5R Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 6 ve Tablo 7’de belirtilmiştir.

Tablo 6. Çimentonun fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	Özellik
Özgül ağırlık	3,12
Blaine özgül yüzey, cm ² /g	3970
Normal kıvam su ihtiyacı, %	28,1
Priz başlangıcı, dakika	137
Priz sonu, dakika	223

Tablo 7. Çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	Değer (%)
CaO	61,12
SiO ₂	19,73
Al ₂ O ₃	7,23
MgO	1,49
SO ₃	2,66
Fe ₂ O ₃	3,97
K ₂ O	0,58
Na ₂ O	0,14
TiO ₂	0,26
Kızdırma Kaybı	2,82

2.1.3. Reaktif Agregası

Çalışmada yaklaşık 650 kilogram reaktif agregası Nevşehir İline bağlı Kızılırmak Nehri kenarında kurulu olan iki farklı lokasyonda bulunan kum ocaklarından temin edilmiştir. Bu iki farklı kum ocağı lokasyon olarak birbirine çok yakın noktalarda bulunmaktadır. Agregaların tamamı nemli olduğundan dolayı öncelikle 105±5°C’de bulunan etüvde 24 saat bekletilerek içerisinde muhteva etmiş olduğu nemden tamamen arındırılarak kuru hale getirilmiştir. Daha sonra kurutulan agregası ASTM C1260 metodunda belirtilen uygun gradasyona getirilmiştir. Reaktif agregada yapılan deneyler neticesinde agreganın bağıl yoğunluğu 2,27 olarak bulunmuştur. Bu sebepten dolayı ASTM C1260 standardında geçen bağımtya göre 440 g bağlayıcı için 848,03 g reaktif agregası kullanılmıştır. Deneyler

için kritik önem taşıyan reaktif agreganın lokasyonunun tespiti ve reaktifliğinin deneylerle ortaya konması çalışma için kritik rol oynamaktadır. Aşağıda karışımlar için kullanılacak reaktif agreganın standartta geçen gradasyonu tablosu Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. ASTM C 1260 reaktif agrega gradasyonu

Elek boyutu		Kütlece %
Geçen	Kalan	
4,75 mm	2,36 mm	10
2,36 mm	1,18 mm	25
1,18 mm	600 μ m	25
600 μ m	300 μ m	25
300 μ m	150 μ m	15

0 - 4,75 mm aralığında olan agreganın temin edilmesine dair görsel Şekil 13’de, reaktif agreganın elendiği elek seti Şekil 14’de verilmiştir.



Şekil 13. Agreganın Kızılırmak nehir kenarından temini



Şekil 14. Reaktif agrega ve elek seti

Reaktif agreganı eleme işlemi Şekil 15’de ve agregaların elendikten sonra çaplarına göre ayrıştırılma işlemleri Şekil 16’da verilmiştir.



Şekil 15. Agregaleleme işlemleri



Şekil 16. Reaktif agreganın boyutlarına göre ayrıştırılması

2.1.4. Aktivatörler

Çalışmada aktivatör olarak toz halinde bulunan sodyum metasilikat (Na_2SiO_3), beyaz pul halinde bulunan sodyum hidroksit (NaOH) ve sıvı halde bulunan sodyum silikat ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) ayrı ayrı kullanılmıştır. Kullanılan sodyum metasilikat susuz anhidrat olarak 25 kilogramlık torbalarla temin edilmiştir. Sodyum hidroksit ise piyasada kostik olarak bilinmekte ve %99 saflıkta 25 kilogramlık torbalarla beyaz pul halinde temin edilmiştir. Son olarak sıvı sodyum silikat ise 30 litrelik bidonlarla temin edilip karışımlarda kullanılmıştır.

Susuz anhidrat olarak kullanılan sodyum metasilikata (Na_2SiO_3) ait görsel Şekil 17’de, fiziksel ve kimyasal analizleri Tablo 9’da verilmiştir.



Şekil 17. Sodyum metasilikat

Tablo 9. Sodyum metasilikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri

Fiziksel ve Kimyasal Özellikler	Değer
Mol oranı	1,0
SiO ₂ (%)	47
Na ₂ O (%)	50
pH	>12,5
Kuru madde (%)	97
Yoğunluk (g/l)	1,100
Erime noktası (°C)	1089
Çözünmeyen kalıntı (%)	<0,004
Fe (ppm)	<100
Görünüş	Beyaz granüle
Bulanıklık (Saf suda %1 çözelti)	Maks 1,0

Harç üretiminde kullanılan sıvı sodyum silikat ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) ait görsel Şekil 18’de; analiz sonuçları ise Tablo 10’da verilmiştir.



Şekil 18. Sıvı sodyum silikat

Tablo 10. Sıvı sodyum silikatın kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	Değer
ZnO	0,037
Fe ₂ O ₃	0,090
Cr ₂ O ₃	0,006
V ₂ O ₅	0,002
BaO	0,005
CaO	0,108
SO ₃	0,089
SiO ₂	24,027
Al ₂ O ₃	0,364
Na ₂ O	12,458
Kızdırma Kaybı	62,814

Harç üretiminde kullanılan sodyum hidroksite (NaOH) ait görsel Şekil 19’da analiz sonuçları ise Tablo 11’de verilmiştir.



Şekil 19. Sodyum hidroksit (NaOH)

Tablo 11. Sodyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	Değer
NaOH	%99±1
Na ₂ CO ₃	%0,1
NaCl	500ppm
SiO ₂	5,0ppm
Al ₂ O ₃	2,0ppm
CaO	<0,5ppm
Na ₂ ClO ₃	60,0ppm
Na ₂ SO ₄	9,0ppm
Ni	5ppm
Fe	15ppm
Hg	0
Ağır metaller	Eser miktarda

2.1.5. Su

Numune üretiminde ve kürlemede ASTM C 1260 standardı içerisinde bahsi geçen ASTM D1193 [83] standardında tip 4 olarak belirtilen saf su kullanılmıştır.

2.2. Deneylerin Tasarımı

Deneylere başlamadan önce çeşitli ön denemeler yapılmıştır. Çalışmanın temel amacı olan aktivatör tipi ve alkali dozajının alkali silika reaksiyonu gelişimi üzerindeki etkisi ve zararlı etkilerin engellenmesi üzerine olduğundan dolayı numunelerin dökümünde öncelikli olarak ASTM C 1260 standardına uygun olarak harç çubuğu numuneleri dökülmüştür. Sadece alkali silika reaksiyonu için hızlandırılmış harç çubuğu deneyi değil geriye kalan diğer deneylerde de kür süresi, sıcaklık ve nem şartları için ASTM C 1260 standardında geçen kürleme şartlarına uyulmuştur. Bu sebepten dolayı ön denemeler yapıldıktan sonra alkali dozajlarına karar verilmiştir.

Ön deneme çalışmaları sonucunda bağlayıcı olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu aktivatör olarak sodyum metasilikat, sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat ile aktive edilerek en iyi dayanım ve dayanıklılık değerlerine ulaşılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda dayanım deneyleri olarak birim ağırlık deneyi, eğilme dayanımı, basınç dayanımı deneyleri ve ultrasonik atımlı dalga hızı deneyi yapılmıştır. Dayanıklılık deneyleri olarak işlenebilirlik (kıvam tayini), su emme ve boşluk oranı, kılcal su emme, hızlandırılmış harç çubuğu deneyleri yapılmıştır. Çalışmanın merkezinde aktivatör tipi ve alkali dozajının alkali silika reaksiyonuna etkileri olduğundan dolayı öncelikle hızlandırılmış harç çubuğu deneyleri yapılmış ve bu deney sonuçları alındıktan sonra diğer deneylere devam edilmiştir. Ayrıca karışımların içyapıları da bu parametre açısından önem arz ettiğinden dolayı X ışını kırınım yöntemi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ve element haritalama analizleri de yapılmıştır.

Yapılan deneylerde bir adet referans numune çimento ile üretilmiş ve agrega olarak standart kum yerine reaktif agrega kullanılmıştır. Diğer numunelerde ise öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu aktive edilerek deney işlemleri gerçekleştirilmiştir. Aşağıda dayanım ve dayanıklılık deneylerinin tasarımı verilmiştir.

2.2.1. Dayanım Deneylerinin Tasarımı

- i. Su/bağlayıcı oranı ASTM C1260 standardında belirtildiği üzere 0,47 olacak şekilde üretilen harç karışımları için %6, %8 ve %10 oranlarında Na içeren üç farklı aktivatör ile harç numunelerinin üretimi tasarlanmıştır.
- ii. %6, %8 ve %10 oranlarında sodyum içeren ve yüksek fırın cürufu ile üretilen harç numunelerinin üç farklı aktivatörle ile aktivasyonu için, 24 saat boyunca 23°C ve %95 nem bulunan iklimlendirme kabiniinde şartlanması sağlanmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler 24 saat boyunca 80°C suda bekletildikten sonra 1M NaOH çözeltisi içerisine konulmuştur. Referans numune dahil olmak üzere toplam 10 grup numune tasarlanmıştır.
- iii. 9 grup numune %6, %8 ve %10 sodyum içerecek şekilde sırasıyla sodyum metasilikat (Na_2SiO_3), sodyum hidroksit (NaOH) ve sıvı halde bulunan sodyum silikat ($\text{Na}_2\text{n.SiO}_2$) ile aktive edilmiştir.
- iv. Referans olarak alınacak numunede reaktif agrega ile birlikte bağlayıcı olarak CEM I 42,5R sınıfı çimento kullanılmış ve ASTM C 1260 şartlarında kürlenmiştir. Dayanım deneyleri için referans numune 14 ve 28 gün boyunca küre tabi tutulup deneyleri gerçekleştirilmiştir.
- v. Her bir karışım oranı için üçer adet numune üretilmiştir. Dayanım deneyleri için 40×40×160 mm boyutlarında prizmatik numuneler üretilmiş ve referans numunesi haricinde alkali ile aktive edilmiştir.
- vi. Üretilen numunelerde 3 adet numune 14 ve 28 günlük olduklarında birim ağırlık deneyleri tartılarak yapılmıştır.
- vii. Her bir ayrı karışım için üretilen numuneler kür süreleri sonunda birim ağırlık deney, ultrasonik atımlı dalga hızı tayini, eğilme dayanım deney ve eğilme dayanımı deneyleri yapıldıktan sonra ikiye bölünen numunelerde basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.

2.2.2. Dayanıklılık Deneylerinin Tasarımı

Dayanıklılık deneyleri kapsamında bulunan alkali silika reaksiyonu deneyi çalışmanın odağında bulunduğundan dolayı öncelikle bu deney için 25×25×285 mm boyutlarında harç çubukları üretilerek deneyler gerçekleştirilmiş ve çıkan sonuçlara göre dayanım deneylerine devam edilmiştir.

- i. Yüksek fırın cürufunu sodyum metasilikat ile aktive etmek amacıyla 3 farklı sodyum (Na) oranı (%6, %8 ve %10); numunelerin kalıplara döküldüğü andan itibaren 23°C sıcaklık ve %95 nem, kalıplardan çıkarıldıktan sonra 80°C su içerisinde 24 saat boyunca ve sonrasında her deney için farklı sürelerde 80°C çözelti içerisinde 3 farklı grup halinde numune üretimi yapılmıştır.
- ii. Yüksek fırın cürufunu sodyum hidroksit ile aktive etmek amacıyla 3 farklı sodyum (Na) oranı (%6, %8 ve %10); numunelerin kalıplara döküldüğü andan itibaren 23°C sıcaklık ve %95 nem, kalıplardan çıkarıldıktan sonra 80°C su içerisinde 24 saat boyunca ve sonrasında her deney için farklı sürelerde 80°C çözelti içerisinde 3 farklı grup halinde numune üretimi yapılmıştır.
- iii. Yüksek fırın cürufunu sıvı sodyum silikat ile aktive etmek amacıyla 3 farklı sodyum (Na) oranı (%6, %8 ve %10); numunelerin kalıplara döküldüğü andan itibaren 23°C sıcaklık ve %95 nem, kalıplardan çıkarıldıktan sonra 80°C su içerisinde 24 saat boyunca ve sonrasında her deney için farklı sürelerde 80°C çözelti içerisinde 3 farklı grup halinde numune üretimi yapılmıştır.
- iv. Referans numunesi için CEM I 42,5R Portland çimentosu ile harç üretimi yapılırken harç numunelerinin içerisine standart kum yerine Kızılırmak Nehrinden getirilen belirli gradasyonu olan reaktif agrega kullanılmıştır.
- v. Üretilen harç gruplarının tamamında su emme ve boşluk oranı, kılcal su emme, hızlandırılmış harç çubuğu deneyleri uygulanmıştır.

2.3. Karışım Oranları

Yapılacak olan deneyler kapsamında dayanım ve dayanıklılık deneyleri için öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile çimento kullanılan referans harcından oluşan toplamda 10 farklı grup harç tipi bulunmaktadır. Farklı aktivatörler kullanılarak aktive edilmiş harçlarda su/bağlayıcı oranı standartta belirtildiği gibi 0,47 olarak belirlenmiştir. Reaktif agreganın bağıl yoğunluğu yapılan deneyler sonucunda 2,27 olarak elde edilmiştir. ASTM C 1260 standardındaki şartlar gereği bağıl yoğunluk 2,45'ten daha düşük olduğu için karışımda kullanılacak agreganın miktarı:

Agrega miktarı = $440 \times 2,25 \times D / 2,65$ bağıntısına göre hesaplanmıştır.

$440 \times 2,25 \times 2,27 / 2,65 = 848,03$ g olacak şekilde agreganın miktarı bulunmuştur.

ASTM C 1260 standardına geçen bağıntıya göre hesaplamalar yapılmış ve agreganın/bağlayıcı oranı yaklaşık 1,92 olarak belirlenmiştir. Normal şartlarda bu oran 3,00 iken standardın gerektirdiği şartlardan dolayı bu fark oluşmaktadır.

Kullanılan aktivatörlerde %6, %8 ve %10 sodyum oranı olarak belirlenmiştir. Referans numunelerinde de aynı su oranı belirlenirken çimento olarak CEM I 42,5R sınıfı Portland çimentosu kullanılmıştır. Sıvı sodyum silikat aktivatörü içeren numunelerde modül sayısı 1,0 olarak seçilmiştir. Toz halinde bulunan sodyum metasilikatın modül sayısı zaten 1,0'dır. Sıvı sodyum silikat ile hazırlanan çözeltilerde kimyasal reaksiyon sonucunda Na_2SiO_3 tepkimeye girmekte ve ortaya fazladan su açığa çıkmakta olduğundan dolayı karışıma girecek su miktarı sodyum silikattan gelecek su miktarı göz önünde bulundurularak hesaplamalarla bulunmuştur. 206,8 g sudan sodyum silikattan gelen su miktarı çıkarılmıştır.

Karışımlar hazırlanırken sodyum miktarı %6, %8 ve %10 olacak şekilde hesaplamalar yapılmıştır. Sıvı halde bulunan sodyum silikat için karışımda istenen oranda sodyum miktarına ulaşabilmek için dışarıdan sodyum hidroksit (NaOH) eklemesi yapılmıştır.

Referans numune dahil olmak üzere toplam 10 adet karışımın oranları Tablo 12'de verilmiştir. Tabloda kısaca referans numunesi PC, %6 oranda sodyum içeren sodyum metasilikat numunesi M6, %8 oranda sodyum içeren sodyum metasilikat numunesi M8, %10 oranda sodyum içeren sodyum metasilikat numunesi M10, %6 oranda sodyum

içeren sıvı sodyum silikat numunesi S6, %8 oranda sodyum içeren sıvı sodyum silikat numunesi S8, %10 oranda sodyum içeren sıvı sodyum silikat numunesi S10, %6 oranda sodyum içeren sodyum hidroksit numunesi N6, %8 oranda sodyum içeren sodyum hidroksit numunesi N8, %10 oranda sodyum içeren sodyum hidroksit numunesi N10 olarak gösterilmiştir.

Tablo 12. Harç numunelerinin karışım oranları

Numune Kodu	Çimento (g)	Cüruf (g)	Aktivatör Tipi	Na Oranı (%)	NaOH (g)	Na ₂ SiO ₃ (g)	Su (g)	Kum (g)
PC	440	-	-	-	-	-	206,8	848
M6	-	440	Sodyum Metasilikat	6	-	69,6	206,8	848
M8	-	440	Sodyum Metasilikat	8	-	92,8	206,8	848
M10	-	440	Sodyum Metasilikat	10	-	116	206,8	848
S6	-	440	Sıvı Sodyum Silikat	6	22,08	148,39	112,5	848
S8	-	440	Sıvı Sodyum Silikat	8	29,45	197,85	81,0	848
S10	-	440	Sıvı Sodyum Silikat	10	36,81	247,42	49,6	848
N6	-	440	Sodyum Hidroksit	6	45,91	-	206,8	848
N8	-	440	Sodyum Hidroksit	8	61,22	-	206,8	848
N10	-	440	Sodyum Hidroksit	10	76,52	-	206,8	848

2.4. Harç Üretimi ve Kürlemesi

Deneysel çalışmalar için kullanılacak olan harç numuneleri TS EN 196-1 [84] standardına uygun bir şekilde karıştırılarak Şekil 20’de belirtilen hobart mikseri vasıtasıyla üretilmiştir. Numune üretiminde kullanılan çimento, yüksek fırın cürufu, reaktif agrega ve Na₂SiO₃ nem almayacak şekilde laboratuvar şartlarında muhafaza edilmiştir.

Özellikle reaktif agrega Kızılırmak Nehrinin kenarından elde edildiği için öncelikle etüve 105±5°C sıcaklıkta içerisinde bulunan nemden arındırılmıştır. Çimento içeren referans harcı karışımında su ile çimento öncelikle karıştırma kabına konulup 30 saniye boyunca karıştırıldıktan sonra ikinci 30 saniyede içerisine reaktif agrega ilave edilmiştir. Sonrasında yüksek hızda 30 saniye daha karıştırılmaya devam edilmiştir. Sonrasında 90

saniye bekleme esnasında kabın kenarlarına yapışan harç metal kaşık vasıtasıyla kabın ortasına tekrar toplanmıştır. Sonrasında 60 saniye daha yüksek hızda karıştırma işlemi devam ettirilip tamamlanmıştır.



Şekil 20. Hobart mikseri

Yüksek fırın cürufu ile hazırlanan karışım için aynı işlemler uygulanmış fakat farklı olarak toz sodyum metasilikat karışıma kum ile birlikte ilave edilmiştir. Sıvı sodyum silikat ile hazırlanan harçlarda karışıma hem Na_2SiO_3 ekleneceği hem de NaOH çözeltisi ekleneceği için burada bazı farklı işlemler uygulanmıştır. Burada öncelikle cam kavanoz içerisinde sodyum hidroksit çözeltisi hazırlanıp çalkalanarak homojen hale gelmesi sağlanmıştır. Bir diğer kavanoza da Na_2SiO_3 çözeltisi hazır halde tutulmuştur. Sodyum hidroksit su ile tepkimeye girdiğinde ortaya ısı açığa çıktığından dolayı soğuması için beklenmiştir. Sodyum hidroksit çözeltisi soğuduktan sonra sıvı sodyum silikat sodyum hidroksit çözeltisi içerisine dökülüp karıştırılmıştır. Referans numune dökülürken yapılan işlemlerden farklı olarak su yerine sıvı çözelti karışıma eklenmiştir. Şekil 21’de gösterilen $25 \times 25 \times 285$ mm kalıplara alkali silika reaksiyonunun tayini için harç çubuk numuneleri üretilmiş; $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlarındaki kalıplara ise diğer deneyler için numuneler dökülmüştür.



Şekil 21. Numune üretiminde kullanılan kalıplar

Hazırlanan numuneler sarsma tablasında titreşim uygulanıp sıkıştırıldıktan sonra 1 gün boyunca 23°C sıcaklık ve %95 nemde bulunan kabinde bekletildikten sonra kalıplardan çıkarılmıştır. Sonrasında Şekil 22’de gösterildiği gibi 80°C sıcaklıkta bulunan su içerisinde yerleştirildikten sonra etüve konulmuştur. 24 saat boyunca etüvde duran numuneler gene 80°C sıcaklıktaki 1M sodyum hidroksit çözeltisine konularak deneyler yapılana dek bu çözeltide kürlenmesi ve alkali çözeltisinde bekletilmesi sağlanmıştır.



Şekil 22. Dayanım ve ASR numunelerine çözelti içerisinde ısıtılma işlemi

2.5. Deney Yöntemleri

Alkali ile aktive edilmiş olan harçlar ile referans harç grubuna iki farklı aşamada deneyler uygulanmıştır. Birinci aşamada alkali silika reaksiyonu açısından en iyi sonucu veren aktivatör cinsi, alkali dozajı ve kürleme şartları belirlenmiştir. İkinci aşamada ise ilk aşamada belirlenmiş olan şartlar temel alınarak dayanım ve diğer dayanıklılık deneyleri yapılmıştır.

Numunelerin üretiminde boyca daha düşük uzamaların olduğu 3 farklı sodyum oranı (%6, %8 ve %10) ve 1 gün boyunca 23°C sıcaklık ve %95 nem bulunan iklimlendirme kabini içinde bekletildikten kalıptan çıkarma, sonrasında 80°C sıcaklıkta bulunan etüv içerisinde suda bekletme ve sonrasında 80°C sıcaklıktaki 1M sodyum hidroksit çözeltisine konularak 25×25×285 mm boyutlarındaki numunelere 210 gün boyunca hızlandırılmış harç çubuğu deneyi gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada referans numuneleri, TS EN 196-1 standardına uygun bir şekilde CEM I 42,5R Portland çimentosu ve reaktif agrega ile üretilen aynı şartlarda bekletilmiş numuneler ile kıyaslanmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise ASR açısından iyi değerler veren bu harç numune içerikleri kullanılarak 40×40×160 mm ebatlarında referans grubu ile birlikte diğer numunelerin üretimi yapılmıştır. İkinci aşamadaki numunelere işlenebilirlik deneyi, birim ağırlık deneyi, su emme ve boşluk oranı deneyi, eğilme dayanımı deneyi, basınç dayanımı deneyi, ultrasonik atımlı dalga hızı ölçümü deneyi, kılcallık deneyi, X ışınımı kırınım yöntemi ile içerik tayini ve taramalı elektron mikroskobu ile içyapının tayini deneyleri uygulanmıştır.

2.5.1. İşlenebilirlik Deneyi

Çalışmada öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu taban malzeme olacak şekilde aktive edilen malzeme ile çimento kullanılan referans numunelerinin harcı hobart mikserinde TS EN 196-1 standardında koşulları belirtilen yönteme uygun bir şekilde üretilmiştir. Üretilen bu numuneler üzerinde harç henüz taze iken kıvam tayini olarak da bilinen işlenebilirlik deneyi TS EN 1015-3 [85] standardına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Standardın içerisinde tarif ettiği gibi Şekil 23'te görülen pirinçten yapılmış ve 300 mm çapında bulunan yayılma tablası üzerinde yüksekliği 60±0,5 mm,

içten ölçüldüğünde üst çapı $70\pm0,5$ mm, içten ölçüldüğünde taban çapı $100\pm0,5$ mm, yüksekliği $60\pm0,5$ mm ve et kalınlığı en az 2 mm olan pirinç kalıp kullanılmıştır. Deneyin gerçekleştirilmesi esnasında 40 mm çapında, 200 mm uzunluğu bulunan ve 250 g ağırlığı bulunan su emmeyen tokmak kullanılmıştır. Yayılma tablasının üzerinde işaretlenmiş olan kısımda merkezlenerek kalıba iki aşamada harç yerleştirilmiştir. Her aşama için özellikleri belirtilen tokmak ile 10 kez vuruş yapılarak harcın eşit dağılım yapacak şekilde kalıba doldurulması sağlanmıştır. Kalıbın üzerinde kalan fazla harç metal bir cetvel vasıtasıyla temizlenmiş ve iki aşamalı numune doldurma işlemi bittikten sonra kalıp dikey doğrultuda çekilip çıkarılmıştır. Sonrasında yayılma tablasının kolu çevrilerek 1,25 cm yükseklikten her 1 saniyede düşüş yaptırılmış ve bu işlem 15 defa tekrar edilmiştir. Bu işlemler sonrasında pirinç levha üzerinde yayılmış olan harç numunesi farklı doğrultularda kumpas kullanılarak çapının ölçümleri alınmış ve alınan ölçümlerin ortalaması işlenebilirlik değeri olarak kayıt edilmiştir.



Şekil 23. Yayılma tablası ile işlenebilirlik deneyi

2.5.2. Birim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deneyi

Çalışmada üretilen deney numuneleri üzerinde birim ağırlık ve özgül ağırlık deneyleri ASTM C642-13 [86] standardında belirtilen şartlara uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Yüksek fırın cürufu ile hazırlanmış olan numuneler metasilikat, sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile aktive edilmek üzere sırasıyla 14 ve 28 gün

boyunca 80°C sıcaklıktaki 1M sodyum hidroksit çözeltisinde tutulmuş ve çıkarılan numuneler zaten suya doygun oldukları için 23±2°C’de suda bekletilerek su içerisinde asılı bir şekilde ağırlıkları belirlenmek için Arşimet terazisinde tartılmış ve ölçülen değerler A_{SU} olarak kayıt altına alınmıştır. Su içerisindeki ağırlıkları bulunan numuneler sudan çıkarıldıktan sonra yüzeyleri bir havlu vasıtasıyla kurulanmış ve kuru yüzey doygun hale getirilmiştir. Bu şekilde tartımlar yapıldıktan sonra alınan sonuçlar A_{KYD} olarak kayıt altına alınmıştır. Sonrasında numuneler 24 saat boyunca etüvde kurutulmuştur. Şekil 24’de numunelerin kurutulması ve terazide tartılması işlemleri görülmektedir. Etüvde kurutulduktan sonra çıkarılan numuneler normal sıcaklığa gelene kadar 23±2°C’de bulunan laboratuvar koşullarında bekletildikten sonra kuru ağırlıkları tartılmış ve A_{FK} değeri kaydedilmiştir. Numunelerin hacmi 40x40x160 mm olan kalıptan çıktıklarından ve numunelerde herhangi bir düzgünlükten sapma olmadığından dolayı hesaplanmıştır. Bulunan numune ağırlığı ile numunenin hacmi bölünerek birim ağırlık değerleri elde edilmiştir. Bütün bu alınan sonuçlar ile alkali ile aktive edilmiş harç numunelerinin ve referans harç numunesinin görünür yoğunluk, görünür birim ağırlık, kuru yüzey doygun birim ağırlık ve kuru yoğunluk değerleri aşağıda verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Görünür Birim Ağırlık (g/cm}^3\text{)} = \frac{A_{FK}}{\text{Numune Boyutları}} \quad (2.1)$$

$$\text{Görünür Yoğunluk (g/cm}^3\text{)} = \frac{A_{FK}}{A_{FK} - A_{SU}} \quad (2.2)$$

$$\text{Kuru Yoğunluk (g/cm}^3\text{)} = \frac{A_{FK}}{A_{KYD} - A_{SU}} \quad (2.3)$$

$$\text{KYD Yoğunluk (g/cm}^3\text{)} = \frac{A_{KYD}}{A_{KYD} - A_{SU}} \quad (2.4)$$

A_{FK} : Fırın kurusu ağırlığı, g

A_{KYD} : Kuru yüzey doygun ağırlığı, g

A_{SU} : Su içindeki ağırlığı, g



Şekil 24. Numunelerin kurutulması ve terazide tartılması

2.5.3. Su Emme ve Boşluk Oranı Tayini

Deneyler kapsamında üretilen $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlarındaki prizma şeklinde numunelerde su emme ve boşluk oranı tayini deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yüksek fırın cürufu ile metasilikat, sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılarak aktive edilmiş harç numuneleri ile referans numuneleri sırasıyla 14 ve 28 gün boyunca alkali silika reaksiyonuna şartlarında bekletildikten sonra kuru yüzeyleri doygun ağırlıkları (A_{KYD}) ve Arşimet terazisi kullanılarak su içerisindeki ağırlıkları (A_{SU}) belirlenmiştir. Sonrasında etüvde 100°C sıcaklıkta 24 saat bekletilerek kuru ağırlıkları (A_{FK}) belirlenmiştir. Bulunan bu değerler yardımıyla numunelerin su emme ve boşluk oranları tespit edilmiştir. Numunelerin kuru yüzey doygun ağırlıkları ile su içerisinde ölçülen ağırlıkları arasındaki fark hacimlerine eşittir. Sertleşmiş olan harç numunesinde su emme oranı, numunelerin etüv kurusu ağırlıklarının suya doygun bir şekilde kuru yüzeyli hale gelmesi ile ortaya çıkan ağırlık artışının, etüvde kurutulduktan sonra tartılan ağırlığına oranıdır. Üretilen alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harç numuneleri ile referans numunelerinin su emme ve boşluk oranı hesaplamaları aşağıda verilen 2.5 ve 2.6 bağıntıları kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Boşluk Oranı (\%)} = \frac{A_{KYD} - A_{FK}}{A_{KYD} - A_{SU}} \times 100 \quad (2.5)$$

$$\text{Su Emme Oranı (\%)} = \frac{A_{KYD} - A_{FK}}{A_{FK}} \times 100 \quad (2.6)$$

Birim ağırlık ve özgül ağırlığında verildiği gibi burada da;

A_{FK} : Fırın kurusu ağırlığı, g

A_{KYD} : Kuru yüzey doymun ağırlığı, g

A_{SU} : Su içindeki ağırlığı, g olarak verilmiştir.

Şekil 25’de su içerisinde bekletilen numuneler ve sonrasında Arşimet terazisinde ölçümü yapılan numuneler gösterilmiştir.



Şekil 25. Su içerisinde bekletilen numuneler ve Arşimet terazisi ölçümleri

2.5.4. Eğilme Dayanımı Deneyi

Deneyisel çalışmada 40×40×160 mm boyutlarında üretilmiş sertleşmiş harç numunelerinde TS EN 1015-11 [87] standardı içerisinde geçen şartlara uygun bir şekilde eğilme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 26’da görülebileceği üzere iki mesnet arası açıklığı 100 mm olacak şekilde numunelerin üst kısmından tek noktadan yükleme yapılmıştır. Numuneler mesnet üzerine yerleştirilirken kalıbın yan yüzeylerinin mesnetlere gelmesine dikkat edilmiştir. Böylelikle numune döküldüğünde pürüzlü kalan üst kısım deney sonuçlarını etkilememesi amacıyla mesnetlere denk getirilmemiştir. Her karışımdan numuneler ayrı ayrı eğilme dayanımı deneyine tabi tutulmuş ve sonuçların aritmetik ortalamaları alınarak verilmiştir. Eğilme dayanımını gösteren bağıntı 2.7’de verilmiştir.

$$R_f = 1,5 \frac{F \times l}{b^3} \quad (2.7)$$

Burada;

R_f : Eğilmede çekme mukavemeti, N/mm^2

F : Prizmanın ortasına uygulanmış olan kuvvet, N

l : Destek silindirlerinin eksenleri arasındaki uzaklık, (100 mm)

b : Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu, (40 mm)



Şekil 26. Eğilme dayanımı deneyi

2.5.5. Basınç Dayanımı Deneyi

Deneysel çalışmalar dahilinde eğilme basınç dayanımı deneyleri yapılmış ve neticesinde ikiye ayrılmış olan $40 \times 40 \times 160$ mm boyutundaki numunelerin her iki parçası TS EN 1015-11 [87] standardı içerisinde geçen şartlara göre basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Eğilme dayanımı deneyi sonucunda ikiye bölünen numunelerin pürüzsüz yüzeyleri cihazın alt ve üst çenelerinin arasına gelecek şekilde boyutları 40×40 mm olan bölüme yerleştirilmiş 500 N/s hızında yük uygulanarak deney gerçekleştirilmiştir. Kırılma esnasında uygulanan maksimum yük değeri yükün uygulanmış olduğu alana bölünerek basınç dayanım değeri 2.8'de verilen bağıntıya göre hesaplanmıştır. Eğilme

dayanımı deneyi uygulanmış olan 3 numunenin akabinde toplam 6 adet numune ortaya çıkmış; numunelerin tamamına tek tek basınç dayanım deneyi uygulanmış ve değerlerin aritmetik ortalaması alınarak sonuçlara ulaşılmıştır. Deneylerde kullanılan cihaz Şekil 27’de gösterilmiştir.

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad (2.8)$$

Burada;

R_f : Basınç mukavemeti, N/mm^2

b : Basınç plakasının kenar uzunluğu, (40 mm)

F_c : Kırılma esnasındaki en büyük kuvvet, N



Şekil 27. Basınç dayanımı deneyi

2.5.6. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Tayini

Çalışmanın bu kısmında birçok deney için kullanılmış olan $40 \times 40 \times 160$ mm ebatlarında üretilmiş olan prizmatik harç numunelerinin ultrasonik atımlı dalga hızı tayini için ASTM C597-09 [88] standardı içerisinde belirtilen şartlar dahilinde deneyler uygulanmıştır. Bu deneyde bir tane elektriksel atımlı dalga üreten cihaz, iki tane de numunelerin kenarlarından paralel tutulan transduser kullanılmaktadır. Deneyde ultrasonik ses hızının belirli bir mesafeyi (numunelerimiz için bu mesafe 160 mm’dir.) kaç saniyede kat ettiği belirlenmiştir. Deneylerden önce referans bir kalibrasyon çubuğu ile hız ölçümü yapılır.

Deneylerde kullanılan transduserlerin frekans aralığı 20 kHz ile 150 kHz aralığında bulunmaktadır. Transduserlerin temas etmiş oldukları harç çubuğunun yüzeyleri tamamen pürüzsüz olmalıdır. Bu pürüzsüzlük zımparalanarak sağlanmıştır. Akustik olarak kayıp olmaması için ise transduserler ile harç numunesinin arasında ultrasonik jel gibi temas sağlayıcı bir madde kullanılmaktadır. Ses dalgalarının başlamış oldukları kaynak transduser ile alıcı transduser arasındaki mesafe ölçülür. Geçiş süresi T mikrosaniye cinsinden saniyeye dönüştürülerek ultrasonik ses hızı aşağıda verilen bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır. Bu deney sonucunda ortaya çıkan sonuçlar betonun yoğunluğu ve içerisindeki boşluk oranıyla ilgili bilgi sahibi olmamızı sağlamaktadır. Ultrasonik sinyaller harç ne kadar yoğunsa o kadar hızlı geçiş sağlamaktadırlar. Deneyde kullanılan cihaz Şekil 28’de gösterilmiştir.

$$V = \frac{L}{T} \quad (2.9)$$

Burada;

V: Ultrasonik dalga hızı, m/s

L: Transduserler arası mesafe, m

T: Dalgaların geçiş zamanı, s



Şekil 28. Ultrasonik ses dalga hızı ölçüm deneyi

2.5.7. Kılcal Su Emme Katsayısı Tayini

Kılcal su emme katsayısının tayini için ASTM C1585-13 [89] standardı içerisinde geçen koşullara uyularak deneyler gerçekleştirilmiştir. Her bir numune grubu için deney numuneleri 14 ve 28 gün boyunca 80°C sıcaklıktaki 1M sodyum hidroksit çözeltisinde bekletilmiş ve sonrasında etüve koyulup 24 saat boyunca 105±5°C kurutulduktan sonra deneylere başlanmıştır. 40×40×160 mm boyutlarındaki prizmatik numunelerin 5 yüzeyi alüminyum folyolu bant yardımıyla sızdırmaz hale getirilerek numunenin açıkta kalan yüzeylerinin dışarıdan gelebilecek nem ile teması engellenmiştir. Bu numunelerin pürüzsüz olan yüzeylerinden birisi aşağıya gelecek şekilde içi su ile doldurulmuş şekilde oluşturulan cam bir havuzun içerisine destekler konulmuş ve bu desteklerin üzerine numuneler yerleştirilmiştir. Yapılan işlem Şekil 29'da gösterilmiştir. Numunelerin birbirine temas etmeyecek şekilde destekler üzerinde dizilimi sağlanmıştır. Numuneler kılcal bir şekilde su emmesi sağlanmış ve her sudan çıkarıldıkları vakit su ile temas eden yüzeyleri kâğıt havlu ile kurularak sadece kılcal olarak emdiği su miktarı hesaplanmıştır. Her bir numuneye başlangıçtan itibaren 1, 5, 10, 20 ve 30. dakikada, 1, 2, 3, 4, 5 ve 6. saatte ve 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8. günlerinde ağırlık okumaları yapılmış ve kılcal su emme miktarları ağırlıkça bulunmuştur. Kılcal su emme miktarlarını bulabilmek için numunelere belirlenen sürelerde çıkarıldıktan sonra tartılmış ve elde edilen ağırlık miktarları her numunenin suyla temas eden yüzey alanına bölünerek zamanla kılcal olarak emilen su miktarları bağıntı 2.10'da gösterilen formül kullanılarak tayin edilmiştir. Bunun yanı sıra grafikler çizilerek birincil ve ikincil kılcallık katsayıları da ilk 6 saat ve 1. ile 8. gün arası için bulunmuştur.

$$I = \frac{m_t}{axd} \quad (2.10)$$

Burada;

I: Su emme, mm

m_t : t süresinde numune ağırlığındaki gram cinsinden değişim

a: Numunenin suyla temas eden alanı, mm²

d: Suyun yoğunluğu, g/mm³



Şekil 29. Kılcal su emme deneyi

2.5.8. Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi

ASTM C1260 numaralı ve hızlandırılmış harç çubuğu yöntemi olarak da adı geçen bu deney yöntemi, beton içerisinde kullanılması amaçlanan bir agreganın betona zarar verebilme potansiyelinin tespit edilebilmesi amacıyla potansiyel bir şekilde zararlı içsel genleşmelere neden olan alkali-silika reaksiyonunu saptamak için kullanılır. Bu yöntem NBRI (Ulusal Botanik Araştırma Enstitüsü) deney metoduna dayanmaktadır [90]. Bu deney metodu özellikle yavaşça reaksiyona giren ya da reaksiyon esnasında daha geç zamanlarda genleşmeye sebep olan agregalar için kullanışlıdır. Bunun yanı sıra, bu metod; agregaların bağlayıcı malzemeler ile etkileşimlerini değerlendirmemekte ve betonun servis ömrü boyunca karşılaşmış olduğu çevresel faktörleri temsil eden deney koşullarını içermemektedir. Bunun sebebi harç çubuk numuneleri sodyum hidroksit çözeltisi içerisinde bırakılmasıdır. Bundan dolayı çimento içerisinde bulunan alkali içeriği reaksiyon sonucunda oluşan genleşmeleri etkileyen önemli bir faktör olmaktan çıkmaktadır. Fazlaca genleşmeler gözlemlendiğinde, genleşmelerin esasen alkali silika reaksiyonundan dolayı oluştuğunu onaylamak üzere ilave bilgi geliştirilmesi önerilmektedir. Bu ilave bilgilerin kaynaklarından bazıları şunlardır:

- ASTM C 295 standardına göre bilinen reaktif bileşenlerin mevcut olup olmadığını belirlemek için agregaların petrografik muayenesi [91]
- ASTM C 856 standardına göre alkali reaksiyon ürünlerini tanımlamak için testlerden sonra numunelerin muayenesi [92]
- Mevcut olduğunda, saha servis kayıtları performans değerlendirmesinde kullanılabilir.

Bu deney yöntemi kullanılarak yapılan deney sonuçlarından ve belli bir agreganın potansiyel bir şekilde zararlı olarak reaktif olabileceği ilave bilgi ile neticelendirildiğinde, düşük alkali içeren Portland çimentosu, mineral katkıları veya öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu gibi reaksiyonu azaltıcı önlemlerin kullanılması düşünülmelidir [93].

Yapılacak olan deney için kullanılacak kalıplar ASTM C490 [94] standardında geçen özelliklere uygun olmalı yani $25 \times 25 \times 285$ mm ebatlarında numune dökebilecek biçimde olmalıdır. Deneyde kullanılacak numunelerin içine konulan kap harç çubuklarının bütününe suya veya 1M sodyum hidroksit çözeltisine daldırılacak bir şekilde olmalıdır. Bu numune kaplarının uzun süre zarfında 80°C sıcaklık ve 1M NaOH çözeltisine dayanabilecek bir malzemeden imal edilmiş olması gerekmektedir. Numunelerin konulduğu kap, numuneler içerisine yerleştirildiğinde nem kaybına veya nemlenmeye karşı korumalı kapağı bulunan, contalı yahut her iki malzemenin bir arada olduğu bir sisteme sahip olmalıdır. Çözeltide içerisindeki harç çubukları, çözeltinin harç çubuklarının tüm yüzeylerine temas edebilecek bir biçimde yerleştirilmeli ve desteklenmelidir. Bu sebepten dolayı, numunelerin kap kenarlarına veya birbirlerine temas etmemeleri sağlanmalıdır. Eğer numuneler, çözelti içerisine dik bir şekilde konulmuş ise, metal ölçüm pimlerine baskı uygulanmamalı ve bu pimler serbest olmalıdır. Deneyde esnasında kullanılacak olan fırın $80,0 \pm 2,0^\circ\text{C}$ sıcaklık koşullarını sağlayabilmelidir [93].

Çözelti olarak Na^+ ve OH^- konsantrasyonlarının 0,99M ile 1,01M arasında bulunduğu kimyasal analizle gösterilmesi şartıyla, sodyum hidroksit kullanılmalıdır. Kullanılacak olan sodyum hidroksit çözeltisi hazırlanırken her bir litre çözeltiyi elde edebilmek için 900 mL suda 40 g NaOH çözülecek şekilde katılmalı ve saf su ile 1 litreye tamamlanmalıdır. Numunelerin içerisine yerleştirildiği numune kabındaki harç çubuklarına sodyum hidroksit çözeltisi hacimce oranı 1 hacim harç çubuğuna $4 \pm 0,5$ hacimde çözelti olacak biçimde ayarlanmalıdır. Yani çok fazla veya az çözelti içerisine numuneler konmamalıdır. Harç çubuğunun hacmi standart boyutlarından dolayı 184 mL olarak hesaplanabilir. Harç çubuklarının çözeltiye tamamen daldırılması için yeterli miktarda sodyum hidroksit çözeltisi kullanılmalıdır. Deney için kullanılacak olan malzemeler temin edilip deneylere başlanmadan önce bütün deney işlemlerinin (numunelerin kalıplara yerleştirildiği v.b.) yapıldığı laboratuvarın ve malzemelerin sıcaklığı 20°C ve $27,5^\circ\text{C}$ arasında olmalıdır. Numuneleri hazırlama suyu, nem dolabı (kür

kabini) veya nem odasının sıcaklıkları $23,0 \pm 1,7^{\circ}\text{C}$ olacak şekilde tutulmalıdır. Numunelerin dökümü yapılacak olan laboratuvarın bağıl nem oranı %50'den daha düşük olmamalıdır. Ayrıca numunelerin içerisine yerleştirildiği numune kabının bulunduğu etüvün sıcaklığı $80,0 \pm 2,0^{\circ}\text{C}$ olmalıdır [93].

Bu deney yönteminin uygulanacağı agregaların tane büyüklüğü dağılımı Tablo 8'e uygun bir şekilde olmalıdır. Tablo 8'de belirtilen elek aralıklarında yeterli miktarda agrega bulunmuyorsa, agregalar gerekli malzeme miktarları elde edilene kadar elenerek eklenir. Numuneler için, Tablo 8'de belirtilen biçimde gradasyon sağlanır. Tablo 8'de listelenen daha büyük boyutlardan bir veya daha fazlasının yetersiz miktarda agrega içermesi durumunda ve kırma için daha büyük malzeme yoksa, yeterli malzemenin mevcut olduğu ilk boyut, Tablo 8'de belirtilen derecelendirmeden belirlenen o boyuta kadar olan malzemenin kümülatif yüzdesini içermelidir. Bu tür işlemler gerektiğinde, deney raporunda ayrıca belirtilmelidir. Agregada çeşitli elek boyutlarına ayrıldıktan sonra, yapışan tozu ve ince parçacıkları agregadan çıkarmak için her boyutu elek üzerine su spreyi sıkarak yıkanmalıdır. Çeşitli eleklerde tutulan kısımları kurutulmalı ve hemen kullanılmadığı takdirde, her bir kısmı ayrı ayrı sıkıca oturan bir kapakla donatılmış temiz bir kapta saklanmalıdır [93].

Deneyde kullanılacak olan çimento seçilirken ASTM C 150'deki [95] standardı içerisinde geçen şartlara ve özelliklere sahip olan Portland çimentosu kullanılır. Bu çimentonun genişmesi %0,20'yi aşmamalıdır. Deneyde kullanılacak olan çimento içerisinde toplanmaların önüne geçebilmek amacıyla deneye tabi tutulmadan önce $850\ \mu\text{m}$ 'luk elekten elenir. Sonrasında deneyler için en az üçer adet harç çubuğu numunesi dökülür. Numunelerin döküleceği kalıplara numuneler yapışmasın diye deney öncesinde yağlanır. Kullanılan yağın çimentoya nüfuz etmeyecek bir yağ olmasına ve çimentonun priz süresini etkilememesine dikkat edilir. Bu yağ suyun numuneye nüfuz etmesine engel olarsa kabul edilebilir. Yapılan deneylerde kullanılan agreganın yoğunluğu $2,27\ \text{g/cm}^3$ olduğundan dolayı standardta geçen bağıntıya göre $440\ \text{g}$ bağlayıcı için $848,03\ \text{g}$ reaktif agrega Tablo 8'de belirtilen gradasyona uygun bir şekilde kullanılmıştır. Standarda göre su/çimento oranı kütlege $0,47$ olarak kullanılır. Bağıl yoğunluğu $2,45$ 'den küçük olan agregalarda, üç numunenin üretilmesi için harç çubukları üretilirken karıştırılacak kuru malzemelerin miktarı $440\ \text{g}$ çimento ve agrega kütlesi ise yukarıdaki bağıntı ile belirlenen agrega oranı ile çarpılacaktır. Bu agrega karışımı, çeşitli eleklerde tutulan agregaların

Tablo 8'de verilen gradasyonda yeniden birleştirilmesi ile hazırlanacaktır. Daha sonra harç karıştırılır. Harç karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, toplam 2 dakika 15 saniyeyi geçmeyen bir süre zarfında kalıplara dökülür. Kalıplar iki eşit katmanda kademe kademe doldurulur ve her katman karıştırılarak sıkıştırılır. Harç numunesi, homojen bir karışım elde edilinceye kadar kalıp yüzeyleri boyunca ve köşelere, ölçüm pimlerinin çevresine doğru hareket ettirilir. Üst katman sıkıştırıldıktan sonra harç, kalıbın üst kısmı ile aynı hizaya getirilir ve mala yardımıyla yüzeyi pürüzsüz şekle getirilir [93]. Şekil 30 ve Şekil 31'de bu işlemler gösterilmiştir:



Şekil 30. ASR harç numunelerinin hazırlanması



Şekil 31. Harç çubuklarının kalıplara dökümü

Numune kalıpları doldurulduktan hemen sonra her bir kalıp sıcaklık ve nem şartları standartta daha önce belirtilen iklimlendirme kabineye krlenmek üzere yerleştirilir. Numuneler kalıplarda 24 ± 2 saat bekletilir. Sonrasında numuneler kalıplardan zarar görmeyecek şekilde çıkarılır, nem kaybına karşı korunarak komparatör vasıtasıyla ilk boy ölçüm okuması yapılır ve numunenin tanımlanması yapılır. İlk ve daha sonra yapılan bütün okumalar %0,001'e yuvarlanır. İlk okumaları yapılan bütün numuneler musluk suyu ile dolu bir kaba numunelerin üst kısmı açıkta kalmayacak şekilde yerleştirilir. Numunelerin yerleştirildiği kap $80 \pm 2,0^{\circ}\text{C}$ 'de bulunan etüve 24 saat süre ile koyulur. Sonrasında numunelerle birlikte kaplar etüvden teker teker çıkarılır. Diğer numune kapları yalnızca ilk kaptaki harç çubukları ölçülüp etüve tekrar koyulduktan sonra çıkartılır. Numunelerin kaplardan çıkarılması ile etüve tekrar dönüşü arasında geçen süre 10 dakikayı aşmamalıdır. Harç ubukları sudan teker teker çıkarılır ve numunelerin alt ve üst noktalarında bulunan metal pimlere özellikle dikkat edilerek bir havlu yardımıyla yüzeyleri kurutulur. Kurutma işleminden hemen sonra her bir harç çubuğunun sıfır okumaları yapılır. Numunenin kurutulması ve sonrasında okuma işlemi, numunenin sıcak sudan çıkmasından itibaren 15 ± 5 s içerisinde yapılmalıdır. Okumalardan hemen sonra, geriye kalan harç çubuklarının uzama okumaları da yapılıncaaya değin, diğer harç numuneleri bir havlu üzerinde bırakılır. Daha sonra bütün harç numuneleri $80 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de 1M sodyum hidroksit çözeltisi içeren bir kaba gene üst kısımları açıkta kalmayacak biçimde yerleştirilir. Kabin ağzı kapatılır ve etüve tekrar koyulur. Sıfır okumasından 14 gün sonra ve bu aralıkta en az üç ara okuma ile her gün yaklaşık aynı saatte dikkat edilerek, periyodik olarak harç çubuklarının uzama ölçümleri yapılır. Okumalar 14 günlük sreden daha fazla devam ederse, haftada en az bir okuma yapılır. Ölçümler gene aynı numune kabına koyularak devam ettirilir. Numunenin başlangıçta yapılan komparatör okuması ile diğer yapılan her bir süre aralığındaki ölçümler arasındaki fark, etkin ölçüm uzunluğunun en yakın %0,001'ine yuvarlatılarak hesaplanır ve numunenin bu süre zarfındaki genleşmesi yani boyca uzaması olarak hesaplanır. Belirli bir zaman aralığındaki genleşme değeri olarak üç numuneye ait boy değişiminin ortalaması hesaplanarak en yakın %0,01'e yuvarlatılarak hesaplamalar yapılır [93].

şekil 32'de dökülmüş olan harç çubuk numunelerinin etüv içerisine konulmuş halleri bulunmaktadır. Bazı durumlarda numune kapları bazı durumlarda ise saklama kapları numuneler için uygun şartları sağlayabilmektedirler. şekil 33'de ise komparatör

okumalarının nasıl yapıldığını gösteren bir görsel bulunmaktadır. Ölçümler alınırken mümkün oldukça numunelerin aynı doğrultuda olması önemlidir.



Şekil 32. Harç çubuklarının saklama kaplarında ve numune kaplarında kürlenmesi



Şekil 33. Harç çubuklarının boyca uzamalarının komparatör yardımıyla ölçümü

Günümüze değin yayınlanmış çalışmalarda boyca uzamalar ile ilgili genel bir kabul bulunmaktadır ve bu kabuller aşağıdaki verilmektedir [96,97]:

- Numune dökümden itibaren 16 gün sonrasında %0,10'dan daha az boyca uzama, birçok durumda agreganın zararsız bir davranışta olacağının göstergesidir (Bazı granitik gnayslar ve metabazaltların bu deneydeki uzamaları dökümden sonraki 16 gün içinde %0,10'dan daha az olmasına karşın, sahada gözlemlendiğinde zararlı olarak genişmelere sebebiyet verdiği gözlemlenmiştir. Bu tip agregalarda, daha önceki saha performansının araştırılması önerilir. Saha performans verileri bulunmaması halinde, literatürde bahsedilen alkali silika reaksiyonun zararlı etkilerini azaltıcı yollara başvurulmalıdır [97].
- Dökümden sonraki 16 gün sonrasında %0,20'nin üzerinde boyca uzamalar potansiyel olarak zararlı genişmelerin göstergesidir.
- Dökümden sonraki 16 gün sonrasında %0,10 ile %0,20 arasındaki gerçekleşen boyca uzamalar, saha performansında zararsız ve zararlı olduğu bilinen her iki tip agregayı da içermektedir. Bu tip agregalar için daha önce bahsi geçen ilave bilgi elde etmek çok önemlidir. Böyle bir halde, komparatör okumalarını 28 güne kadar devam ettirmek de yararlı olabilir [98].

Kullanılan bu metot (ASTM C1260) Türk Standardları Enstitüsü'nün TS 13516 standardına oldukça benzer şartlar içermekte olup aralarında sadece birkaç küçük nüans farklılıkları bulunmaktadır. TS 13516'de farklı olarak bulunan bu farklılıklar aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir:

- Türk standardında kullanılan elek setleri TS 3322'ye, harç karıştırıcısı, karıştırma paleti ve karıştırma kabı (hobart mikseri) TS EN 196-1'e uygundur.
- Harç numunelerinin hazırlanıp kalıplara yerleştirildiği laboratuvarın ve diğer kuru malzemelerin sıcaklıklarının $20 \pm 2^\circ\text{C}$ olması istenmektedir.
- Kullanılan çimento TS 13516'da TS EN 197-1'e uygun P.Ç. 42,5 veya daha yüksek dayanım sınıfına sahip CEM I veya CEM I-SR olmalıdır.

Yukarda belirtilen farklar dışında iki deney metodu arasında fark bulunmamakta olup neredeyse iki metot arasındaki farklar hiç yok denecek kadar azdır [99].

2.5.9. X Işını Kırınım Yöntemi

X Işını kırınım yöntemi (XRD) 14 ve 28 günlük kürlenmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Alkali aktivasyonlu numunelerden kürlendikten sonra parçalanmış ve sonrasında toz haline getirilmiştir. XRD deneyi uygulanmadan önce 63 mikronluk elekten elenmiştir. Sonrasında CuK α X-ışını kaynağı ile çalışan AXS D8 model XRD cihazı kullanılmış ve 5-60° 2-teta açıları arasında analizler gerçekleştirilmiştir.

2.5.10. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu, Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDX) ve Element Haritalama Yöntemi

Alkali ile aktivasyonu yapılmış deney numunelerinin önceden belirlenmiş sürelerde alkali ile kürlendikten sonra içyapıları üzerindeki etkilerin belirlenebilmesi amacıyla alan taramalı elektron mikroskobu (FESEM) ile analizler gerçekleştirilmiştir. FESEM mikroskopları SEM mikroskoplarına göre daha düşük voltajlarda çalışabildikleri için daha küçük ölçeklerde daha belirgin görüntülerin elde edilmesine olanak sağlamaktadırlar.

Taramalı Elektron Mikroskopisi'nde, elektron kaynağından ayrılan elektronlar vakum altında bulunan bir kolonda toplayıcı mercekler vasıtasıyla numune üzerine düşürülmektedir. Numune yüzeyinde mevcut olan atomlarla elektron demetinin etkileşmesi neticesinde ortaya çıkan parçacıklar ve X-ışınları detekte edilerek, incelenen numunenin topoğrafyası ve kimyasal kompozisyonu hakkında bilgi sahibi olunmaktadır [100].

Üretilen numunelerin içyapılarını inceleyebilmek için üretimi yapılmış olan numunelerin 14 ve 28 günlük 1M sodyum hidroksit çözeltisinde bekletildikten sonra analizleri yapılabilecek şekilde ortadan kırılarak iletken bir yüzey sağlayabilmek için altın-paladyum kaplama yapılmıştır.

Üretilen numunelerin içyapı özellikleri incelenmek üzere Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan Zeiss (GeminiSEM 500) markalı FESEM (Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu) ile incelenmiştir. Şekil 34'de kullanılan cihaza ait görsel verilmiştir.



Şekil 34. FESEM cihazı

EDX (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy - Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi), bir malzemenin kimyasal bileşimini belirlemek amacıyla kullanılan bir analitik tekniktir. Bu metot, genellikle taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile birlikte kullanılır ve malzeme yüzeyine X-ışını demeti gönderilerek, bu ışınların etkileşime girdiği elementlere dair bilgi edinilir.

Ayrıca FESEM analizi esnasında seçilen bölgelerde element haritalaması yapılmıştır. Numunelerin element haritalaması gözlemlenirken alüminyum, silisyum, sodyum, oksijen ve kalsiyum gibi elementler dikkate alınmıştır. Element seçimi cüruf, sodyum metasilikat, sodyum silikat ve sodyum hidroksit gibi malzemelerden oluşan malzemenin element bileşimlerinin bir sonucudur.

3. BÖLÜM

BULGULAR

Farklı aktivatörlerle aktive edilen %6, %8 ve %10 sodyum oranlarında ve reaktif agrega içeren numuneler 80°C sıcaklıkta 1M sodyum hidroksit çözeltisi içerisinde alkali silika reaksiyonu koşullarında bekletilmiştir. Numuneler üzerinde işlenebilme, birim hacim ağırlık, su emme ve boşluk oranı tayini, eğilme ve basınç dayanımı, ultrasonik atımlı dalga hızı tayini, kılcal su emme, alkali silika reaksiyonu için hızlandırılmış harç çubuğu metodu, X ışını kırınım yöntemi, alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu ile içyapı tayini, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi ve element haritalaması deneyleri yürütülmüş ve sonuçlar bu bölümde sunulmuştur.

3.1. İşlenebilirlik Deney Sonuçları

Sodyum metasilikat, sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile aktive edilen cüruf esaslı harç numuneleri ve Portland çimentosu ile üretilmiş referans numune üzerinde TS EN 1015-3 [85] standardına uygun bir şekilde işlenebilirlik deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deneye ait sonuçlar Tablo 13 ve Şekil 35’de gösterilmiştir.

Tablo 13. İşlenebilirlik deney sonuçları

Karışım No	Yayılma (mm)
PC	143
M6	223
M8	225
M10	226
S6	214
S8	215
S10	215
N6	165
N8	167
N10	168

Deneyde üretilen numunelerin tamamında su/bağlayıcı oranı 0,47 olarak belirlenmiştir. Bu oranı sabit tutabilmek için bazı numunelerde su miktarı aynıyken bazı numunelerde aktivatörlerin çözünmesiyle ortaya çıkan su da hesaplanarak toplam su miktarlarının aynı kalması sağlanmıştır. Reaktif agrega içeren Portland çimentolu referans numunenin yayılma çapı 143 mm olarak bulunmuştur.

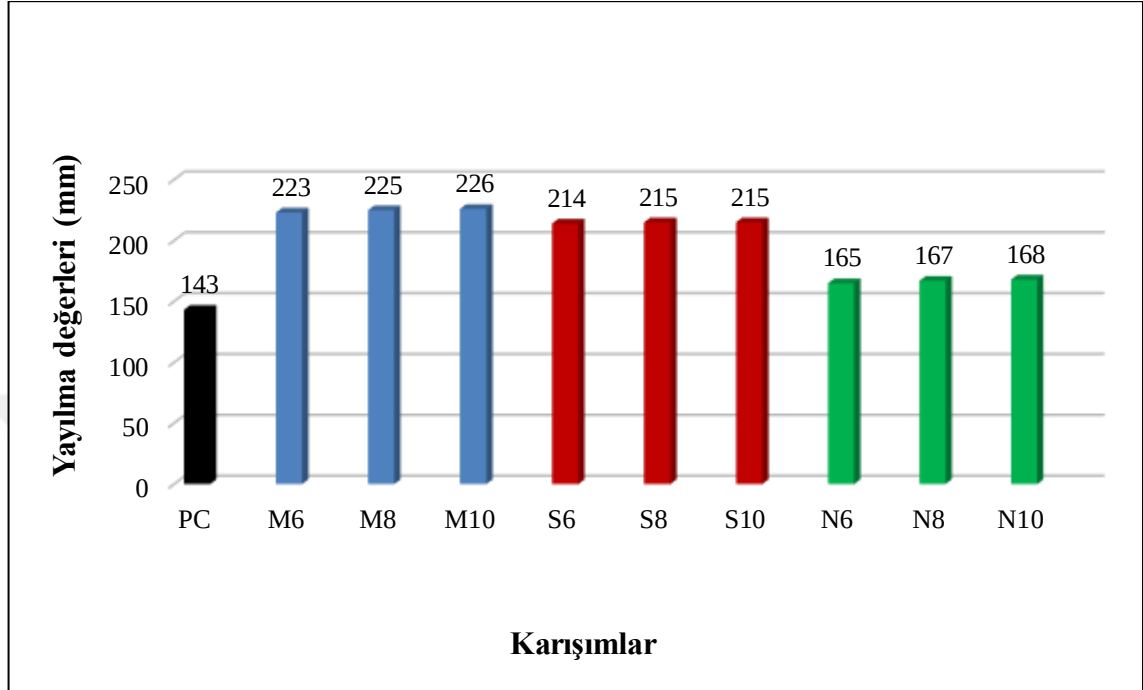
Her bir sodyum oranı ve her bir aktivatörün işlenebilirlik üzerindeki etkileri tek tek incelenecek olursa sodyum metasilikatın %6, %8 ve %10 oranlarında sodyum içeren alkali aktive sistemlerde yayılma değerleri sırasıyla 223 mm, 225 mm ve 226 mm olarak ölçülmüştür. Sıvı sodyum silikatın %6, %8 ve %10 oranlarında sodyum içeren alkali aktive sistemlerde yayılma değerleri sırasıyla 214 mm, 215 mm ve 215 mm olarak ölçülmüştür. Sodyum hidroksitin %6, %8 ve %10 oranlarında sodyum içeren alkali aktive sistemlerde yayılma değerleri ise sırasıyla 165 mm, 167 mm ve 168 mm olarak ölçülmüştür.

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunu alkali ile aktive edilen numunelerde yayılma çapının referans numuneye göre arttığı gözlemlenmiştir. Sodyum metasilikat ile aktive edilen numunelerde işlenebilirliğin referans numuneye göre yaklaşık %57 oranında arttığı görülmüştür. Sıvı sodyum silikat ile aktive edilen numunelerde işlenebilirliğin referans numuneye göre yaklaşık %50 oranında arttığı görülmüştür. Sodyum hidroksit kullanılarak aktive edilmiş cüruf numunelerinin taze harç numunelerinin yayılma değerlerinin ise tüm sodyum oranları için yaklaşık %17'lik bir artış gözlemlenmiştir.

Deneylerin sonuçlarına bakıldığında referans numuneye kıyasla kaygan bir yapıda bulunan (içerisinde sodyum içeren) aktivatörlerle aktive edilmiş numunelerin işlenebilirliğe olumlu katkısı olduğu görülmektedir. Ancak sodyum oranının artışının cüruf esaslı alkali aktive sistemlerde benzer sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Sodyum metasilikat ile sıvı sodyum silikatın kendi arasında kıyaslandığında işlenebilirlik açısından sodyum metasilikat ile aktive edilen yüksek fırın cürufu numunelerinin işlenebilirlik değerlerinin biraz daha fazla olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, sodyum metasilikat ve sıvı sodyum silikat ile aktive edilmiş numunelerin yayılma değerleri açısından sodyum hidroksit ile aktive edilen cüruf esaslı numunelere göre işlenebilirliğinin daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Sodyum oranının yayılma değerleri üzerinde bir etkisi görülmediği ve benzer sonuçlar verdiği değerlendirilmiştir.



Şekil 35. Taze harç numunelerinin işlenebilirlik değerleri

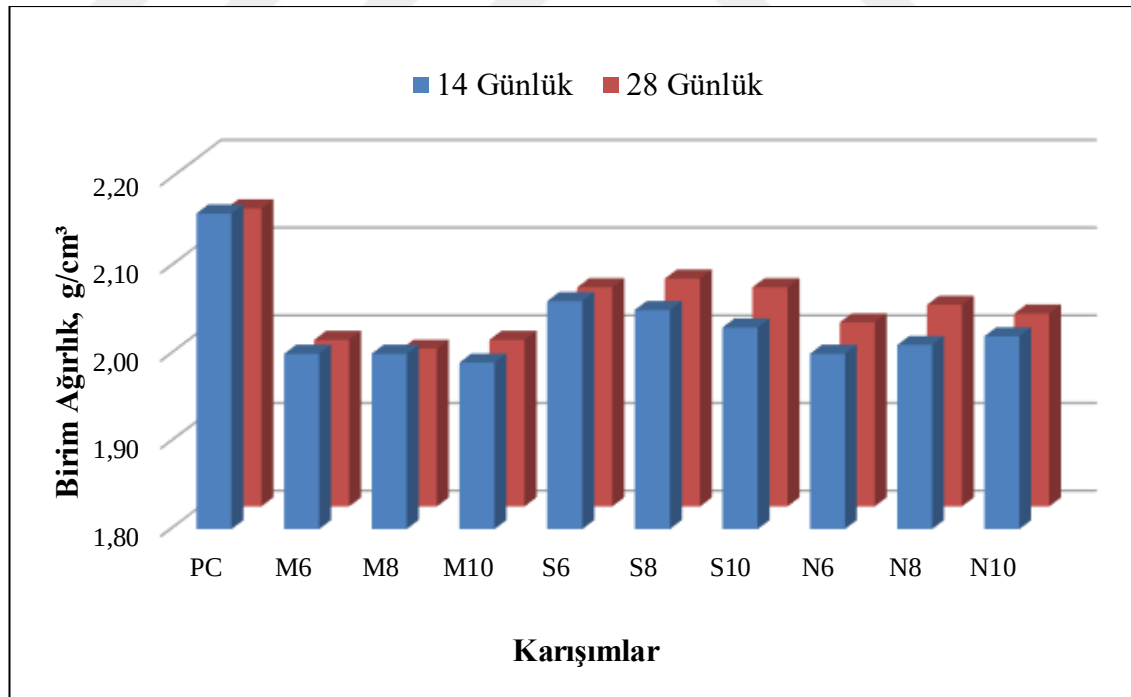
3.2. Birim Hacim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deney Sonuçları

Birim hacim ağırlık numuneleri 80°C sıcaklıkta 1M sodyum hidroksit çözeltisi içerisinde 14 ve 28 gün boyunca bekletildikten sonra 40×40×160 mm³ boyutlarındaki prizmatik numuneler, etüvden çıkarıldıktan sonra 23±2°C sıcaklığa gelinceye kadar soğutulmuştur.

Ortam şartlarına gelen numunelerin birim hacim ağırlık ve özgül ağırlık değerleri hesaplanmıştır. Bulunan birim hacim ağırlık ve özgül ağırlık değerleri Tablo 14, Tablo 15, Şekil 36 ve Şekil 37’de gösterilmiştir.

Tablo 14. Numunelerin birim hacim ağırlık değerleri

Karışım No	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	
	14 Günlük	28 Günlük
PC	2,16	2,14
M6	2,00	1,99
M8	2,00	1,98
M10	1,99	1,99
S6	2,06	2,05
S8	2,05	2,06
S10	2,03	2,05
N6	2,00	2,01
N8	2,01	2,03
N10	2,02	2,02



Şekil 36. Numunelerin birim ağırlık değerleri

80°C sıcaklıkla sodyum hidroksit çözeltisinde bekletilen tüm numunelerin birim ağırlık değerleri 1,98 g/cm³ ile 2,16 g/cm³ arasında değişmektedir.

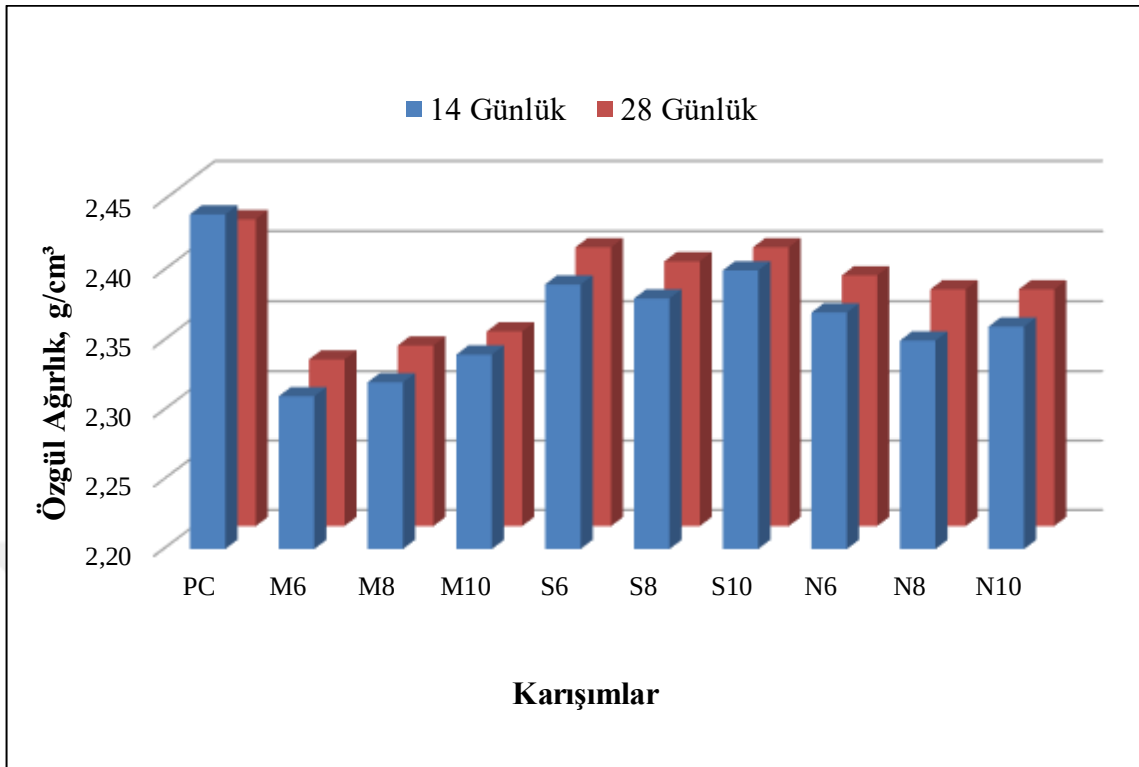
Deney sonuçlarına göre en yüksek birim ağırlık değeri Portland çimentosu ile üretilen referans numunesinde ölçülmüştür.

Referans numunelere kıyasla aktive edilmiş numunelerin birim ağırlıkları daha düşük olduğu görülmüştür. Numunelerin 14 günlük veya 28 günlük birim hacim ağırlıklarının birbirine benzer olduğu değerlendirilmektedir. Karışımların kendi içlerinde birim ağırlıklarının değişiminin $\pm 1\%$ arasında olduğu görülmektedir.

Ayrıca numunelerin genelinde birim hacim ağırlıkları kıyaslandığında, sodyum oranının artmasıyla birim hacim ağırlık değerlerinin değişmediği sonucuna varılmıştır.

Tablo 15. Numunelerin özgül ağırlık değerleri

Karışım No	Özgül ağırlık (g/cm ³)	
	14 Günlük	28 Günlük
PC	2,44	2,42
M6	2,31	2,32
M8	2,32	2,33
M10	2,34	2,34
S6	2,38	2,40
S8	2,40	2,39
S10	2,38	2,40
N6	2,37	2,38
N8	2,35	2,37
N10	2,36	2,37



Şekil 37. Numunelerin özgül ağırlık değerleri

Numunelerin özgül ağırlık değerleri $2,31 \text{ g/cm}^3$ ile $2,44 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmektedir. Deney sonuçlarına göre en yüksek özgül ağırlık değeri Portland çimentolu referans numunesinde ölçülmüştür. Numunelerin daha uzun süre çözelti içerisinde kürlenmesi ile birlikte genel itibariyle numunelerin özgül ağırlığında bir değişim meydana gelmemiştir.

Referans numune ile alkali aktive edilmiş numunelerin özgül ağırlıkları kıyaslandığında, 14 gün sonrasında alkali aktive edilmiş numunelerde daha düşük değerler görülürken bu durum 28 günlük numunelerin sonuçlarına bakıldığında bazı numunelerde çok küçük oranda artışlar görülmüştür.

Numunelerin genelinde özgül ağırlıklar kontrol edildiğinde sodyum oranının artmasıyla özgül ağırlıklarda bir artış görülmediği, benzer olduğu yani sodyum oranının artışının özgül ağırlık değerlerini etkilemediği sonucuna varılmıştır.

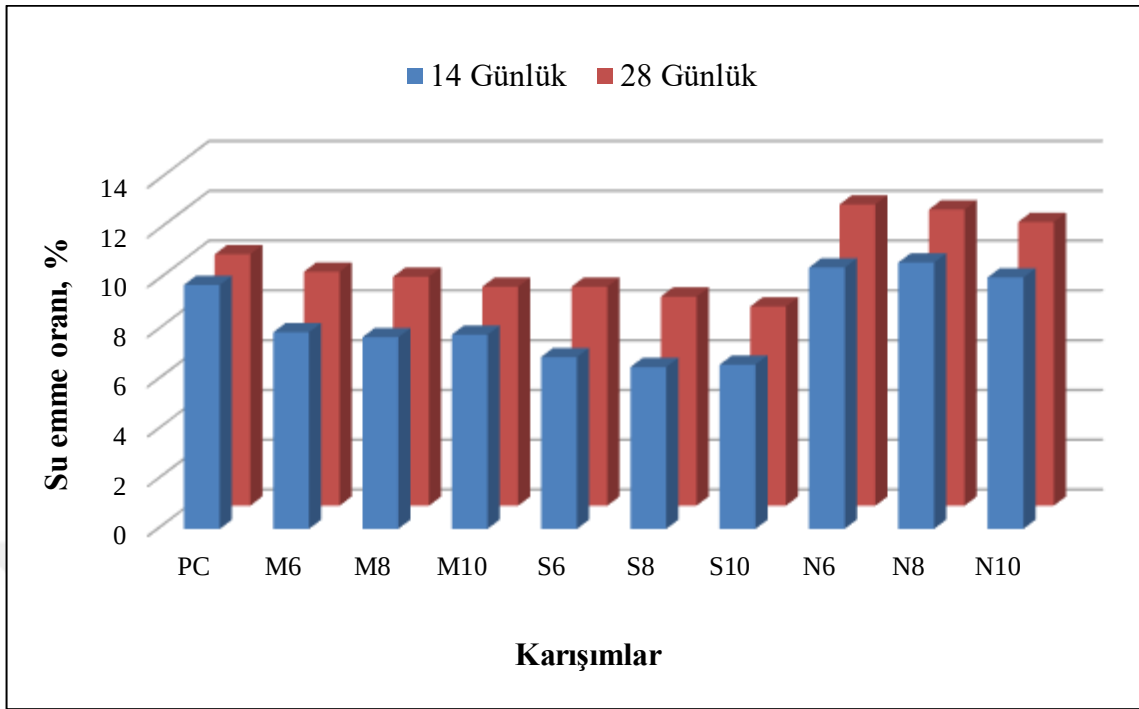
3.3. Su Emme ve Boşluk Oranı Deney Sonuçları

14 ve 28 gün boyunca 80°C sıcaklıkta 1M sodyum hidroksit çözeltisi içerisinde bekletilen numuneler etüvden çıkarılmış ve laboratuvar ortamında oda sıcaklığına kadar bekletilmiştir. Oda sıcaklığına getirilen numuneler 24 saat boyunca 20±2°C sıcaklıktaki su içerisinde bekletildikten sonra numunelerin Arşimet terazisi yardımıyla su içerisindeki ağırlıklarıyla yüzeyleri bir havlu yardımıyla kurularak kuru yüzeyi doymuş ağırlıkları ölçülmüştür. Sonrasında numuneler 24 saat boyunca 105±5°C sıcaklıkta bulunan etüvde bekletilmiş ve çıkarıldıktan sonra fırın kuru ağırlıkları ölçülmüştür.

Kuru yüzey doymuş ağırlık, etüv kuru ağırlık ve Arşimet terazisi sepetinde su içerisindeki ağırlık değerleriyle numunelerin su emme ve boşluk oranı değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda elde edilen 14 günlük ve 28 günlük su emme ve boşluk oranı değerleri tablolar halinde Tablo 16, Tablo 17 ve grafik halinde Şekil 38 ve Şekil 39'da sunulmuştur.

Tablo 16. Numunelerin su emme oranı değerleri

Karışım No	Su Emme (%)	
	14 Günlük	28 Günlük
PC	9,8	10,1
M6	7,9	9,4
M8	7,7	9,2
M10	7,8	8,8
S6	6,9	8,8
S8	6,5	8,4
S10	6,6	8,0
N6	10,5	12,1
N8	10,7	11,9
N10	10,1	11,4



Şekil 38. Numunelerin su emme oranı değerleri

Portland çimentosuyla üretilen referans numunesinin 14 ve 28 günlük su emme oranı sırasıyla 9,8 ve 10,1 olarak bulunmuştur. Sodyum metasilikat ve sıvı sodyum silikat numunelerinin 14 günlük ve 28 günlük su emme oranlarına bakıldığında referans numunelere göre daha düşük su emme oranlarına sahip oldukları görülmektedir.

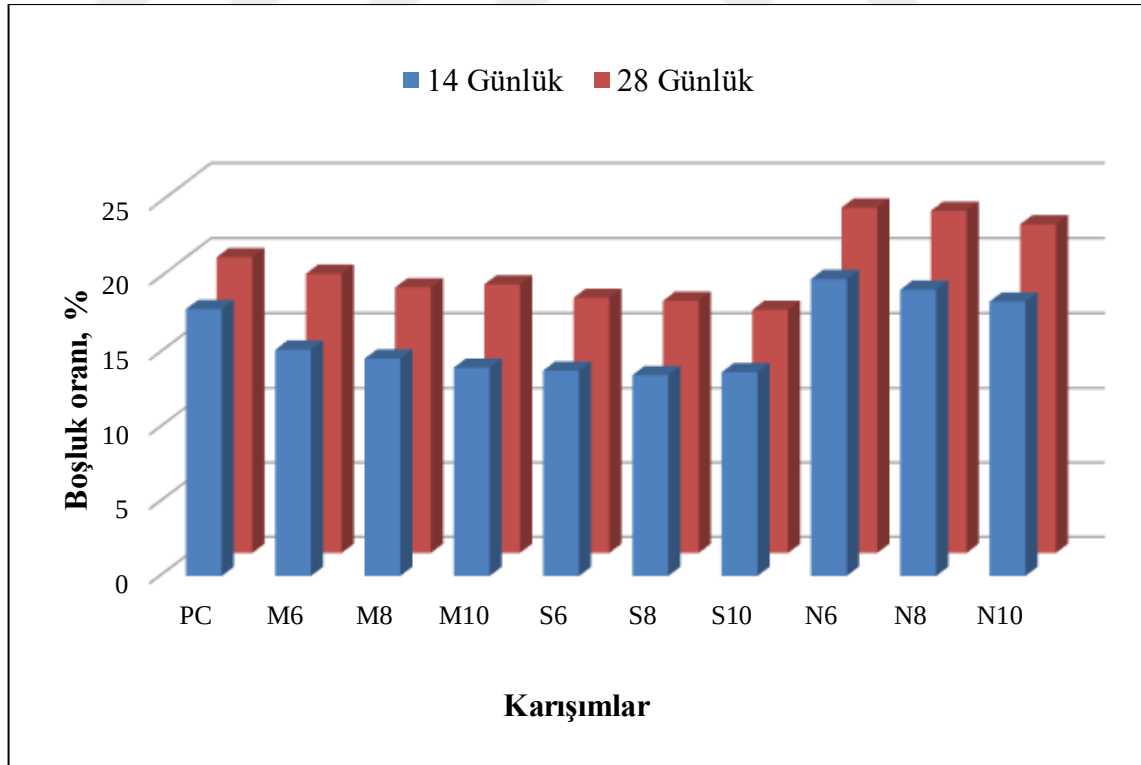
Ayrıca sodyum metasilikat ve sıvı sodyum silikat aktive edilmiş harç numunelerinin su emme oranlarının sodyum hidroksit ile aktive edilen karışıma kıyasla su emme açısından daha iyi oldukları değerlendirilmiştir.

Sodyum hidroksit ile aktive edilmiş harç numuneleri incelendiğinde 14 ve 28 günlük sonuçların tamamında, referans numune ile kıyaslandığında su emme oranlarının arttığı gözlemlenmiştir.

Sıvı sodyum silikat ile aktive edilmiş numunelerin su emme oranları en düşük çıkmıştır. Aktivatörlerin tamamı ele alındığında; genel itibarıyla numune içerisindeki sodyum oranı artışına rağmen su emme oranının yakın ve benzer sonuçlar vermiştir.

Tablo 17. Numunelerin boşluk oranı değerleri

Karışım No	Boşluk Oranı (%)	
	14 Günlük	28 Günlük
PC	17,9	19,8
M6	15,2	18,7
M8	14,6	17,8
M10	14,0	18,0
S6	13,8	17,1
S8	13,5	16,9
S10	13,7	16,3
N6	19,9	23,1
N8	19,2	22,9
N10	18,4	22,0



Şekil 39. Numunelerin boşluk oranı değerleri

Portland çimentosuyla üretilen referans numunesinin 14 ve 28 günlük boşluk oranı sırasıyla 17,9 ve 19,8 olarak bulunmuştur. Sodyum metasilikat ve sıvı sodyum silikat numunelerinin 14 ve 28 günlük boşluk oranları sonuçları değerlendirildiğinde; referans numunesi ve sodyum hidroksit ile aktive edilen harçlara göre daha düşük boşluk oranlarına sahip oldukları görülmüştür.

Sodyum hidroksit ile aktive edilmiş harç çubukları ele alındığında 14 ve 28 günlük boşluk oranları açısından boşluk oranlarının arttığı ve tüm numuneler içerisinde en yüksek olduğu görülmüştür. Sıvı sodyum silikat ile aktive edilmiş harç numunelerin ise boşluk oranları en düşük çıkmıştır.

Aktivatörlerin tamamı değerlendirildiğinde; numune içerisindeki sodyum oranı arttıkça boşluk oranlarında genel olarak bir azalma eğilimi görülmüştür. Ayrıca 28 günlük boşluk oranlarının 14 günlük boşluk oranlarına kıyasla zamanla arttığı değerlendirilmiştir.

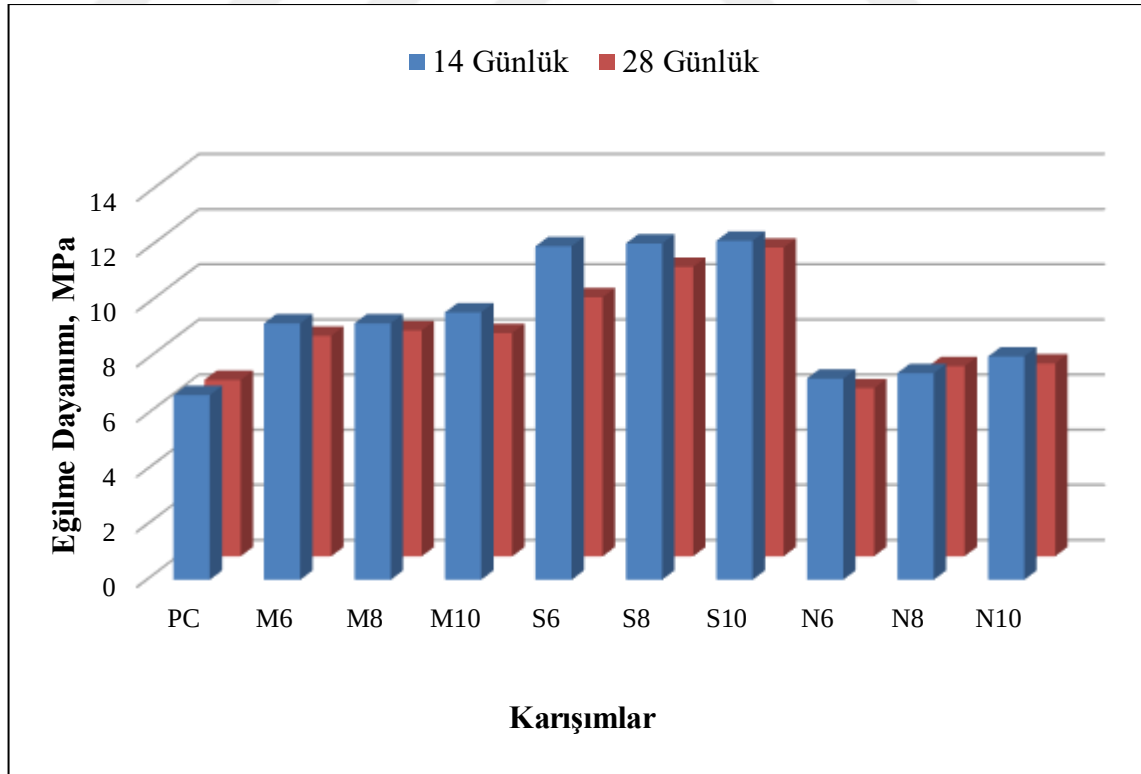
3.4. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Harç numunelerinde eğilme dayanımını belirleyebilmek için, Portland çimentosu ile üretilen referans numune ile öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu esaslı farklı alkaliler ile aktive edilmiş numuneler üretilmiştir. Bu numuneler sodyum metasilikat, sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile sodyum oranı %6, %8 ve %10 olacak şekilde aktive edilmiştir. Eğilme dayanımı deneyi için 40×40×160 mm boyutlarında prizmatik numuneler kullanılmıştır. Numuneler deney gününe kadar alkali silika reaksiyonu koşullarında bekletilmişlerdir. 14 ve 28 gün bekletildikten sonra numuneler 23±2°C sıcaklıktaki laboratuvar şartlarında soğuması beklenmiştir. Numuneler ortam şartlarına getirildikten sonra bir havlu yardımıyla kuru yüzeyleri doygun hale getirildikten sonra mesnetlere yerleştirilip tek noktadan eğilme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her bir karışım için eğilme dayanım değerleri elde edildikten sonra elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak eğilme dayanımı değeri olarak kaydedilmiştir.

Deneyler gerçekleştirildikten sonra elde edilen eğilme dayanımı değerleri Tablo 18 ve Şekil 40'da verilmiştir.

Tablo 18. Numunelerin eğilme dayanımı değerleri

Karışım No	Eğilme Dayanımı (MPa)	
	14 Günlük	28 Günlük
PC	6,7	6,4
M6	9,3	8,0
M8	9,3	8,2
M10	9,7	8,1
S6	12,1	9,4
S8	12,2	10,5
S10	12,3	11,2
N6	7,3	6,1
N8	7,5	6,9
N10	8,1	7,0



Şekil 40. Numunelerin eğilme dayanımı değerleri

Elde edilen sonuçlara göre en düşük sonuç Portland çimentosuyla üretilen referans numunenin 14 günlük sonucu olarak 6,7 MPa iken, 28 günlük sonucu 6,4 MPa olarak bulunmuştur. En yüksek sonuç ise 14 günlük sodyum oranının %10 olarak kullanıldığı sıvı sodyum silikat ile aktive edilmiş yüksek fırın cüruf esaslı harç numunelerinde ortalama 12,3 MPa olarak bulunmuştur.

14 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına göre; %6, %8 ve %10 oranında sodyum içeren sodyum metasilikat numuneleri için sırasıyla 9,3 MPa, 9,3 MPa ve 9,7 MPa elde edilmiştir. Sıvı sodyum silikat ile aktive edilen numunelerde eğilme dayanımları %6, %8 ve %10 oranında sodyum oranları için sırasıyla 12,1 MPa, 12,2 MPa ve 12,3 MPa elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre sıvı sodyum silikat ile aktive edilmiş olan harç numuneleri referans numuneye kıyasla yaklaşık 2 kat yüksek dayanım göstermiştir. Sodyum hidroksit ile aktive edilen %6, %8 ve %10 oranında sodyum içeren karışımların eğilme dayanımları ise sırasıyla 7,3 MPa, 7,5 MPa ve 8,1 MPa elde edilmiştir.

28 günlük eğilme dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde; %6, %8 ve %10 oranında sodyum içeren sodyum metasilikat numuneleri için sırasıyla 8,0 MPa, 8,2 MPa ve 8,1 MPa elde edilmiştir. Sıvı sodyum silikat ile aktive edilen numunelerde eğilme dayanımları %6, %8 ve %10 oranında sodyum içeren numuneler için sırasıyla 9,4 MPa, 10,5 MPa ve 11,2 MPa elde edilmiştir. Sodyum hidroksit ile aktive edilen numunelerde eğilme dayanımları %6, %8 ve %10 oranında sodyum içeren numuneler için sırasıyla 6,1 MPa, 6,9 MPa ve 7,0 MPa elde edilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, 14 ve 28 günlük eğilme dayanımı açısından en iyi sonuçlar sıvı sodyum silikat ile elde edilirken, en düşük eğilme dayanımları ise sodyum hidroksit ile aktive edilen harç numunelerinde bulunmuştur. Eğilme dayanımı açısından 28 günlük eğilme dayanımlarının genel olarak azaldığı tespit edilmiştir.

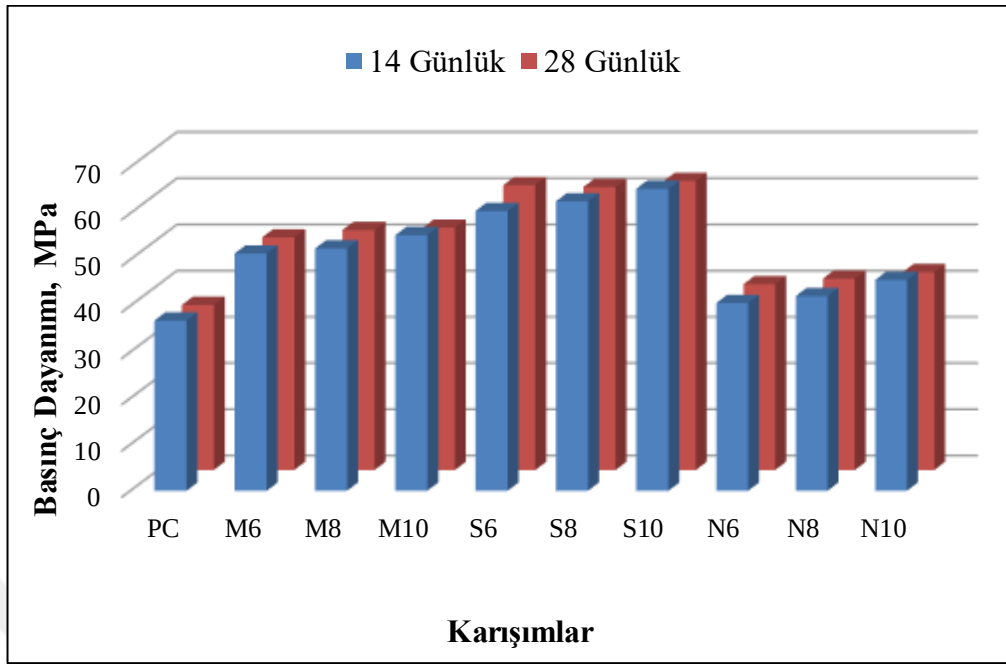
Alkali silika reaksiyonundan kaynaklı harç numuneleri içerisinde kılcal çatlakların oluşması ve bu çatlaklardan kaynaklı eğilme dayanımının zamanla olumsuz yönde etkilenmesi olarak değerlendirilmiştir.

3.5. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Dayanım deneyleri içerisinde en önemli deneylerden birisi olan basınç dayanım deneyi için yüksek fırın cürufu esaslı sodyum metasilikat, sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile aktive edilmiş olan harç numuneleri ile bağlayıcı olarak Portland çimentosu ve diğer numunelerde olduğu gibi reaktif olduğu belli olan agregalar ile üretilen $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlarında prizmatik harç numuneleri üretilmiş ve 14 ve 28 gün boyunca alkali silika reaksiyonunun tespiti için uygulanan hızlandırılmış harç çubuğu deney metodunda belirtilen kür şartlarına uygun bir şekilde alkali çözeltisinde bekletilmişlerdir. Sonrasında oda sıcaklığı olan $23 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklığa kadar laboratuvar ortamında bekletildikten sonra referans numuneleri ve alkali aktivasyonlu numunelerin eğilme dayanım deneylerinin uygulanmasıyla ortadan ikiye kırılan numunelerinin her biri üzerinde ayrı ayrı 40×40 mm² alana uygulanmak üzere basınç dayanım deneyi uygulanmıştır. Basınç dayanımı deneyi uygulanırken özellikle pürüzsüz yüzeylerin basınç uygulayan bölgelere gelmesine ve yükleme hızının sabit olmasına dikkat edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen basınç dayanım değerleri Tablo 19 ve Şekil 41’de verilmiştir.

Tablo 19. Numunelerin basınç dayanım değerleri

Karışım No	Basınç Dayanımı (MPa)	
	14 Günlük	28 Günlük
PC	36,8	35,7
M6	51,3	50,3
M8	52,4	51,9
M10	55,3	52,4
S6	60,5	61,6
S8	62,6	61,2
S10	65,3	62,5
N6	40,6	40,2
N8	42,1	41,4
N10	45,6	42,8



Şekil 41. Numunelerin basınç dayanım değerleri

Elde edilen sonuçlara göre Portland çimentosuyla üretilen referans numunenin 14 günlük basınç dayanım sonucu olarak 36,8 MPa iken, 28 günlük sonucu 35,7 MPa olarak bulunmuştur. Bütün karışımların basınç dayanım değerlerine bakıldığında en yüksek değer %10 oranında sodyum kullanılmış 14 günlük sıvı sodyum silikat ile aktive edilmiş cüruf esaslı harç numunesinde 65,3 MPa olarak görülmüştür.

14 günlük alkali ile aktive edilmiş numunelerin basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında; %6, %8 ve %10 oranında sodyum içeren sodyum metasilikat ile aktive edilmiş numuneler için sırasıyla 51,3 MPa, 52,4 MPa ve 55,3 MPa elde edilmiştir. Sıvı sodyum silikat ile aktive edilen numunelerde basınç dayanımları %6, %8 ve %10 oranında sodyum oranları için sırasıyla 60,5 MPa, 62,6 MPa ve 65,3 MPa elde edilmiştir. Sodyum hidroksit ile aktive edilen %6, %8 ve %10 oranında sodyum içeren karışımların basınç dayanımları ise sırasıyla 40,6 MPa, 42,1 MPa ve 45,6 MPa elde edilmiştir.

28 günlük alkali ile aktive edilmiş numunelerin basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında; %6, %8 ve %10 oranında sodyum içeren sodyum metasilikat ile aktive edilmiş numuneler için sırasıyla 50,3 MPa, 51,9 MPa ve 52,4 MPa elde edilmiştir. Sıvı sodyum silikat ile aktive edilen numunelerde basınç dayanımları %6, %8 ve %10 oranında sodyum oranları için sırasıyla 61,6 MPa, 61,2 MPa ve 62,5 MPa elde edilmiştir.

Sodyum hidroksit ile aktive edilen %6, %8 ve %10 oranında sodyum içeren karışımların basınç dayanımları ise sırasıyla 40,2 MPa, 41,4 MPa ve 42,8 MPa elde edilmiştir.

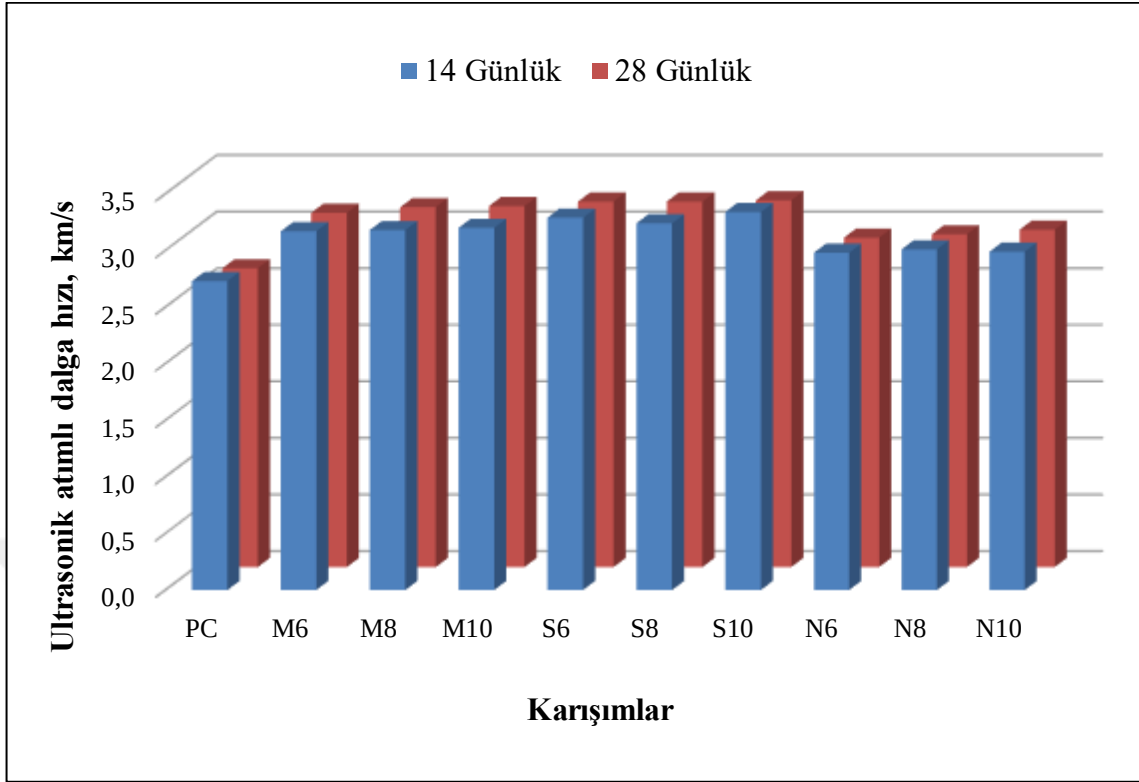
Genel olarak değerlendirildiğinde; alkali ile aktive edilmiş harç numunelerinin tamamının basınç dayanımı değerlerinin referans numuneye göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Aktivatörler arasında en yüksek dayanımın sıvı sodyum silikat ile aktive edilmiş cüruf esaslı sistemlerde ve en düşük dayanımın ise sodyum hidroksit ile aktive edilen karışımlarda elde edilmiştir. 28 günlük basınç dayanımlarının 14 günlük basınç dayanımları ile kıyaslandığında dayanım değerlerinin benzer ya da biraz azaldığı görülmektedir. Farklı alkali aktivatör ile aktive edilen karışımlarda sodyum oranındaki artışın, basınç dayanımlarında az da olsa artış yönünde olduğu değerlendirilmiştir.

3.6. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Deney Sonuçları

Ultrasonik ses geçiş süresi, 40×40×160 mm boyutlarındaki prizmatik harç numunelerinin 160 mm uzunluğu boyunca ölçülmek suretiyle tespit edilmiştir. Bütün numune grupları için etüv içerisinde bekletilip sonrasında numuneler 23±2°C oda sıcaklığına geldikten sonra kuru bir halde 14 ve 28 günlük ultrasonik dalga hızı ölçümleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda ortaya çıkan sonuçlar Tablo 20 ve grafiksel olarak Şekil 42’de verilmiştir.

Tablo 20. Numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızı deney sonuçları

Karışım No	Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı (km/s)	
	14 Günlük	28 Günlük
PC	2,73	2,64
M6	3,17	3,13
M8	3,18	3,18
M10	3,20	3,19
S6	3,29	3,23
S8	3,24	3,23
S10	3,34	3,24
N6	2,98	2,91
N8	3,01	2,94
N10	2,99	2,98



Şekil 42. Numunelerin ultrasonik atımlı ses hızı deney sonuçları

Portland çimentosuyla hazırlanan referans numunenin 14 ve 28 günlük dalga hızları sırasıyla 2,73 km/s ve 2,64 km/s olarak ölçülmüştür.

Deney sonuçlarına göre en düşük dalga hızı değeri 14 günlük Portland çimentosuyla üretilen referans numunelerinde 2,73 km/s olarak ölçülmüştür. En yüksek ultrasonik atımlı dalga hızı ise 14 günlük %10 oranında sodyum içeren sıvı sodyum silikat ile aktive edilmiş cüruf numunesi ile üretilmiş harç numunesinde 3,34 km/s olarak hesaplanmıştır.

Alkali ile aktive edilmiş olan cüruf numunelerin 14 günlük sonuçlarına göre; en iyi sonuçların genellikle sıvı sodyum silikat ile aktive edilen numunelerde %6, %8 ve %10 oranında sodyum içeren numunelerde sırasıyla 3,29 km/s, 3,24 km/s ve 3,34 km/s olarak ölçülmüştür. Sodyum metasilikat ile aktive edilmiş numunelerin %6, %8 ve %10 oranında sodyum içeren numunelerde ise 3,17 km/s, 3,18 km/s ve 3,20 km/s olarak ölçülmüştür. Üç farklı aktivatör arasında en düşük ultrasonik atımlı dalga hızı değerleri ise sodyum hidroksit ile aktive edilmiş %6, %8 ve %10 oranında sodyum içeren numunelerde 2,98 km/s, 3,01 km/s ve 2,99 km/s olarak belirlenmiştir.

28 günlük numunelerde yapılan ultrasonik atımlı dalga hızı deney sonuçları incelendiğinde ise ultrasonik atımlı dalga hızı değerlerinin 14 günlük ölçüm sonuçlarına benzer ve yakın olduğu değerlendirilmiştir.

Ultrasonik dalga hızı ölçümleri, en yüksek sıvı sodyum silikat ile aktive edilmiş numunelerde tespit edilmiştir. Ayrıca sodyum oranının tüm aktivatör tiplerinde ultrasonik atımlı dalga hızını etkilemediği ve sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür.

3.7. Kılcal Su Emme Katsayısının Tayini Deney Sonuçları

Çalışmada referans numune olarak Portland çimentosuyla üretilmiş numune ile birlikte yüksek fırın cüruf esaslı sodyum metasilikat, sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılarak aktive edilmiş %6, %8 ve %10 oranında sodyum içerecek şekilde hazırlanmış, kalıptan çıkarıldıktan sonra 24 saat boyunca 80°C sıcaklıktaki suda sonrasında ise 80°C bulunan etüv içerisinde 1M sodyum hidroksit çözeltisi içerisinde bekletilmiştir. 14 ve 28 gün boyunca bu şartlarda bekletilen numuneler üzerinde kılcal su emme katsayısının tayini için deneyler gerçekleştirilmiştir.

ASTM C1585 [89] standardında belirtilen şartlara uygun bir şekilde yapılan kılcal su emme katsayısı tayini deney numunelerinin 1, 5, 10, 20, 30 dakika ile 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 saat boyunca su emme sonucuna göre birincil kılcal su emme katsayısı; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8. gün boyunca su emme sonucuna göre ikincil kılcal su emme katsayıları hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 21’de verilmiştir.

Portland çimentosu ile üretilen referans numunenin 14 günlük birincil kılcal su emme katsayısı 0,0384 ve ikincil kılcal su emme katsayısı 0,0010 olarak bulunmuştur.

%6 oranında sodyum içeren sodyum metasilikat ile aktive edilen yüksek fırın cüruf esaslı numunenin birincil kılcal su emme katsayısı 0,0341 olarak, ikincil kılcal su emme katsayısı 0,0007 olarak, %8 oranında sodyum içeren sodyum metasilikat ile aktive edilen yüksek fırın cüruf esaslı numunenin birincil kılcal su emme katsayısı 0,0345 olarak, ikincil kılcal su emme katsayısı 0,0008 olarak, %10 oranında sodyum içeren sodyum metasilikat ile aktive edilen yüksek fırın cüruf esaslı numunenin birincil kılcal su emme katsayısı 0,0336 olarak, ikincil kılcal su emme katsayısı 0,0006 olarak hesaplanmıştır.

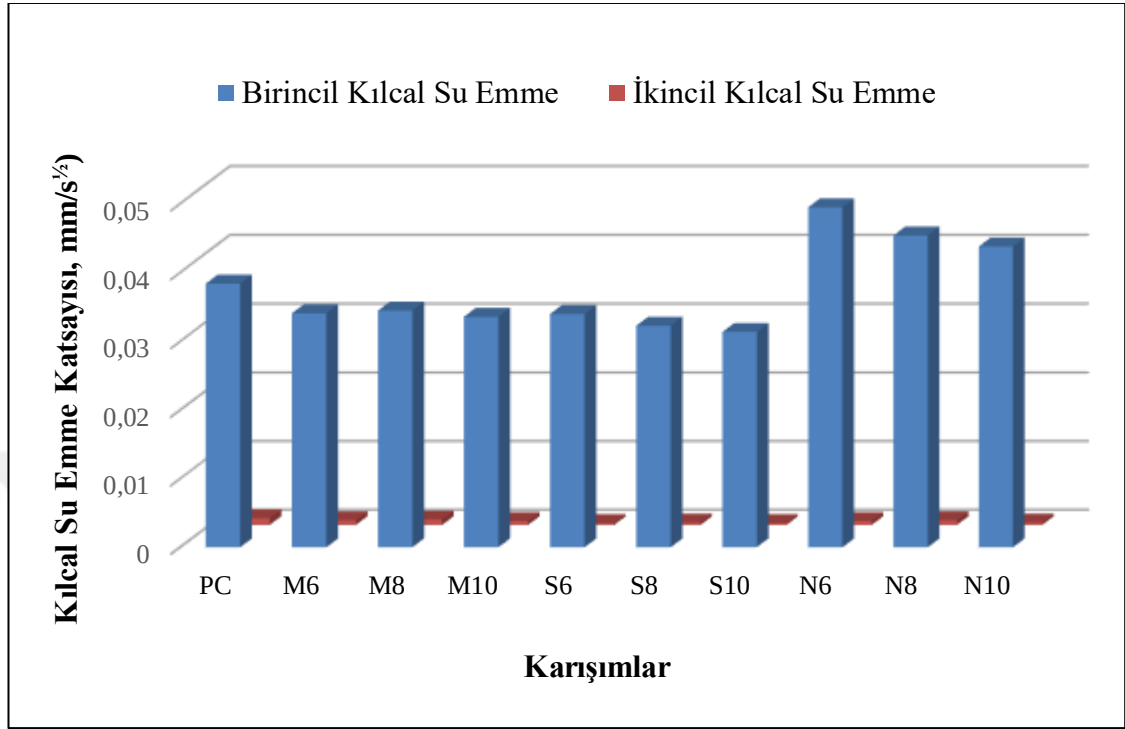
Tablo 21. Deney numunelerine ait kılcal su emme katsayıları

Karışım No	Kılcallık (mm/s ^{1/2})			
	14 Günlük		28 Günlük	
	Birincil Kılcal Su Emme	İkincil Kılcal Su Emme	Birincil Kılcal Su Emme	İkincil Kılcal Su Emme
PC	0,0384	0,0010	0,0410	0,0024
M6	0,0341	0,0007	0,0390	0,0016
M8	0,0345	0,0008	0,0375	0,0015
M10	0,0336	0,0006	0,0346	0,0013
S6	0,0340	0,0003	0,0379	0,0012
S8	0,0323	0,0004	0,0350	0,0009
S10	0,0314	0,0003	0,0332	0,0008
N6	0,0495	0,0006	0,0515	0,0021
N8	0,0454	0,0007	0,0488	0,0019
N10	0,0438	0,0004	0,0459	0,0016

%6 oranında sodyum içeren sıvı sodyum silikat ile aktive edilen yüksek fırın cüruf esaslı numunenin birincil kılcal su emme katsayısı 0,0340 olarak, ikincil kılcal su emme katsayısı 0,0003 olarak, %8 oranında sodyum içeren sıvı sodyum silikat ile aktive edilen yüksek fırın cüruf esaslı numunenin birincil kılcal su emme katsayısı 0,0323 olarak, ikincil kılcal su emme katsayısı 0,0004 olarak, %10 oranında sodyum içeren sıvı sodyum silikat ile aktive edilen yüksek fırın cüruf esaslı numunenin birincil kılcal su emme katsayısı 0,0314 olarak, ikincil kılcal su emme katsayısı 0,0003 olarak bulunmuştur.

%6 oranında sodyum içeren sodyum hidroksit ile aktive edilen yüksek fırın cüruf esaslı numunenin birincil kılcal su emme katsayısı 0,0495 olarak, ikincil kılcal su emme katsayısı 0,0006 olarak, %8 oranında sodyum içeren sodyum hidroksit ile aktive edilen yüksek fırın cüruf esaslı numunenin birincil kılcal su emme katsayısı 0,0454 olarak, ikincil kılcal su emme katsayısı 0,0007 olarak, %10 oranında sodyum içeren sodyum hidroksit ile aktive edilen yüksek fırın cüruf esaslı numunenin birincil kılcal su emme katsayısı 0,0438 olarak, ikincil kılcal su emme katsayısı 0,0004 olarak elde edilmiştir.

14 Günlük kılcal su emme katsayısı deney sonuçları grafik Şekil 43’de gösterilmiştir.



Şekil 43. 14 Günlük kılcal su emme katsayısı sonuçları

14 günlük kılcallık sonuçlarına göre; sıvı sodyum silikat ile aktive edilen numunelerin birincil ve ikincil su emme katsayılarının referans numune ile sodyum metasilikat ve sodyum hidroksit ile aktive edilen numunelerden daha düşük olduğu kılcal geçirimsizliklerinin daha az olduğu değerlendirilmiştir.

28 günlük kılcal su emme deneyleri sonucunda Portland çimentosu ile üretilen referans numunenin birincil kılcal su emme katsayısı 0,0410 olarak, ikincil kılcal su emme katsayısı 0,0024 olarak bulunmuştur.

28 günlük %6 oranında sodyum içeren sodyum metasilikat ile aktive edilen yüksek fırın cüruf esaslı numunenin birincil kılcal su emme katsayısı 0,0390 olarak, ikincil kılcal su emme katsayısı 0,0016 olarak, %8 oranında sodyum içeren sodyum metasilikat ile aktive edilen yüksek fırın cüruf esaslı numunenin birincil kılcal su emme katsayısı 0,0375 olarak, ikincil kılcal su emme katsayısı 0,0015 olarak, %10 oranında sodyum içeren sodyum metasilikat ile aktive edilen yüksek fırın cüruf esaslı numunenin birincil kılcal su emme katsayısı 0,0346 olarak, ikincil kılcal su emme katsayısı 0,0013 olarak bulunmuştur.

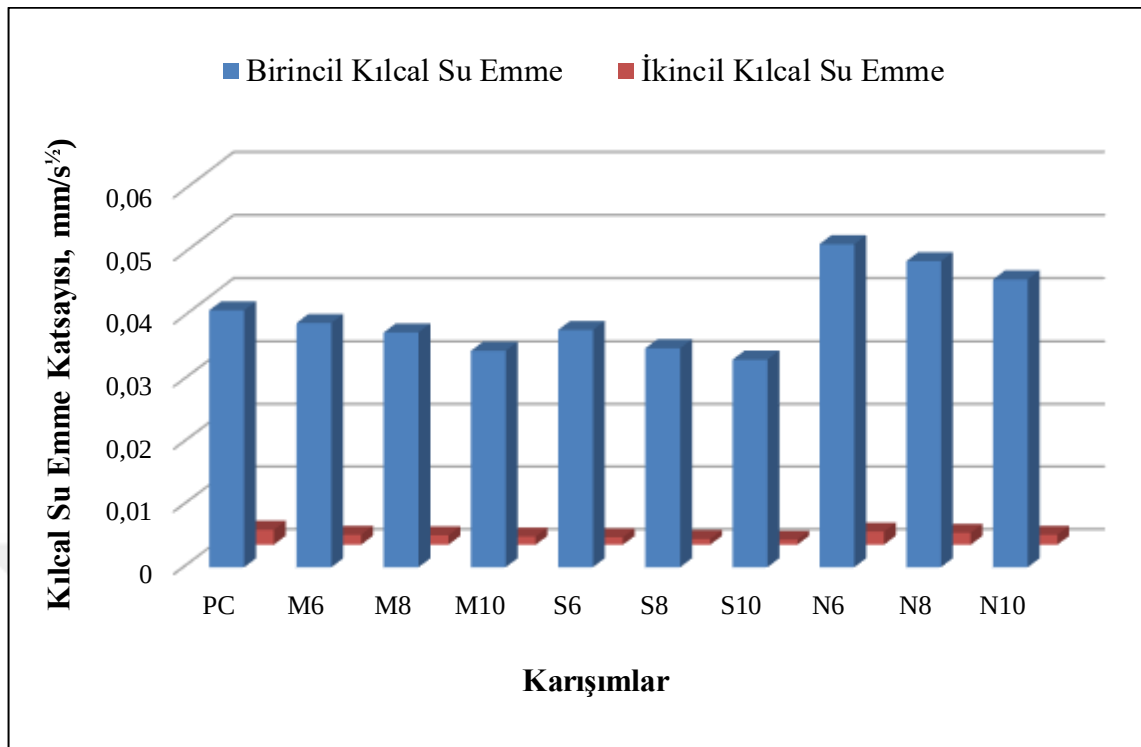
28 günlük %6 oranında sodyum içeren sıvı sodyum silikat ile aktive edilen yüksek fırın cüruf esaslı numunenin birincil kılcal su emme katsayısı 0,0379 olarak, ikincil kılcal su emme katsayısı 0,0012 olarak, %8 oranında sodyum içeren sıvı sodyum silikat ile aktive edilen yüksek fırın cüruf esaslı numunenin birincil kılcal su emme katsayısı 0,0350 olarak, ikincil kılcal su emme katsayısı 0,0009 olarak, %10 oranında sodyum içeren sıvı sodyum silikat ile aktive edilen yüksek fırın cüruf esaslı numunenin birincil kılcal su emme katsayısı 0,0332 olarak, ikincil kılcal su emme katsayısı 0,0008 olarak bulunmuştur.

28 günlük %6 oranında sodyum içeren sodyum hidroksit ile aktive edilen yüksek fırın cüruf esaslı numunenin birincil kılcal su emme katsayısı 0,0515 olarak, ikincil kılcal su emme katsayısı 0,0021 olarak, %8 oranında sodyum içeren sodyum hidroksit ile aktive edilen yüksek fırın cüruf esaslı numunenin birincil kılcal su emme katsayısı 0,0488 olarak, ikincil kılcal su emme katsayısı 0,0019 olarak, %10 oranında sodyum içeren sodyum hidroksit ile aktive edilen yüksek fırın cüruf esaslı numunenin birincil kılcal su emme katsayısı 0,0459 olarak, ikincil kılcal su emme katsayısı 0,0016 olarak elde edilmiştir.

28 günlük numunelere ait kılcal su emme katsayıları değerlendirildiğinde; 28 günlük birincil ve ikincil kılcal su emme katsayılarının referans ve alkali ile aktive edilen karışımlarda zamanla arttığı belirlenmiştir. Sodyum hidroksit ile aktive edilen numunelerin kılcal su emme katsayılarının diğer alkali ile aktive edilen ve referans numuneye göre kılcal su emme katsayılarının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

28 günlük kılcal su emme katsayılarının 14 günlük kılcal su emme katsayılarına oranla zamanla artması, alkali silika reaksiyonu olayının devam etmesine bağlı olarak ortaya çıkan kılcal çatlakların artması ile açıklanmaktadır.

%6, %8 ve %10 sodyum oranlarının artışına bağlı olarak hem birincil hem de ikincil su emme katsayılarının azaldığı görülmüştür. 28 Günlük kılcal su emme katsayısı deney sonuçlarını gösteren grafik Şekil 44'te gösterilmiştir.



Şekil 44. 28 Günlük kılcal su emme katsayısı sonuçları

3.8. Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deney Sonuçları

Çalışma kapsamında yapılan hızlandırılmış harç çubuğu deneyinin amacı 80°C sıcaklıkta sodyum hidroksit çözeltisinde bekletilen harç çubuk numunelerinin reaksiyon sonucunda oluşabilecek genişmeleri araştırmak ve alkaliler ile tepkimeye girme ihtimali daha fazla olan agregaların diğer deney metotlarına göre daha hızlı netice veren bir metotla tespit edilmesidir.

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun sodyum metasilikat, sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile aktive edilerek hazırlanan alkali ile aktifleştirilmiş sistemlerde alkali silika reaksiyonuna bağlı harç çubuklarındaki iç gerilmelerin azaltılması noktasındaki etkileri araştırılmıştır. Kullanılan bu üç farklı aktivatörün farklı oranlarda (%6, %8 ve %10) oranlarında sodyum içerecek şekilde alkali aktivasyonu ile harç çubuklarındaki alkali silika reaksiyonu üzerindeki iyileştirici etkileri incelenmiştir.

Hızlandırılmış harç çubuğu yöntemi ASTM C1260 standardı şartlarına uygun olacak biçimde uygulanmıştır. Portland çimentosuyla üretilen referans numune ile birlikte farklı aktivatörlerle aktive edilecek olan yüksek fırın cürufu öncelikle 23°C ve %50 nem

bulunan laboratuvar şartlarında hazırlanarak standartta boyutları belirtilen kalıplara dökülmüştür. Numuneler döküm işlemi tamamlandıktan sonra 24 saat boyunca %95 oranında nem bulunan iklimlendirme kabini içinde tutulmuştur. 24 saatin sonunda kalıplardan çıkan numunelerin 0,002 mm yaklaşımla ilk boy ölçümleri yapılmıştır. Komparatör ile ölçümler yapılmadan hemen önce referans bir çelik mastarın ölçümü gerçekleştirilerek sonucundan şüphe duyulan hallerde şaibeli ölçümleri engelleyebilmek adına daha sağlıklı sonuçların elde edilebilmesi sağlanmıştır. Referans mastar ile ölçüm işlemi ayrı ayrı bütün numune ölçümleri öncesinde olmamak koşuluyla ilk günlerde gerçekleştirilen günlük, daha sonrasında haftalık ve daha da sonrasında aylık gerçekleştirilen ölçümlerden önce yapılması uygun görülmüştür.

Su içerisine yerleştirilen harç çubuk numuneleri 80°C sıcaklıkta bulunan etüv içerisinde 24 saat boyunca kürlenmiştir. Etüvden çıkarılan harç çubuklarının standarda göre sıfır okumaları yapıldıktan sonra 900 mL su içerisinde 40 g NaOH çözünerek 1M NaOH çözeltisi oluşturulmuş, numuneler çözelti içerisine yerleştirilmiş ve günlük okumaları yapılmak üzere 80°C sıcaklıkta bulunan etüve tekrar koyulmuştur.

ASTM C1260 deney metodu temel olarak 14 günlük deney sonuçlarını baz alıyor olsa da harç çubuk numunelerinin boyca uzama miktarları çalışmada uzun dönemki etkilerini görmek amacıyla 210 gün boyunca devam ettirilmiştir. Deney metodunda geçen ifadelerle göre %0,10'dan daha küçük olan boyca uzamalar zararsız agregayı temsil etmekte, %0,10 ve %0,20 arasında uzama oluşan agregalar saha performansında daha farklı değerler verebileceğinden farklı metotlar ile agregalar hakkında daha kesin bilgilerin edinilmesi gerekmektedir. Boyca uzaması %0,20'den daha fazla olan harç çubukları ise potansiyel olarak tehlikeli agregayı temsil etmektedir [93,101].

Çalışmada komparatör ile uzama ölçümleri ilk 14 gün boyunca her gün olacak şekilde; daha sonrasında her hafta olacak ölçüm alınacak şekilde devam etmiştir. Standarttaki değerlendirmeler ve deney metodunun gereklilikleri 14 günlük sonuçlara göre bir değerlendirmede yapıyorsa da boyca uzamaların ölçümleri 210 gün boyunca devam ettirilmiş ve çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir.

Çalışmanın bu kısmında ASTM C 1260 metodu ile reaktif agrega içeren cüruf esaslı alkali aktive edilmiş sistemlerde alkali silika reaksiyonundan kaynaklanan etkileri ve harç çubuğu deney sonuçları bulunmaktadır. Deneyler yapılırken yüksek fırın cürufu temel

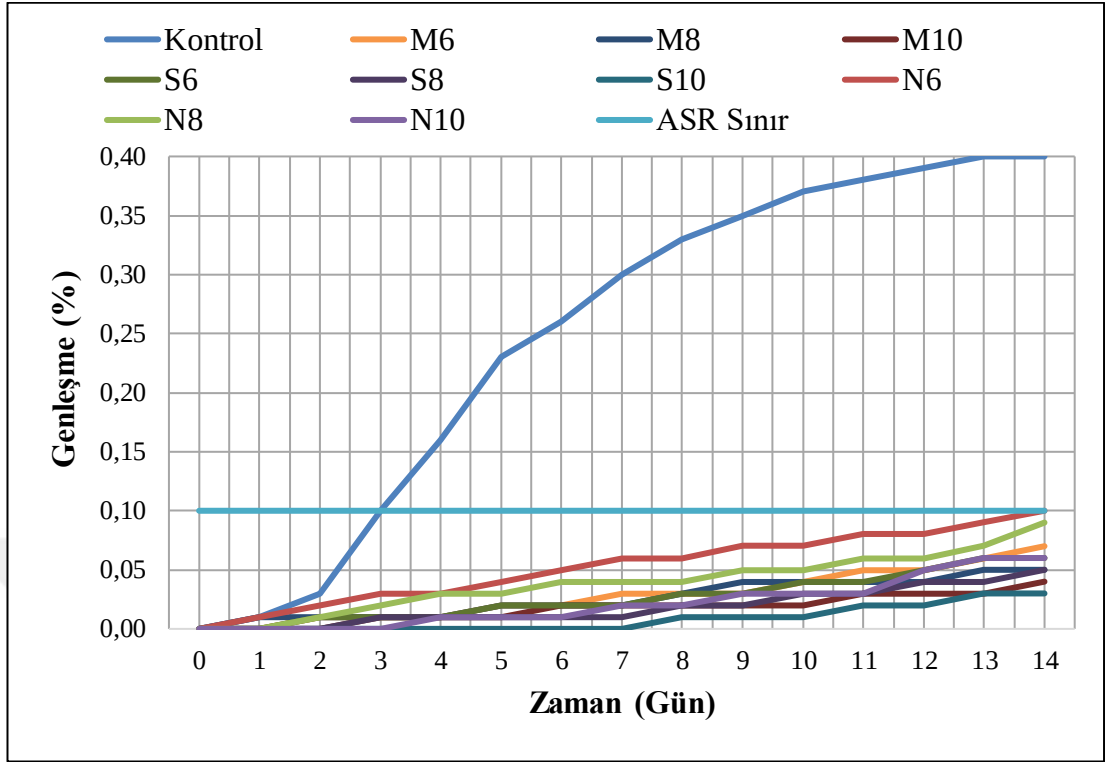
malzeme olarak kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufunun sodyum metasilikat, sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksit aktivatörlerinin kullanımıyla alkali aktivasyonu sağlanmıştır. Bu aktivasyon yapılırken aktivatörlerin içerdikleri sodyum oranı %6, %8 ve %10 olacak şekilde karışımlar hazırlanmıştır.

Farklı oranlarda kullanılan aktivatörler 14 gün sonunda %0,40 oranında boyca uzaması olan Nevşehir ilinden alınan agregayla birlikte kullanılmıştır. 14 günlük boyca uzama değeri Portland çimentosuyla dökülen referans harç çubuğunda uzama %0,40 olarak belirlenmiştir. Üç farklı aktivatör ile elde edilen yüksek fırın cürufu içeren harçlarda ise tüm sodyum oranlarında standardın sınır değeri olan 14 günlük boyca uzama %0,10 değerinin altında kalmış ve ASR'nin engellenebildiği gözlemlenmiştir.

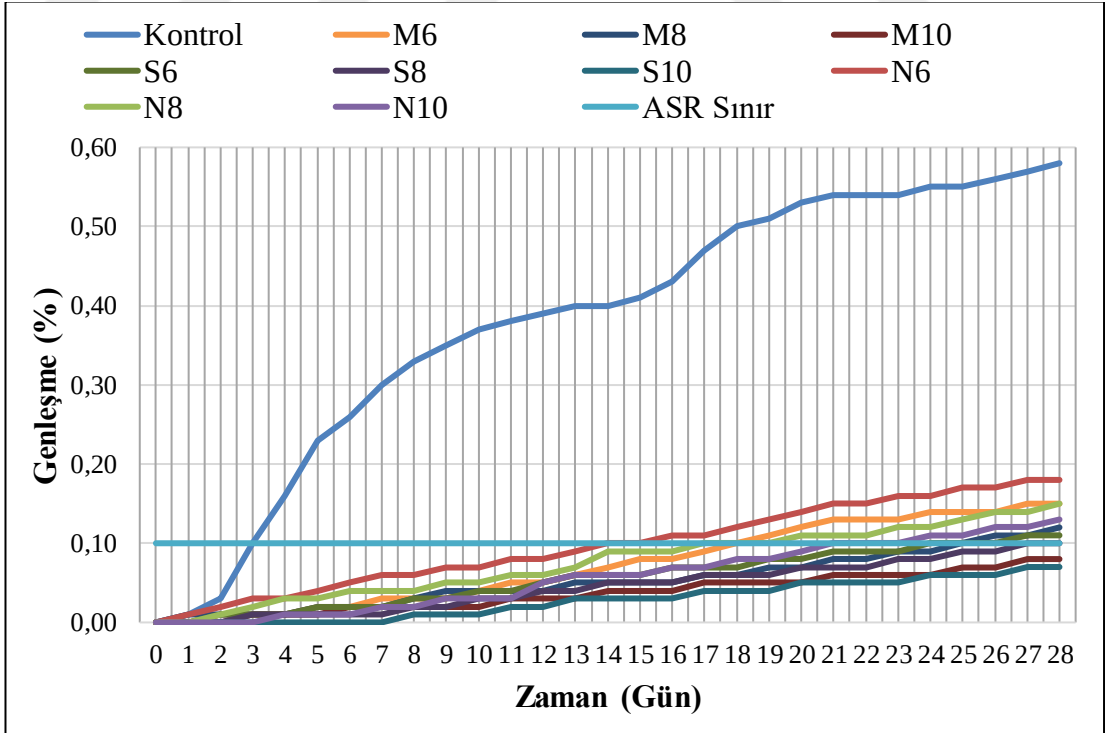
Tablo 22'de uzama sonuçları toplu olarak verilmiştir. Tablodaki sonuçlar 14, 28 ve 210 günlük olmak üzere Şekil 45, Şekil 46, ve Şekil 47'de gösterilmiştir.

Tablo 22. Hızlandırılmış harç çubuğu deney sonuçları

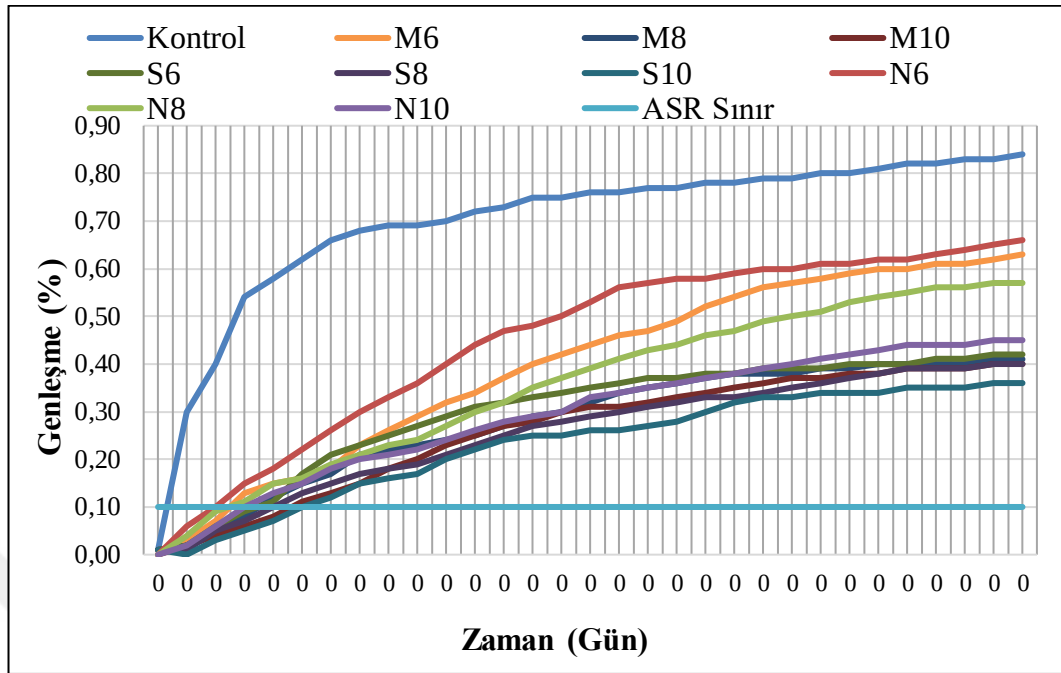
Karışım No	Uzama (%)									
	7 gün	14 gün	21 gün	28 gün	60 gün	90 gün	120 gün	150 gün	180 gün	210 gün
PC	0,30	0,40	0,54	0,58	0,69	0,75	0,77	0,79	0,82	0,84
M6	0,03	0,07	0,13	0,15	0,29	0,40	0,47	0,56	0,60	0,63
M8	0,02	0,05	0,08	0,12	0,23	0,29	0,35	0,38	0,40	0,41
M10	0,02	0,04	0,06	0,08	0,20	0,28	0,32	0,36	0,39	0,40
S6	0,02	0,06	0,09	0,11	0,27	0,33	0,37	0,39	0,40	0,42
S8	0,01	0,05	0,07	0,10	0,19	0,27	0,31	0,34	0,39	0,40
S10	0,00	0,03	0,05	0,07	0,17	0,25	0,27	0,33	0,35	0,36
N6	0,06	0,10	0,15	0,18	0,36	0,48	0,57	0,60	0,62	0,66
N8	0,04	0,09	0,11	0,15	0,24	0,35	0,43	0,49	0,55	0,57
N10	0,02	0,06	0,10	0,13	0,22	0,29	0,35	0,39	0,44	0,45



Şekil 45. 14 günlük hızlandırılmış harç çubuğu deney sonuçları



Şekil 46. 28 günlük hızlandırılmış harç çubuğu deney sonuçları



Şekil 47. 210 günlük hızlandırılmış harç çubuğu deney sonuçları

3.8.1. Sodyum Metasilikat ile Aktive Edilen Numunelerin Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deney Sonuçları

Yüksek fırın cürufunun farklı oranlarda sodyum içeren sodyum metasilikat ile aktive edilmesi durumunda elde edilen alkali silika reaksiyonu (ASR) test sonuçları Tablo 23'te sunulmaktadır. Buna göre, %6 sodyum içeren karışımda 14 günlük ASR testi sonunda %0,07 oranında boyca uzama meydana gelmiştir. Bu değer, %8 sodyum içeren karışımda %0,05; %10 sodyum içeren karışımda ise %0,04 olarak ölçülmüştür. Sodyum oranı arttıkça genleşme değerlerinin azaldığı görülmektedir.

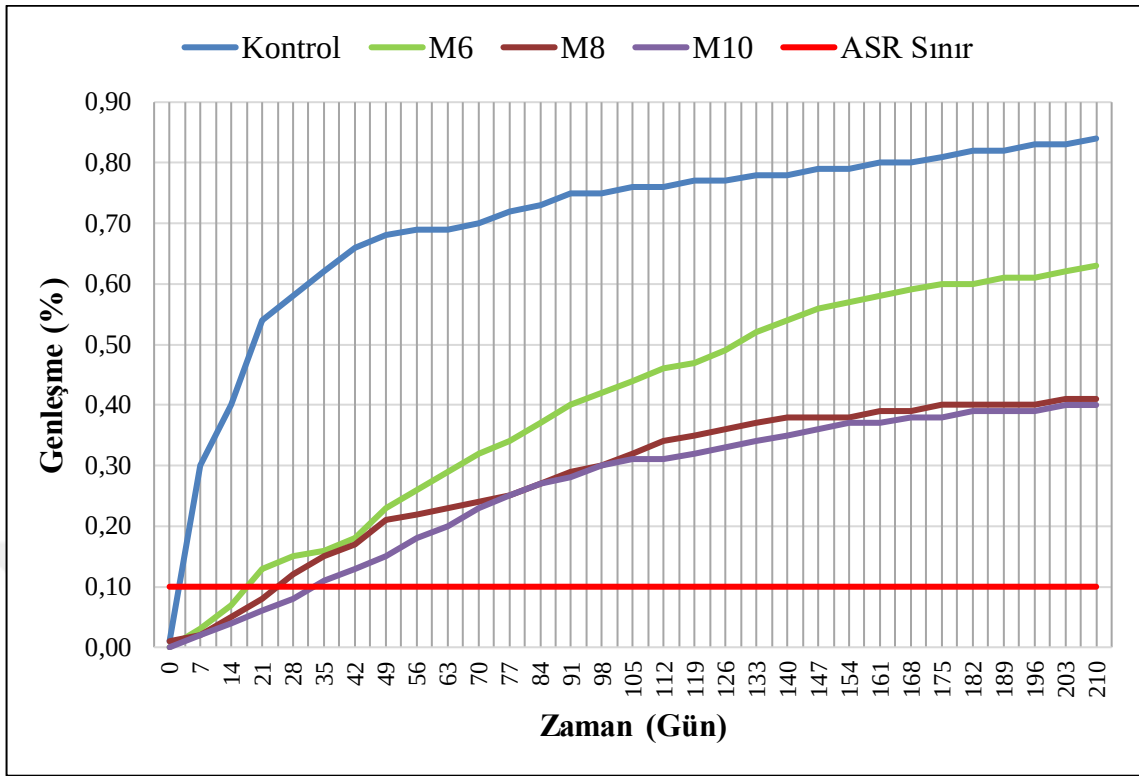
ASTM C33 standardına göre, alkali silika reaksiyonu (ASR) deneylerinde betonun zararlı genleşme göstermemesi için 14 günlük test sonunda boyutsal uzamanın %0,10'un altında olması gerekmektedir [102]. Bu çalışmada üretilen tüm numunelerde 14 günlük ASR test sonuçlarına göre boyca uzama değerleri %0,10 sınırının altında kalmıştır. Bu durum, sodyum metasilikat ile aktive edilen cüruf esaslı harçların alkali silika reaksiyonuna karşı oldukça dirençli bir yapı sergilediğini göstermektedir.

Özellikle, %10 sodyum metasilikat oranına sahip numunede boyca uzama %0,04 olarak ölçülmüş ve bu oran, metasilikat ile aktive edilen karışımlar içerisinde elde edilen en düşük uzama değeri olmuştur. Bu sonuç, ilgili aktivatör oranı ile hazırlanan numunenin ASR açısından en iyi performansı gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 23. Sodyum metasilikatın hızlandırılmış harç çubuğu deney sonuçları

Karışım No	Uzama (%)									
	7 gün	14 gün	21 gün	28 gün	60 gün	90 gün	120 gün	150 gün	180 gün	210 gün
PC	0,30	0,40	0,54	0,58	0,69	0,75	0,77	0,79	0,82	0,84
M6	0,03	0,07	0,13	0,15	0,29	0,40	0,47	0,56	0,60	0,63
M8	0,02	0,05	0,08	0,12	0,23	0,29	0,35	0,38	0,40	0,41
M10	0,02	0,04	0,06	0,08	0,20	0,28	0,32	0,36	0,39	0,40

Tablo 23'deki 210 günlük deney sonuçlarına bakıldığında referans numunenin boyca uzama oranı %0,84'lere kadar yükseldiği görülürken bu oran bütün numune grupları için referans numunenin altındadır. Sodyum oranının %6 olarak kullanıldığı karışımda boyca uzama oranı %0,63, sodyum oranının %8 olarak kullanıldığı karışımda boyca uzama oranı %0,41 ve sodyum oranının %10 olarak kullanıldığı karışımda boyca uzama oranı %0,40 olacak şekilde lineer bir şekilde boyca uzamaların sodyum oranı artan aktivatörlerin kullanıldığı karışımlarda azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 48'de sonuçlar grafiksel bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 48. Sodyum metasilikat ile aktive edilen numunelerin genleşme grafiği

3.8.2. Sıvı Sodyum Silikat ile Aktive Edilen Numunelerin Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deney Sonuçları

Sıvı sodyum silikat ile aktive edilen karışımlara ait hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonuçları Tablo 24’de sunulmaktadır. Buna göre, %6 sodyum içeren sıvı sodyum silikat ile aktive edilmiş yüksek fırın cüruf esaslı harç çubuğunda 14 günlük test sonunda %0,06 oranında boyca uzama meydana gelmiştir. Aynı deney koşullarında, %8 sodyum içeren karışımda bu değer %0,05; %10 sodyum içeren karışımda ise %0,03 olarak belirlenmiştir.

Tüm sıvı sodyum silikatlı karışımlarda 14 günlük ASR testi sonucunda boyca uzama miktarlarının ASTM C33 standardında belirtilen %0,10 sınır değerinin altında kaldığı görülmektedir. Bu durum, sıvı sodyum silikat ile aktive edilen yüksek fırın cüruf esaslı harçların alkali silika reaksiyonunun zararlı etkilerini önlemede etkili olduğunu göstermektedir. Özellikle %10 sodyum içeren karışım, %0,03’lük boyca uzama değeriyle çalışmadaki en iyi performansı sergilemiştir

Tablo 24. Sıvı sodyum silikatın hızlandırılmış harç çubuğu deney sonuçları

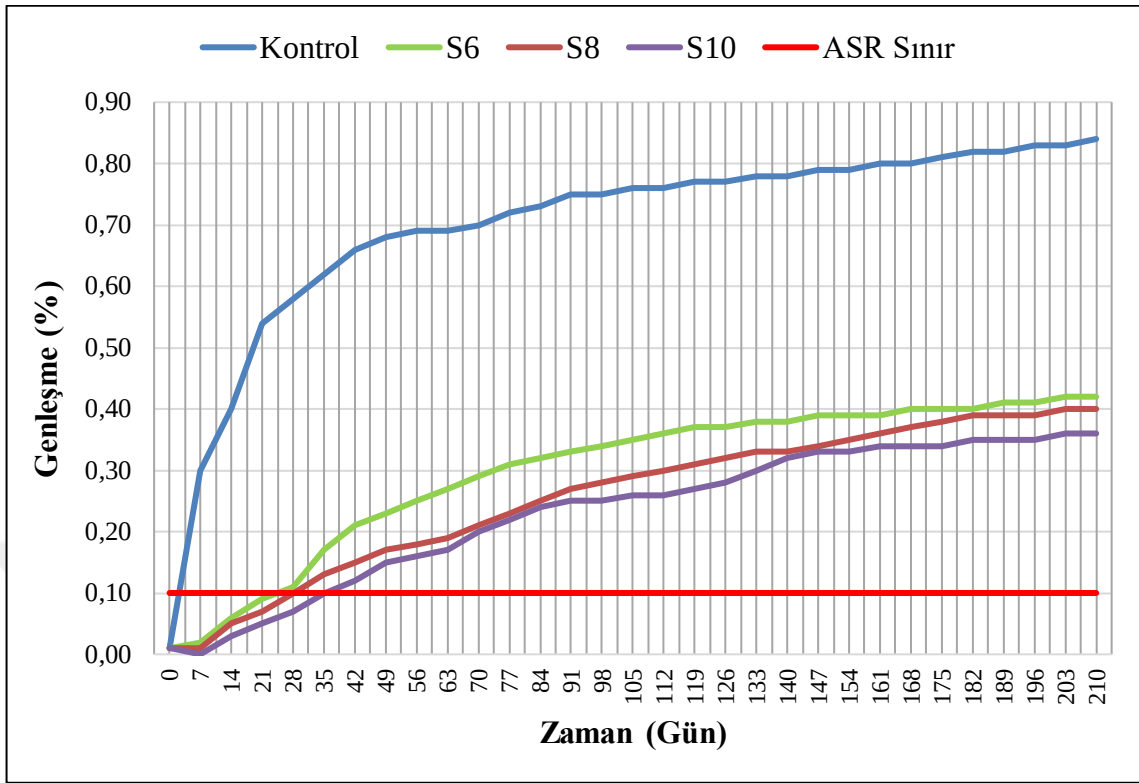
Karışım No	Uzama (%)									
	7 gün	14 gün	21 gün	28 gün	60 gün	90 gün	120 gün	150 gün	180 gün	210 gün
PC	0,30	0,40	0,54	0,58	0,69	0,75	0,77	0,79	0,82	0,84
S6	0,02	0,06	0,09	0,11	0,27	0,33	0,37	0,39	0,40	0,42
S8	0,01	0,05	0,07	0,10	0,19	0,27	0,31	0,34	0,39	0,40
S10	0,00	0,03	0,05	0,07	0,17	0,25	0,27	0,33	0,35	0,36

Tablo 24'deki 210 günlük deney sonuçlarına bakıldığında referans numunenin boyca uzama oranı %0,84'lere kadar yükseldiği görülürken bu oran bütün numune grupları için referans numunenin altındadır. Sodyum oranının %6 olarak kullanıldığı karışımda boyca uzama oranı %0,42, sodyum oranının %8 olarak kullanıldığı karışımda boyca uzama oranı %0,40 ve sodyum oranının %10 olarak kullanıldığı karışımda boyca uzama oranı %0,36 olacak şekilde lineer bir şekilde boyca uzamaların sodyum oranı artan aktivatörlerin kullanıldığı karışımlarda azaldığı gözlemlenmiştir.

Bu sonuçlar göstermiştir ki %6, %8 ve %10 oranında sodyum içeren bütün karışımlar için diğer aktivatör tiplerinden daha iyi performans gösteren sıvı sodyum silikat ile aktive edilen harç çubukları 210 günlük alkali çözeltisinde bekletilme sonucunda alkali silika reaksiyonundan kaynaklı zararlı etkileri hafifletici etkisi oldukça başarılıdır.

Bütün karışımlar ele alındığında uzun süreli alkali atağından sonra ASR açısından en iyi etkiyi veren aktivatör sıvı sodyum silikattır. Özellikle %10 oranında aktivatörün kullanıldığı karışım için bütün karışımlar arasında hem 14 günlük uzama sonucu olan %0,03 ile hem de 210 günlük boyca uzama oranı %0,36 ile en başarılı performansı göstermiştir.

Referans numunenin boyca uzaması göz önünde bulundurulduğunda %0,84'e göre iki katına ulaşan başarılı sonuçlar sıvı sodyum silikat ile aktivasyonu yapılmış yüksek fırın cüruf esaslı numuneler için elde edilmiştir. Şekil 49'de sonuçlar grafiksel bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 49. Sıvı sodyum silikat ile aktive edilen numunelerin genleşme grafiği

3.8.3. Sodyum Hidroksit ile Aktive Edilen Numunelerin Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deney Sonuçları

Sodyum hidroksit ile aktive edilen karışıma ait boyca uzamalar Tablo 25’de gösterilmiştir. Tablo 25’de görüldüğü üzere %6 oranda sodyum içeren sodyum hidroksit ile aktive edilmiş yüksek fırın cüruf esaslı harç çubuğunda 14 gün sonunda %0,10 genleşme gözlemlenmiştir. Bu değer sırasıyla %8 sodyum içeren karışımda %0,09 iken %10 oranında sodyum içeren karışımdaki genleşme %0,06 değerlerindedir. Sodyum hidroksit ile aktive edilen harç çubuklarına bakıldığında %6 oranında sodyum içeren karışımdaki sonuç ASTM C33’de belirtilen %0,10 oranını ile aynı olmaktadır. Diğer iki aktivatörün alkali silika reaksiyonundan kaynaklanan zararlı etkileri hafifletme noktasındaki performansı ile kıyaslayacak olursak sodyum hidroksitin biraz daha geride kaldığını görebilmekteyiz. Hali hazırda numunelerin zaten 1M sodyum hidroksit çözeltisinde bekletildiği düşünüldüğünde bu etkinin az olmasının sebepleri anlaşılabilmektedir.

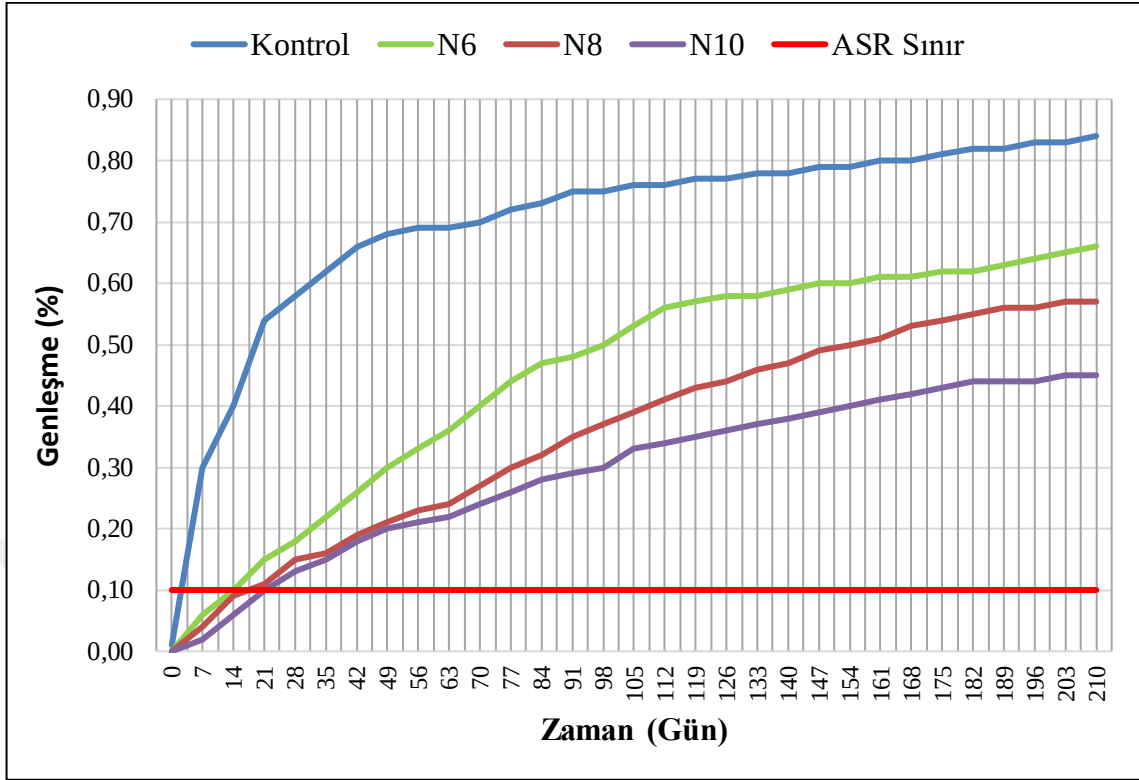
Tablo 25. Sodyum hidroksitin hızlandırılmış harç çubuğu deney sonuçları

Karışım No	Uzama (%)									
	7 gün	14 gün	21 gün	28 gün	60 gün	90 gün	120 gün	150 gün	180 gün	210 gün
PC	0,30	0,40	0,54	0,58	0,69	0,75	0,77	0,79	0,82	0,84
N6	0,06	0,10	0,15	0,18	0,36	0,48	0,57	0,60	0,62	0,66
N8	0,04	0,09	0,11	0,15	0,24	0,35	0,43	0,49	0,55	0,57
N10	0,02	0,06	0,10	0,13	0,22	0,29	0,35	0,39	0,44	0,45

Tablo 25'deki 210 günlük deney sonuçlarına bakıldığında referans numunenin boyca uzama oranı %0,84'lere kadar yükseldiği görülürken bu oran bütün numune grupları için referans numunenin altındadır. Sodyum oranının %6 olarak kullanıldığı karışımda boyca uzama oranı %0,66, sodyum oranının %8 olarak kullanıldığı karışımda boyca uzama oranı %0,57 ve sodyum oranının %10 olarak kullanıldığı karışımda boyca uzama oranı %0,45 olacak şekilde lineer bir şekilde boyca uzamaların sodyum oranı artan aktivatörlerin kullanıldığı karışımlarda azaldığı gözlemlenmiştir.

Bu sonuçlar göstermiştir ki her ne kadar sodyum oranı %6 olarak kullanılan sodyum hidroksit numunesinin 14 günlük sonuçları tatmin edici olmasa da 210 günlük alkali çözeltisinde bekletilme sonucunda bu aktivatörün ASR kaynaklı zararlı etkileri hafifletici etkisi oldukça başarılıdır. Özellikle %10 oranında aktivatörün kullanıldığı karışımın sonucu bütün karışımlar arasında 210 günlük boyca uzama oranı %0,45'dir.

210 gün sonunda referans numunenin boyca uzaması göz önünde bulundurulduğunda; %0,84 boyca uzama oranına göre yaklaşık olarak iki katına ulaşan başarılı sonuç %10 oranında sodyum içeren sodyum hidroksit ile aktivasyonu yapılmış yüksek fırın cüruf esaslı numuneler için elde edilmiştir. Şekil 50'de sonuçlar grafiksel bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 50. Sodyum hidroksit ile aktive edilen numunelerin genleşme grafiği

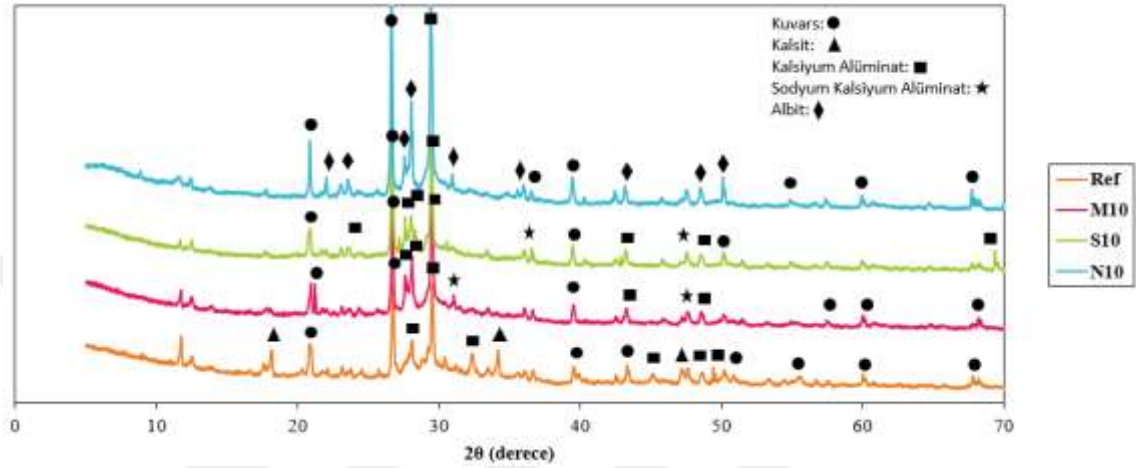
210 gün boyunca uygulanan alkali çözeltisinde bekletilen numunelerde gözle görülür ASR kaynaklı çatlaklar oluşmuş; bazılarının görseli Şekil 51’de verilmiştir.



Şekil 51. 210 gün sonunda numunelerde oluşan çatlaklar

3.9. X Işını Kırınım Yöntemi Sonuçları

Referans numune ile birlikte yüksek fırın cürufunun %10 oranında sodyum içeren aktivatörlerle (sodyum metasilikat, sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksit) aktive edilmiş olan harç numunelerinin 14 günlük XRD analiz sonuçları Şekil 52’de verilmiştir.



Şekil 52. 14 Günlük numunelerin XRD sonuçları

XRD sonuçları incelendiğinde Portland çimentolu referans numunenin pik noktalarında daha çok kuvars piki görülmektedir. Bu pikin yanı sıra kalsiyum alüminat ve kalsit fazları da yoğun bir şekilde görülmektedir. Sodyum metasilikat ile aktive olmuş numunede kuvars ve kalsiyum alüminat piklerinin referans numuneye göre biraz daha az olduğu görülmektedir. Sodyum kalsiyum alüminat fazının ise belirgenleştiği görülmüştür. Bu durum, metasilikatın daha iyi çözünme ve jel oluşumuna katkı sağladığını göstermektedir. Sıvı sodyum silikat ile aktive edilmiş numunede kuvars fazı görülmekte bunun yanı sıra sodyum metasilikata göre daha fazla bir şekilde kalsiyum alüminat fazı görülmüştür. Bu durum silikat modülünün yüksek olmasının yeni kristalize ürünlerin oluşumuna sebep olduğunu göstermektedir. Ayrıca kalsiyum alüminat fazının da belirgin olması bağlayıcı jel matrisinde kalan bazı reaktif kalıntıların da kristalleştiğini işaret etmektedir. Sodyum hidroksit ile aktive edilmiş karışımda ise kuvars pikleri ve yeni olarak ise sodyum içeriğinden dolayı albit fazının görülmesine sebep olmuştur. Ayrıca bu karışımda kalsiyum alüminat ve albit fazlarının olması, çözünme sonrası yeniden kristalleşmeye işaret etmektedir.

Sonuç olarak, numunelerde kuvars piklerinin baskın olduğu görülmektedir.

Sodyum metasilikat ve sıvı sodyum silikat ile aktive edilen sistemlerde sodyum kalsiyum alüminat fazına ait piklerin yoğunluğu artmıştır. Bu durum, alkali aktivasyon sürecinde kalsiyum ve alüminyum içeriğinin sodyumla reaksiyona girerek yeni bağlayıcı fazların oluştuğunu göstermektedir.

Sodyum hidroksit ile aktive edilen sistemlerde ise, diğer karışımlara kıyasla kuvars ve albit fazlarının daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, NaOH ile yapılan aktivasyonun farklı bir faz gelişimine neden olduğunu düşündürmektedir.

Sıvı sodyum silikat ve sodyum metasilikat numunelerinde ise fazların daha homojen dağılmış ve kristalin yapı daha düzenli olarak gözlemlenmiştir. Bunun, alkali silika reaksiyonuna karşı daha dirençli bir yapı oluşmasına katkı sağladığı değerlendirilmektedir.

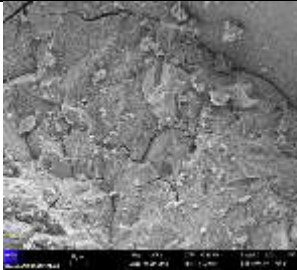
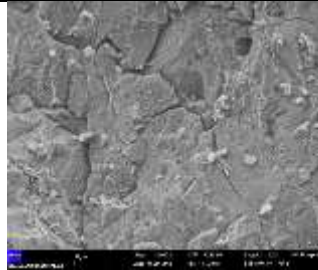
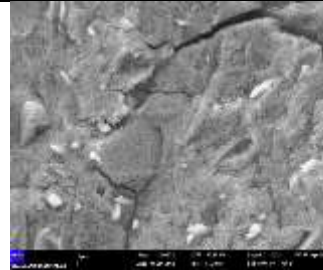
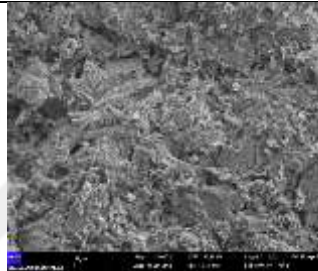
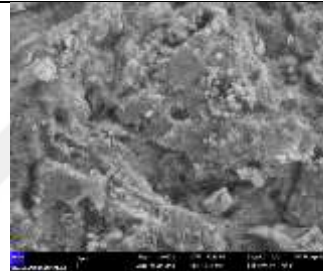
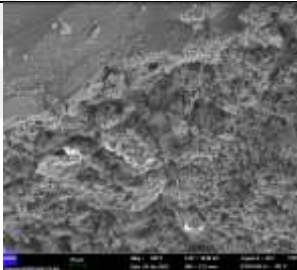
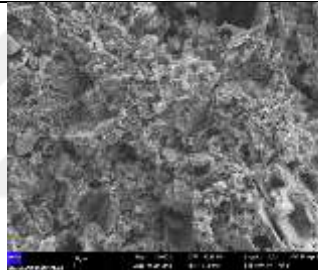
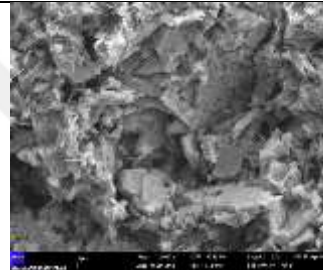
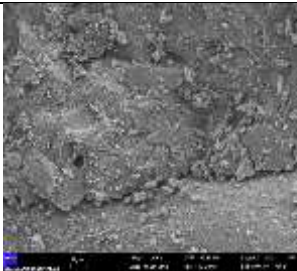
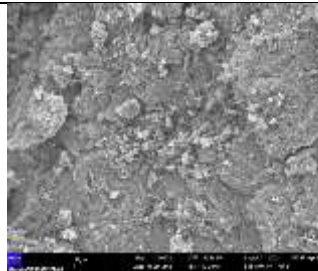
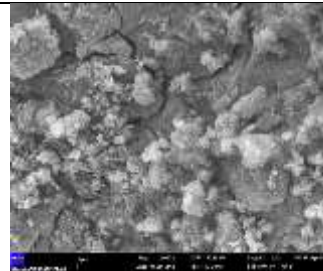
3.10. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu, Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX) ve Element Haritalama Yöntemi Sonuçları

3.10.1. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu Sonuçları

Çimento kullanılarak üretilen ve alkali silika reaksiyonu (ASR) koşullarında bekletilen referans numuneler ile farklı aktivatörler kullanılarak alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu esaslı numunelere ait 14 günlük alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) görüntüleri aşağıda sunulmaktadır.

Görüntüler, sırasıyla 500x, 1000x ve 3000x büyütme oranlarında alınmış olup, ASR'nin alkali aktivasyonla üretilmiş yüksek fırın cürufu harç çubuklarının içyapısında meydana getirdiği mikroyapısal değişimler değerlendirilmiştir. Bu görüntüler, karşılaştırmalı olarak Tablo 26'da detaylı biçimde gösterilmiştir.

Tablo 26. 14 günlük numunelerin SEM görüntüleri

Numuneler	500x	1000x	3000x
PC			
M10			
S10			
N10			

Referans numunesi için görüntüleri incelendiğinde;

- Gözle görülür çatlaklar ve ayrışmalar mevcuttur. Bu çatlaklar ASR nedeniyle gelişen iç gerilmelerin bir sonucudur. Mikroyapıda yer yer boşluklar gözlemlenmektedir. Çimento bazlı yapıda ASR kaynaklı hasar belirgindir.

Metasilikat ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufunun görüntüleri incelendiğinde;

- Daha homojen ve yoğun bir matris oluşumu görülmektedir. Mikroçatlak oluşumu sınırlıdır. Bu yapının, sodyum metasilikatın bağlayıcı yapısını geliştirerek ASR'ye karşı direnci artırdığı değerlendirilmiştir.

Sıvı sodyum silikat ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufunun görüntüleri incelendiğinde;

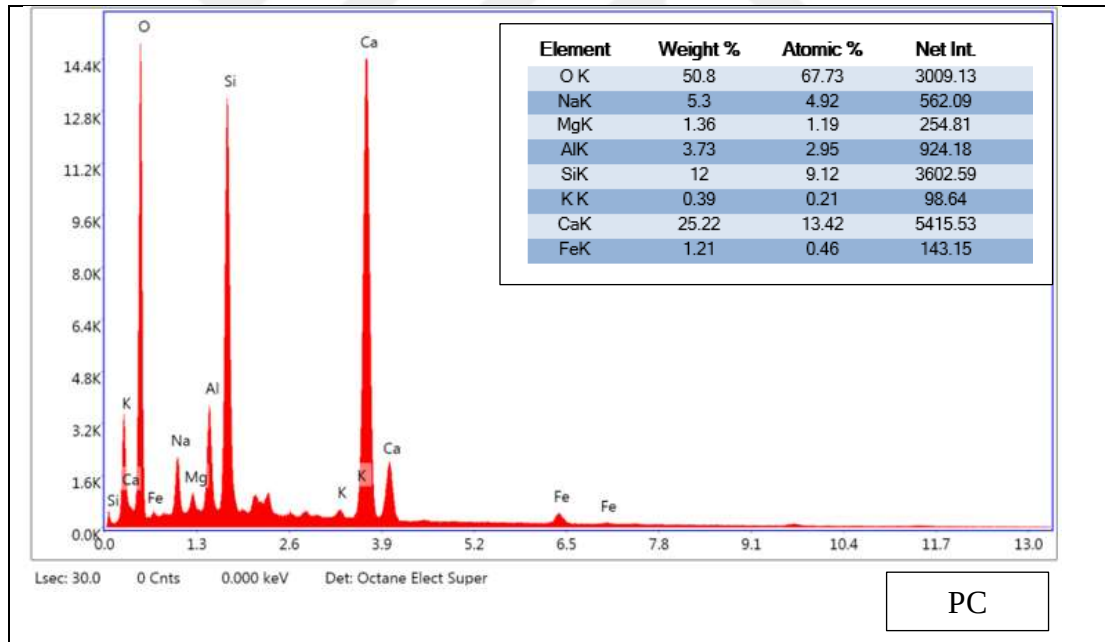
- Kompakt ve yoğun bir içyapı gözlenmiştir. Çatlak gelişimi minimum düzeydedir. Bu durum, sıvı sodyum silikat aktivasyonunun ASR'yi baskılayıcı etkisinin güçlü olduğunu ve homojen bir jel faz oluşumunu desteklediği değerlendirilmiştir.

Sodyum hidroksit ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufunun görüntüleri incelendiğinde;

- Mikro yapıda düzensiz partiküller, yer yer gözenekli bölgeler ve mikro çatlaklar gözlenmiştir.

3.10.2. Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDX) Sonuçları

Çimento kullanılarak üretilen referans numuneler ve farklı aktivatörlerle alkali aktivasyonu yapılmış yüksek fırın cüruf numuneleri üretildikten sonra alkali silika reaksiyonu şartlarında bekletilmiş; 14 günlük enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) nokta analiz sonuçları Şekil 53, Şekil 54, Şekil 55 ve Şekil 56'da verilmiştir.



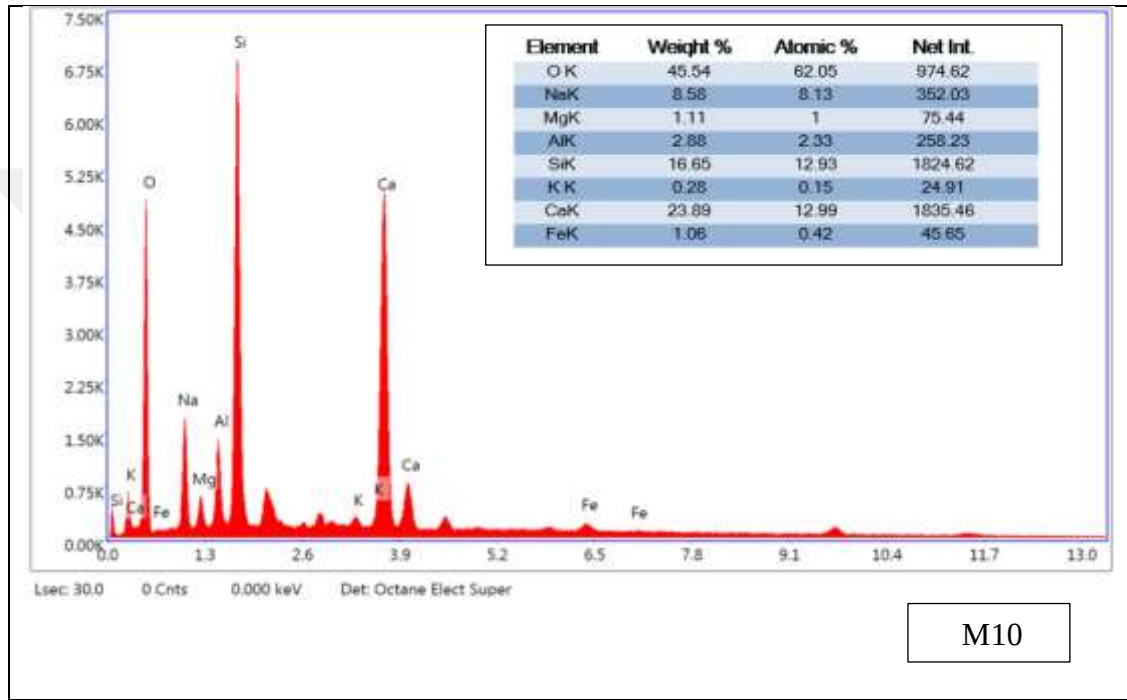
Şekil 53. Referans numunenin 14 günlük EDX sonuçları

Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ile ilgili şekiller incelendiğinde referans numunede kütlece; oksijen oranı %50,8, sodyum oranı %5,3, magnezyum oranı %1,36, alüminyum oranı %3,73, silisyum oranı %12, potasyum oranı %0,39, kalsiyum oranı %25,22 ve demir oranı %1,21 olarak görülmektedir.

Bu piklerden en yüksek pikler oksijen, silisyum ve kalsiyum olarak ortaya çıkmıştır.

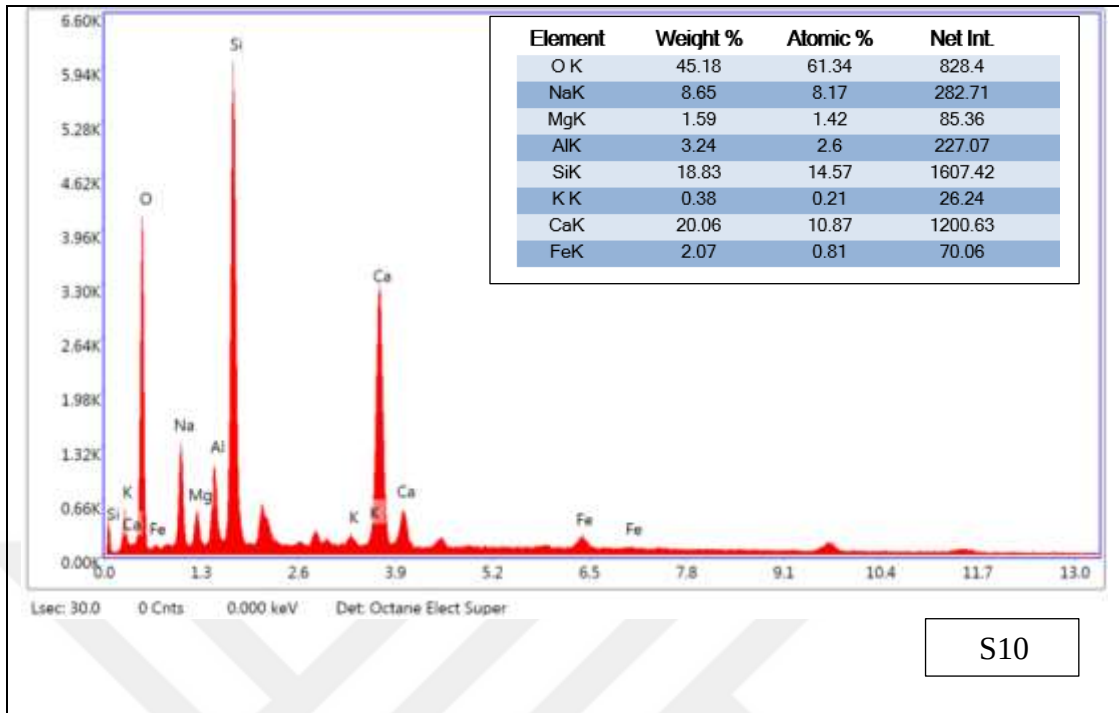
Bu elementel dağılım, harç numunesinin temel olarak silikat, kalsiyum alüminat ve alkali içerikli fazlardan oluştuğunu göstermektedir.

Elde edilen bu EDX spektrumu, XRD sonuçlarıyla da uyumlu olup alkali aktivasyon sonucu oluşan yeni bağlayıcı fazların varlığını desteklemektedir.



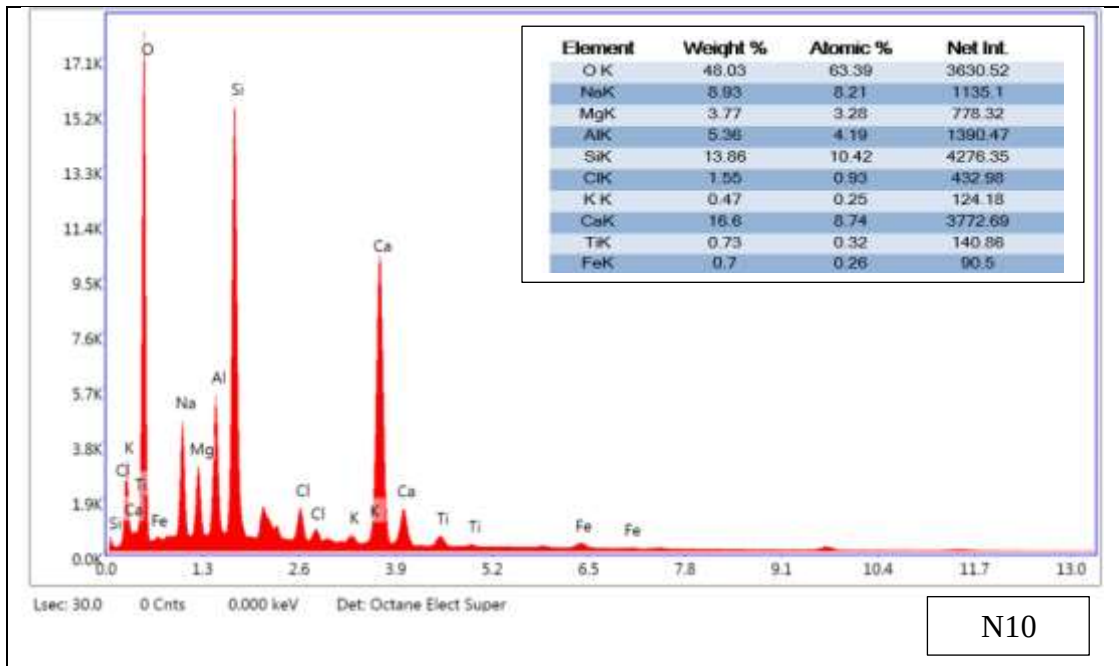
Şekil 54. Sodyum metasilikat numunesinin 14 günlük EDX sonuçları

Sodyum metasilikat ile %10 Na⁺ oranında aktive edilmiş olan yüksek fırın cürufu numunesinde kütlece; oksijen oranı %45,54, sodyum oranı %8,58, magnezyum oranı %1,11, alüminyum oranı %2,88, silisyum oranı %16,65, potasyum oranı %0,28, kalsiyum oranı %23,89 ve demir oranı %1,06 olarak görülmektedir.



Şekil 55. Sıvı sodyum silikat numunesinin 14 günlük EDX sonuçları

Sıvı sodyum silikat ile %10 Na⁺ oranında aktive edilmiş olan yüksek fırın cürufu numunesinde kütlece; oksijen oranı %45,18, sodyum oranı %8,65, magnezyum oranı %1,59, alüminyum oranı %2,60, silisyum oranı %18,83, potasyum oranı %0,38, kalsiyum oranı %20,06 ve demir oranı %2,07 olarak görülmektedir.

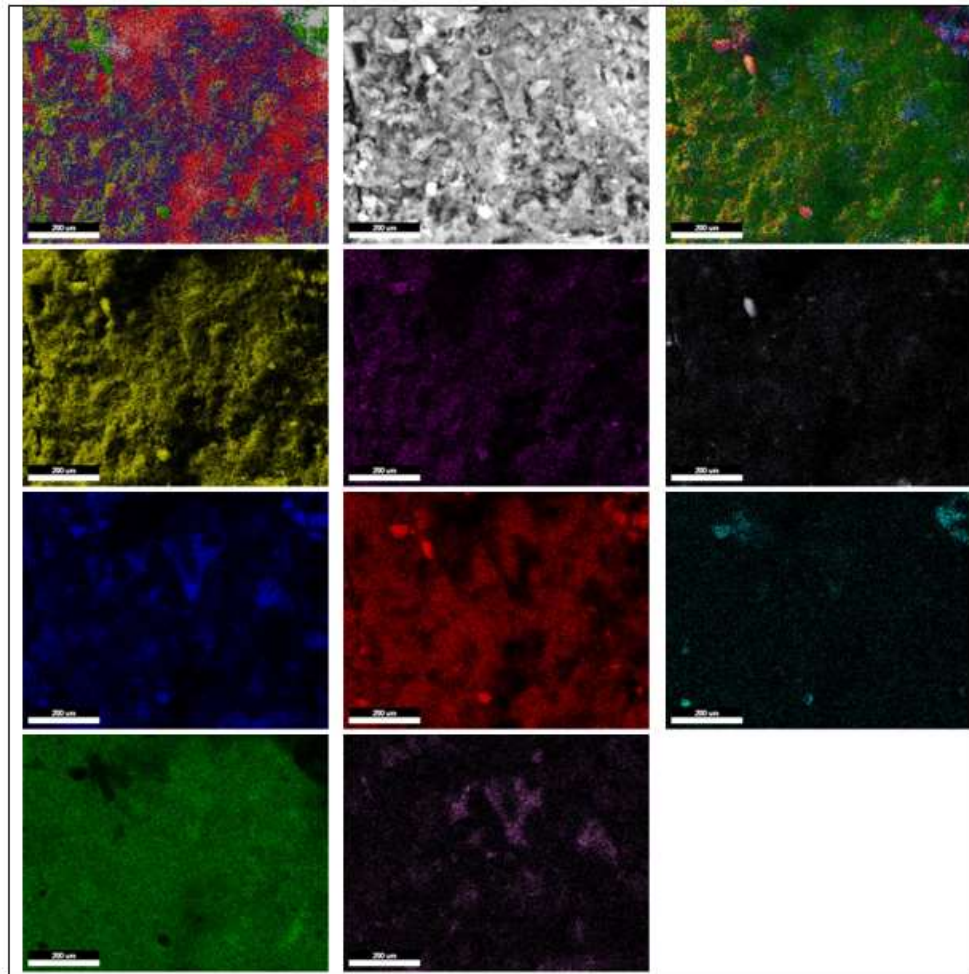


Şekil 56. Sodyum hidroksit numunesinin 14 günlük EDX sonuçları

Sodyum hidroksit ile %10 Na⁺ oranında aktive edilmiş olan yüksek fırın cürufu numunesinde numunesinde kütlece; oksijen oranı %48,03, sodyum oranı %8,93, magnezyum oranı %3,77, alüminyum oranı %5,36, silisyum oranı %13,86, potasyum oranı %0,47, kalsiyum oranı %16,60 ve demir oranı %0,70 olarak görülmektedir.

3.10.3. Element Haritalama Yöntemi Sonuçları

Portland çimentosuyla üretilmiş olan referans numune ile birlikte sodyum metasilikat, sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile aktive edilmiş olan yüksek fırın cürufu esaslı harç çubuğu numuneleri 14 gün boyunca alkali silika reaksiyonu şartları olan 1M ve 80°C sıcaklıkta bulunan etüvde bekletilmiştir. Referans numunesinde ve %10 oranında sodyum içeren metasilikat, sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksitle numunelerinde element haritalama deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçları verilmiştir. Şekil 57'de 14 günlük referans numunesinin sonuçları bulunmaktadır.

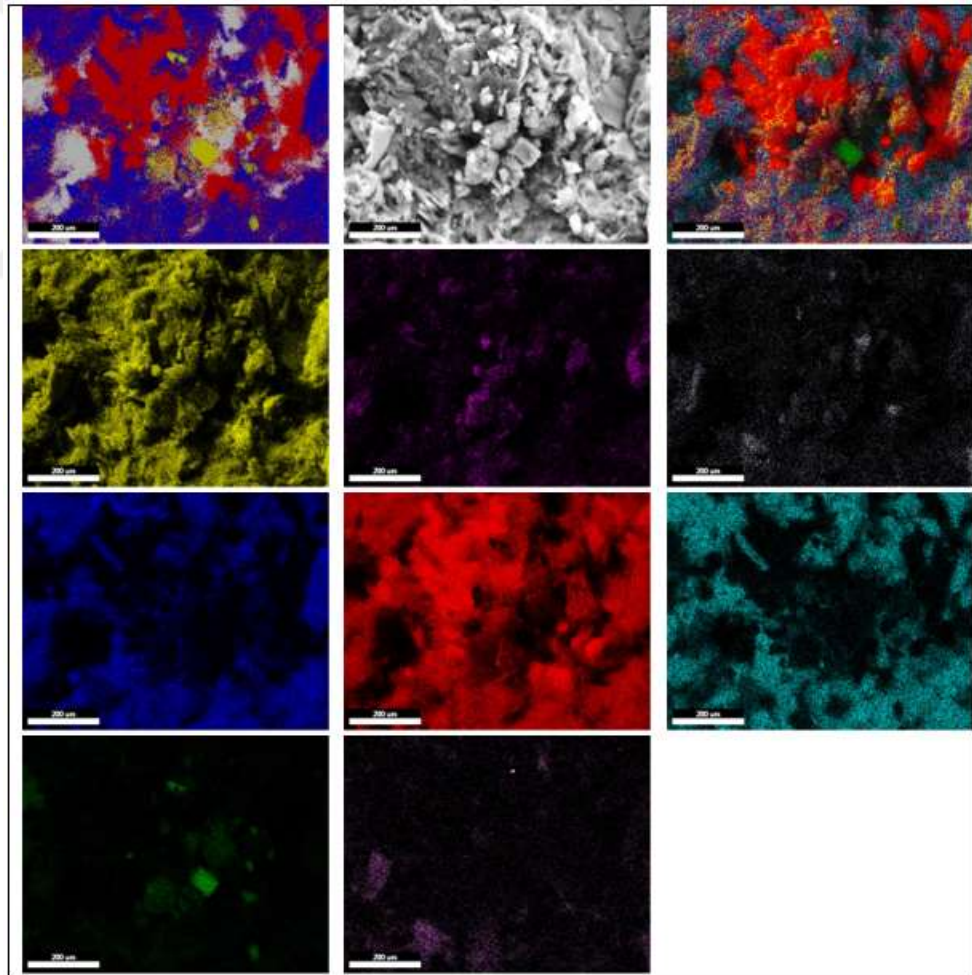


Şekil 57. Referans numunesinin element haritalaması

İlk üç sıra bütün elementleri içermektedir. İkinci satır soldan itibaren sırasıyla O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Fe elementlerin göstermektedir. Sarı renge sahip oksijen, mor renge sahip sodyum, gri renge sahip magnezyum, mavi renge sahip alüminyum, kırmızı renge sahip silisyum, turkuaz renge sahip potasyum, yeşil renge sahip kalsiyum, pembe renge sahip demir elementinin dağılımını işaret etmektedir.

Referans numunesi içerisindeki Ca elementinin en yoğun ve homojen bir şekilde dağılım gösterdiği, ikincil olarak ise Si elementinin yoğun olduğu değerlendirilmiştir.

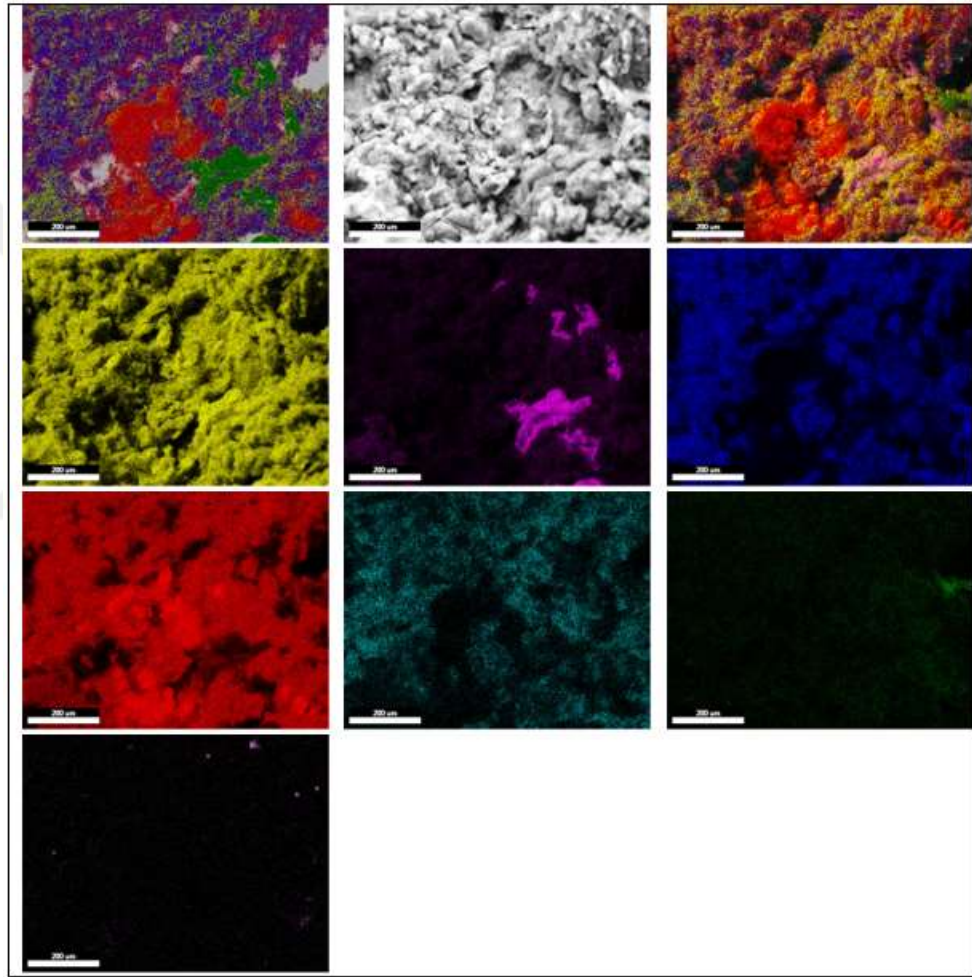
Şekil 58’de %10 oranında sodyum içeren ve metasilikat ile aktive edilmiş yüksek fırın cüruf numunesi sonuçları verilmiştir. İlk üç sıra bütün elementleri içermekte, sonra soldan itibaren sırasıyla O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Fe elementleri göstermektedir.



Şekil 58. Metasilikat ile aktive edilen numunenin element haritalaması

%10 oranında sodyum içeren metasilikat ile aktive edilmiş olan yüksek fırın cüruf numunesinde Si elementinin en yoğun ve homojen bir şekilde dağılım gösterdiği ve Al elementinin ise ikincil olarak yaygın dağılım gösterdiği değerlendirilmiştir.

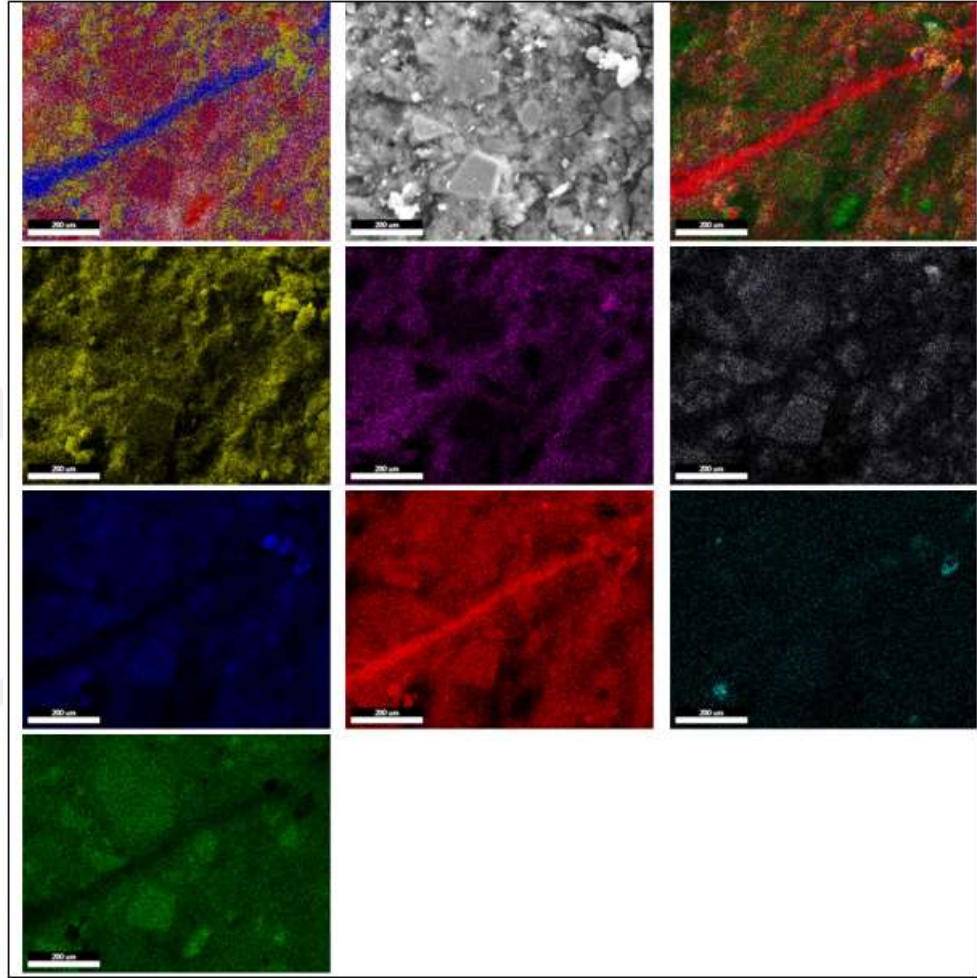
Şekil 59'da %10 oranında sodyum içeren ve sıvı sodyum silikat ile aktive edilmiş yüksek fırın cüruf numunesi sonuçları verilmiştir. İlk üç sıra bütün elementleri içermekte, sonra soldan itibaren sırasıyla O, Na, Al, Si, K, Ca, Fe elementleri göstermektedir.



Şekil 59. Sodyum silikat ile aktive edilen numunenin element haritalaması

%10 oranında sodyum içeren sıvı sodyum silikat ile aktive edilmiş olan yüksek fırın cüruf numunesinin element haritası incelendiğinde, sodyum metasilikat ile aktive edilen yüksek fırın cüruf numunesine benzer şekilde belirgin bir Si yoğunluğu gözlemlenmiş ve Al elementinin ise ikincil olarak yaygın dağılım gösterdiği değerlendirilmiştir.

Şekil 60'da %10 oranında sodyum içeren ve sodyum hidroksit ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu sonuçları verilmiştir. İlk üç sıra bütün elementleri içermekte, sonra soldan itibaren sırasıyla O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca elementleri göstermektedir.



Şekil 60. Sodyum hidroksit ile aktive edilen numunenin element haritalaması

%10 oranında sodyum içeren sodyum hidroksit ile aktive edilmiş olan yüksek fırın cüruf numunesinin element haritası incelendiğinde, Ca ile Si elementlerinin yoğun olarak görüldüğü ve Al elementinin ise üçüncül olarak bulunduğu değerlendirilmektedir.

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Tartışma ve Sonuçlar

Bu bölümde, yüksek fırın cürufu esaslı alkali ile aktive edilmiş ve reaktif silis içeren agrega kullanılarak üretilen harç numunelerinin, alkali-silika reaksiyonu (ASR) koşullarında 80°C sıcaklıkta 1 M sodyum hidroksit çözeltisi içerisinde bekletilerek gerçekleştirilen deneysel çalışmalara ait bulgular ve değerlendirmeler sunulmaktadır. Numuneler üzerinde; işlenebilirlik, birim hacim ağırlık, su emme ve boşluk oranı, eğilme ve basınç dayanımı, ultrasonik atımlı dalga hızı, kılcal su emme katsayısı ve ASR etkilerinin belirlenmesine yönelik olarak hızlandırılmış harç çubuğu deneyi (ASTM C1260) gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca, içyapısal karakterizasyon amacıyla X-ışını kırınımı (XRD), alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ve element haritalama (elemental mapping) analizleri yapılmıştır. Elde edilen tüm deneysel veriler analiz edilmiş, aktivatör tipi, sodyum içeriği ve ASR etkisi ile numunelerin mikroyapısal özellikleri arasındaki ilişkiler tartışılmıştır.

4.1.1. İşlenebilirlik Deneyi ile İlgili Sonuçlar

- Yayılma deneyi sonuçlarına göre, Portland çimentosu ile üretilen referans harç numunesinin yayılma çapı 143 mm olarak ölçülmüştür. Alkali ile aktive edilen sistemlerde ise, kullanılan aktivatör tipine bağlı olarak yayılma çaplarında belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. Sodyum metasilikat ile aktive edilen karışımlarda en yüksek yayılma çapı 226 mm, sıvı sodyum silikat ile aktive edilenlerde 215 mm ve sodyum hidroksit kullanılan sistemlerde ise 168 mm olarak ölçülmüştür.

- Referans numune ile karşılaştırıldığında; sodyum metasilikat ile aktive edilen harçlarda yayılma çapında yaklaşık %57, sıvı sodyum silikat ile aktive edilenlerde %50 ve sodyum hidroksit içeren sistemlerde ise %17 oranında artış tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, özellikle sodyum metasilikat ve sıvı sodyum silikat aktivatörlerinin harç karışımlarına daha yüksek işlenebilirlik sağladığını göstermektedir.
- Genel olarak değerlendirildiğinde, yüksek fırın cürufu esaslı alkali ile aktive edilen harç sistemlerinin, Portland çimentosu esaslı referans numuneye kıyasla daha iyi işlenebilirlik özellikleri sunduğu görülmektedir. Bununla birlikte, sodyum oranındaki artışın yayılma çapı üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı ve benzer yayılma değerlerinin elde edildiği anlaşılmaktadır. Bu durum, aktivatör tipinin işlenebilirlik üzerinde daha belirleyici bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

4.1.2. Birim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deneyi ile İlgili Sonuçlar

- Referans numunenin birim hacim ağırlığı, 2,14-2,16 g/cm³ arasında ölçülmüştür. Cüruf esaslı alkali ile aktive edilen karışımlarda ise; sodyum metasilikatlı numuneler için bu değerler 1,98-2,00 g/cm³, sıvı sodyum silikatlı numuneler için 2,03-2,06 g/cm³, sodyum hidroksitli numuneler için ise 2,00-2,03 g/cm³ arasında ölçülmüştür. Alkali ile aktive edilen tüm sistemlerin, Portland çimentolu referans numuneye göre daha düşük birim hacim ağırlığına sahip olduğunu göstermektedir.
- Numunelerin 14 ve 28 günlük birim hacim ağırlıklarının birbirine oldukça yakın olduğu ve zamanla anlamlı bir değişim göstermediği gözlemlenmiştir. Karışımların kendi içindeki birim hacim ağırlık değişimlerinin ± 1 aralığında kaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, sodyum oranının artışının birim hacim ağırlık üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı anlaşılmıştır.
- Özgül ağırlık sonuçları incelendiğinde, değerlerin 2,31 g/cm³ ile 2,44 g/cm³ arasında değiştiği görülmüştür. En yüksek özgül ağırlık değeri de yine Portland çimentosu ile üretilmiş referans numunede ölçülmüştür. Alkali ile aktive edilen karışımların özgül ağırlıkları, referans numuneye göre daha düşük çıkmıştır. 28 günlük numunelerde özgül ağırlıklar, 14 günlük değerlere kıyasla hafif artış göstermiştir. Bununla birlikte, sodyum oranındaki değişimin özgül ağırlık üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

4.1.3. Su Emme ve Boşluk Oranı Tayini ile İlgili Sonuçlar

- Portland çimentosu ile üretilmiş referans numunesinin 14 ve 28 günlük su emme oranları sırasıyla %9,8 ve %10,1 olarak belirlenmiştir. Alkali ile aktive edilen sistemlerde su emme oranlarının aktivatör tipine göre farklılıklar göstermiştir.
- Sodyum metasilikat ve sıvı sodyum silikat ile aktive edilen cüruf esaslı harç numuneleri, referans numuneye ve sodyum hidroksit ile aktive edilen karışımlara kıyasla daha düşük su emme oranlarına sahiptir. Bu durum, özellikle sıvı sodyum silikat içeren karışımlarda daha belirgindir ve bu karışımlar en düşük su emme değerlerini göstermiştir. Buna karşılık, sodyum hidroksit ile aktive edilen numunelerde, hem 14 hem de 28 günlük su emme oranlarının referans numuneden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Sodyum oranının artışı dikkate alındığında, genel olarak su emme oranlarının aktivatör türüne bağlı kaldığı ve sodyum oranındaki artışın su emme üzerinde belirgin bir etki oluşturmadığı, yani benzer değerlerin elde edildiği anlaşılmaktadır.
- Boşluk oranı açısından yapılan değerlendirmelerde, Portland çimentolu referans numunenin boşluk oranı 14. günde %17,9 iken 28. gün sonunda %19,8'e yükselmiş ve zamanla artış eğilimi göstermiştir. Sodyum metasilikat ile aktive edilen karışımlarda, 14 günlük boşluk oranları %6, %8 ve %10 sodyum oranları için sırasıyla %15,2, %14,6 ve %14,0 olarak ölçülmüştür. Sıvı sodyum silikat ile aktive edilen karışımlarda ise aynı oranlar için boşluk oranları sırasıyla %13,8, %13,5 ve %13,7 olarak elde edilmiştir. En yüksek boşluk oranları ise sodyum hidroksit ile aktive edilen karışımlarda gözlemlenmiş olup, %19,9, %19,2 ve %18,4 şeklinde sıralanmıştır.
- 28 günlük boşluk oranlarının da 14 günlük verilere benzer bir dağılım gösterdiği, ancak genel olarak zamanla boşluk oranlarında bir miktar artış olduğu görülmüştür. Aktivasyon sistemlerinde sodyum oranı arttıkça boşluk oranlarında azalma eğilimi gözlemlenmiş ve bu durum tüm aktivatör tipleri için benzer şekilde ortaya çıkmıştır.
- Genel olarak, tüm karışımlarda zamanla meydana gelen alkali-silika reaksiyonuna bağlı mikro çatlak oluşumlarının, özellikle kılcal düzeydeki çatlakların, hem su emme oranlarını hem de boşluk hacmini artırdığı değerlendirilmiştir.

4.1.4. Eğilme Dayanımı Deneyi ile İlgili Sonuçlar

- Eğilme dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde, en düşük dayanım değeri Portland çimentosu ile üretilmiş referans numunede ölçülmüş olup, 14 günlük değer 6,7 MPa, 28 günlük değer ise 6,4 MPa olarak tespit edilmiştir. Buna karşılık, en yüksek eğilme dayanımı, sıvı sodyum silikat ile aktive edilen ve %10 sodyum içeren yüksek fırın cürufu esaslı harç numunesinde 14. gün sonunda 12,3 MPa olarak elde edilmiştir.
- 14 günlük eğilme dayanımları; sodyum metasilikat ile aktive edilen karışımlar için sırasıyla %6, %8 ve %10 sodyum oranlarında 9,3 MPa, 9,3 MPa ve 9,7 MPa olarak ölçülmüştür. Aynı oranlarda sıvı sodyum silikat ile aktive edilen sistemler için bu değerler 12,1 MPa, 12,2 MPa ve 12,3 MPa iken; sodyum hidroksit ile aktive edilen sistemlerde sırasıyla 7,3 MPa, 7,5 MPa ve 8,1 MPa olarak kaydedilmiştir.
- 28 günlük eğilme dayanımları, sodyum metasilikat ile aktive edilen karışımlar için eğilme dayanımları sırasıyla 8,0 MPa, 8,2 MPa ve 8,1 MPa; sıvı sodyum silikat ile aktive edilen karışımlar için 9,4 MPa, 10,5 MPa ve 11,2 MPa; sodyum hidroksit ile aktive edilen karışımlar için ise 6,1 MPa, 6,9 MPa ve 7,0 MPa olarak ölçülmüştür.
- Genel olarak değerlendirildiğinde, hem 14 hem de 28 günlük eğilme dayanımı açısından en yüksek performans sıvı sodyum silikat ile aktive edilen harçlarda elde edilmiştir. Buna karşın, en düşük eğilme dayanımları sodyum hidroksit ile aktive edilen sistemlerde gözlemlenmiştir. Ayrıca, 28 günlük eğilme dayanımı değerlerinin genel olarak 14 günlük değerlere göre daha düşük olduğu dikkat çekmiştir. Bu durum, zamanla gelişen alkali-silika reaksiyonuna bağlı olarak harç içyapısında oluşan kılcal çatlakların, özellikle çekme etkisi altındaki eğilme dayanımı üzerinde olumsuz etkide bulunmasıyla açıklanabilir.

4.1.5. Basınç Dayanımı Deneyi ile İlgili Sonuçlar

- Basınç dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde, Portland çimentosu ile üretilmiş referans harç numunesinin 14 günlük dayanımı 36,8 MPa, 28 günlük dayanımı ise 35,7 MPa olarak ölçülmüştür. Alkali ile aktive edilmiş sistemlerde ise tüm karışımların, referans numuneye kıyasla daha yüksek basınç dayanımı gösterdiği belirlenmiştir.

- Sodyum metasilikat ile aktive edilen karışımlarda, 14 günlük basınç dayanımları sırasıyla %6, %8 ve %10 sodyum oranı için 51,3 MPa, 52,4 MPa ve 55,3 MPa olarak elde edilmiştir. Aynı oranlar için sıvı sodyum silikat ile aktive edilen numunelerin basınç dayanımları sırasıyla 60,5 MPa, 62,6 MPa ve 65,3 MPa iken, sodyum hidroksit ile aktive edilen karışımlarda bu değerler sırasıyla 40,6 MPa, 42,1 MPa ve 45,6 MPa olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre, en yüksek 14 günlük basınç dayanımı 65,3 MPa ile %10 sodyum içeren ve sıvı sodyum silikatla aktive edilen cüruf esaslı harç numunesinde elde edilmiştir.
- 28 günlük basınç dayanımı açısından değerlendirildiğinde; sodyum metasilikat ile aktive edilen karışımlar için sırasıyla 50,3 MPa, 51,9 MPa ve 52,4 MPa; sıvı sodyum silikat ile aktive edilen karışımlar için 61,6 MPa, 61,2 MPa ve 62,5 MPa; sodyum hidroksit ile aktive edilen karışımlar için ise 40,2 MPa, 41,4 MPa ve 42,8 MPa değerleri elde edilmiştir.
- Genel olarak, tüm alkali ile aktive edilmiş karışımların referans çimento esaslı harçlara göre daha yüksek basınç dayanımı gösterdiği ve en yüksek dayanımın sıvı sodyum silikat ile aktive edilen sistemlerde elde edildiği, en düşük dayanımın ise sodyum hidroksit ile aktive edilen sistemlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin 14 günlük değerlerle benzer seviyede olduğu veya hafif bir düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir. Farklı aktivatörlerle hazırlanan sistemlerde sodyum oranındaki artışın, basınç dayanımı üzerinde sınırlı fakat pozitif bir etkiye sahip olduğu değerlendirilmiştir.

4.1.6. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Deneyi ile İlgili Sonuçlar

- Portland çimentosuyla hazırlanan referans numunenin 14 ve 28 günlük dalga hızları sırasıyla 2,73 km/s ve 2,64 km/s olarak ölçülmüştür. Portland çimentosu ile hazırlanan referans numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızlarının alkali ile aktive edilmiş cüruf esaslı harçlardan daha düşük olduğu görülmüştür.
- Alkali ile aktive edilmiş olan cüruf numunelerin 14 günlük sonuçlarına göre; en iyi sonuçların genellikle sıvı sodyum silikat ile aktive edilen numunelerde %6, %8 ve %10 oranında sodyum içeren numunelerde sırasıyla 3,29 km/s, 3,24 km/s ve 3,34 km/s olarak ölçülmüştür. Sodyum metasilikat ile aktive edilmiş numunelerin %6, %8 ve

%10 oranında sodyum içeren numunelerde ise 3,17 km/s, 3,18 km/s ve 3,20 km/s olarak ölçülmüştür. Üç farklı aktivatör arasında en düşük ultrasonik atımlı dalga hızı değerleri ise sodyum hidroksit ile aktive edilmiş %6, %8 ve %10 oranında sodyum içeren numunelerde 2,98 km/s, 3,01 km/s ve 2,99 km/s olarak belirlenmiştir.

- 28 günlük numunelerde yapılan ultrasonik atımlı dalga hızı deney sonuçları değerlendirildiğinde ise ultrasonik atımlı dalga hızı değerlerinin 14 günlük ölçüm sonuçlarına benzer ve yakın olduğu değerlendirilmiştir.
- Genel olarak değerlendirildiğinde, ultrasonik atımlı dalga hızının en yüksek olarak sıvı sodyum silikat ile aktive edilmiş numunelerde ölçülmüştür. Ayrıca sodyum oranının tüm aktivatör tiplerinde ultrasonik atımlı dalga hızını etkilemediği ve sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür.

4.1.7. Kılcal Su Emme Katsayısının Tayini ile İlgili Sonuçlar

- Yapılan deneysel çalışmalar kapsamında, hem birincil hem de ikincil kılcal su emme katsayısı değerleri 14 ve 28 günlük yaşta olmak üzere değerlendirilmiştir. Portland çimentosu ile üretilen referans harç numunesinin 14 günlük birincil kılcal su emme katsayısı 0,0384 ve ikincil kılcal su emme katsayısı 0,0010 olarak belirlenmiştir. 28 günlük numunelerde ise bu değerler sırasıyla 0,0410 ve 0,0024 olarak artış göstermiştir.
- Alkali ile aktive edilmiş cüruf esaslı sistemlerde, aktivatör tipi ve sodyum içeriğine bağlı olarak farklı kılcal su emme değerleri elde edilmiştir.
- 14 günlük yaşta: sodyum metasilikat ile aktive edilen numunelerde birincil su emme katsayısı %6, %8 ve %10 Na⁺ oranları için sırasıyla 0,0341, 0,0345 ve 0,0336; ikincil su emme katsayısı ise 0,0007, 0,0008 ve 0,0006 olarak hesaplanmıştır. Sıvı sodyum silikat ile aktive edilen karışımlarda birincil su emme katsayısı sırasıyla 0,0340, 0,0323 ve 0,0314; ikincil katsayı ise 0,0003, 0,0004 ve 0,0003 olarak ölçülmüştür. Sodyum hidroksit ile aktive edilen karışımlarda ise birincil su emme katsayısı sırasıyla 0,0495, 0,0454 ve 0,0438; ikincil katsayılar ise 0,0006, 0,0007 ve 0,0004 olarak hesaplanmıştır.

- Elde edilen sonuçlar, sıvı sodyum silikat ile aktive edilen karışımların hem birincil hem de ikincil kılcal su emme katsayısı bakımından en düşük değerlere sahip olduğunu ve bu sistemlerin en düşük kılcal geçirimsizliği sunduğunu göstermektedir.
- 28 günlük yaşta yapılan ölçümler de benzer eğilimler sergilemiş olup: sodyum metasilikat ile aktive edilen numunelerde birincil katsayılar 0,0390, 0,0375 ve 0,0346; ikincil katsayılar ise 0,0016, 0,0015 ve 0,0013 olarak hesaplanmıştır. Sıvı sodyum silikat ile aktive edilen karışımlarda birincil su emme katsayısı sırasıyla 0,0379, 0,0350 ve 0,0332; ikincil katsayılar ise 0,0012, 0,0009 ve 0,0008 olarak bulunmuştur. Sodyum hidroksit ile aktive edilen sistemlerde ise birincil su emme katsayısı sırasıyla 0,0515, 0,0488 ve 0,0459; ikincil katsayılar ise 0,0021, 0,0019 ve 0,0016 olarak elde edilmiştir.
- Bu veriler ışığında, sodyum hidroksit ile aktive edilen karışımların hem referans hem de diğer aktivatörlü sistemlere kıyasla daha yüksek kılcal su emme katsayılarına sahip olduğu, dolayısıyla daha geçirgen bir içyapıya işaret ettiği sonucuna ulaşılmıştır.
- Ayrıca, 28 günlük numunelerde birincil ve ikincil su emme katsayılarının, 14 günlük değerlere kıyasla genel olarak arttığı gözlemlenmiştir. Bu artışın, alkali-silika reaksiyonunun zamanla ilerlemesine ve bu süreçte gelişen kılcal çatlaklara bağlı olarak harç bünyesindeki geçirgenliğin artmasıyla ilişkili olduğu değerlendirilmiştir.
- Tüm aktivatör tiplerinde, sodyum oranı arttıkça hem birincil hem de ikincil kılcal su emme katsayısı değerlerinde azalma eğilimi gözlenmiştir. Bu durum, daha yüksek sodyum içeriğinin bağlayıcı matrisin daha yoğun ve geçirimsiz hale gelmesine katkı sağladığını göstermektedir.

4.1.8. Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi ile İlgili Sonuçlar

- Bu çalışmada, ASTM C1260 standardına uygun olarak hazırlanan harç çubukları 80°C sıcaklıktaki 1 M NaOH çözeltisi içerisinde 14 ve 210 güne kadar bekletilerek alkali-silika reaksiyonuna karşı uzamaları değerlendirilmiştir. Portland çimentosu ile üretilmiş referans numuneler, ASR'den en fazla etkilenen numune olmuş ve 14. günde %0,40, 210. günde ise %0,84 oranında boyca uzama göstermiştir. Bu yüksek uzama değerleri, ASR'nin ilerlemesi sonucu ciddi içyapısal bozulmaların meydana geldiğini göstermektedir.

- Sodyum metasilikat ile aktive edilen M6, M8 ve M10 numunelerinde 14 günlük uzama oranları sırasıyla %0,07, %0,05 ve %0,04; 210 günlük değerler ise %0,63, %0,41 ve %0,40 olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, Portland çimentosuna kıyasla çok daha düşük değerler olup, özellikle %10 sodyum içeren numunede boyca uzamanın %0,04 gibi oldukça düşük bir değerde kalması, ASR'ye karşı dirençli olduğunu göstermektedir.
- Sıvı sodyum silikat ile aktive edilen S6, S8 ve S10 numunelerinde ise 14. günde sırasıyla %0,06, %0,05 ve %0,03 oranlarında boyca uzama tespit edilmiştir. 210 günlük değerlere bakıldığında bu numunelerde uzamalar sırasıyla %0,42, %0,40 ve %0,36 olarak belirlenmiştir. Özellikle %10 sodyum içeren S10 numunesinde 14 günlük uzamanın %0,03 ile sınırlı kalması ve 210 günde dahi %0,36'yı geçmemesi, bu aktivatörün ASR'ye karşı en yüksek performansı gösterdiğini ortaya koymaktadır.
- Sodyum hidroksit ile aktive edilen N6, N8 ve N10 numunelerinde ise 14 günlük uzama oranları sırasıyla %0,10, %0,09 ve %0,06; 210 günlük değerler ise %0,60, %0,57 ve %0,45 olarak ölçülmüştür. Bu değerler, ASR'ye karşı belirli bir direnç sağlansa da, sıvı sodyum silikat ve sodyum metasilikat sistemlerine kıyasla daha yüksek uzama değerlerine sahiptir.
- Tüm aktivatör türleri incelendiğinde, boyca uzama değerlerinin aktivatör tipi ve sodyum oranına bağlı olarak azaldığı, en düşük uzamaların sıvı sodyum silikat ile aktive edilen sistemlerde elde edildiği görülmektedir. Sodyum metasilikat ile aktive edilen karışımlar da benzer şekilde düşük uzama değerleriyle ASR'ye karşı başarılı sonuçlar vermiştir. Sodyum hidroksit ile aktive edilen sistemlerin de olumlu etkiler gösterdiği ancak diğer iki aktivatöre göre bir miktar daha düşük performans sergilediği belirlenmiştir.
- Sonuç olarak, 14, 28 ve 210 günlük tüm uzama verileri değerlendirildiğinde, sıvı sodyum silikatın ASR kaynaklı bozulmaların önlenmesinde en etkili aktivatör olduğu, sodyum metasilikatın ise ona yakın başarılı sonuçlar sunduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, sodyum oranının %6'dan %10'a artırılması, tüm aktivatör türlerinde boyca uzamaları belirgin şekilde azaltarak ASR etkisini hafifletmiştir.

4.1.9 X Işını Kırını Yöntemi ile İlgili Sonuçlar

- XRD sonuçları incelendiğinde Portland çimentolu referans numunenin pik noktalarında daha çok kuvars piki görülmektedir. Bu pikin yanı sıra kalsiyum alüminat ve kalsit fazları da yoğun bir şekilde görülmektedir.
- Sodyum metasilikat ile aktive edilen numunede kuvars pikleri mevcut olmakla birlikte, kalsiyum alüminat ve sodyum kalsiyum alüminat fazlarına ait piklerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu, alkali aktivasyon sonucu yeni hidratasyon ürünlerinin meydana geldiğini ve bağlayıcı matrisin geliştiğini göstermektedir.
- Sıvı sodyum silikat ile aktive edilen numunede sodyum metasilikat ile aktive edilen numunelere benzer şekilde yeni fazların oluştuğu, özellikle amorf yapının arttığına işaret eden piklerin genişlediği ve şiddetlerinin azaldığı dikkat çekmektedir. Bu durumun, daha homojen ve ASR'ye karşı daha dirençli bir yapı oluşumunu desteklediği değerlendirilmiştir.
- Sodyum hidroksit ile aktive edilen karışımda, kuvars fazına ait pikler korunmuş olup, sodyum iyonu varlığı nedeniyle yeni olarak albit fazı da tespit edilmiştir.

4.1.10. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskopu, Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX) ve Element Haritalama Yöntemi ile İlgili Sonuçlar

- SEM görüntülerinde, Portland çimentolu referans numunede gözle görülür çatlaklar mevcuttur. Bu çatlakların ASR nedeniyle gelişen iç gerilmelerin bir sonucu olduğu değerlendirilmektedir. Sıvı sodyum silikat ile aktive edilen cüruf esaslı sistemlerde en kompakt ve ASR'ye karşı en dirençli yapı formasyonunu sağladığı değerlendirilmiştir. Sodyum metasilikat ile aktive edilen cüruf esaslı sistemlerde ise benzer şekilde olumlu sonuçlar vermiştir. Sodyum hidroksit ile aktive edilen cüruf esaslı sistemlerde mikro yapıda düzensiz partiküller, yer yer gözenekli bölgeler ve mikro çatlaklar gözlenmiştir.
- Bu çalışmada, referans Portland çimentosu esaslı harç ile farklı alkali aktivatörlerle %10 Na⁺ oranında aktive edilmiş yüksek fırın cürufu esaslı harç numunelerinin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) sonuçlarına göre; Referans numunede elde edilen EDX sonuçlarına göre, kütlece oksijen oranı %50,8, sodyum oranı %5,3, magnezyum oranı %1,36, alüminyum oranı %3,73, silisyum oranı %12,0, potasyum

oranı %0,39, kalsiyum oranı %25,22 ve demir oranı %1,21 olarak belirlenmiştir. Sodyum metasilikat ile %10 Na⁺ oranında aktive edilen yüksek fırın cürufu esaslı harç numunesinde oksijen %45,54, sodyum %8,58, magnezyum %1,11, alüminyum %2,88, silisyum %16,65, potasyum %0,28, kalsiyum %23,89 ve demir %1,06 olarak tespit edilmiştir. Sıvı sodyum silikat ile aktive edilen harç numunesinde oksijen oranı %45,18, sodyum %8,65, magnezyum %1,59, alüminyum %2,60, silisyum %18,83, potasyum %0,38, kalsiyum %20,06 ve demir %2,07 olarak belirlenmiştir. Sodyum hidroksit ile aktive edilen harçta oksijen oranı %48,03, sodyum %8,93, magnezyum %3,77, alüminyum %5,36, silisyum %13,86, potasyum %0,47, kalsiyum %16,60 ve demir %0,70 olarak tespit edilmiştir.

- Element haritalama analizleri, numunelerin mikroyapısal düzeyde O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Fe elementlerinin dağılımlarını ortaya koymuştur. Referans numunesi incelendiğinde, özellikle kalsiyum (Ca) elementinin matrise en yoğun ve en homojen şekilde dağılmış olduğu tespit edilmiştir. Bunu takiben, silisyum (Si) elementinin de yoğun bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir. Sodyum metasilikat ile %10 Na⁺ oranında aktive edilen yüksek fırın cürufu numunesinde, haritalama sonuçları silisyum (Si) elementinin matris genelinde en baskın ve homojen şekilde dağıldığını göstermektedir. İkincil olarak alüminyum (Al) yoğunluğu dikkat çekmiş ve bu elementin matriste geniş bir alana yayıldığı belirlenmiştir. Sıvı sodyum silikat ile %10 Na⁺ oranında aktive edilen yüksek fırın cürufu numunesinde, benzer bir dağılım eğilimi gözlemlenmiştir. Özellikle silisyum (Si) elementinin belirgin bir yoğunlukta ve homojenlikte dağılması dikkat çekmektedir. Alüminyum (Al) elementi ise yine ikincil seviyede geniş bir dağılım göstermektedir. Sodyum hidroksit ile %10 Na⁺ oranında aktive edilen yüksek fırın cürufu numunesinde ise dağılım farklılıkları daha belirgin hale gelmiştir. Kalsiyum (Ca) ve silisyum (Si) elementlerinin yoğunluğu ön plana çıkarken, alüminyum (Al) elementi üçüncül seviyede dağılmıştır.

4.2. Öneriler

- Potansiyel olarak alkali silika reaksiyonu gelişimi olabilecek yapılarda alkali aktive sistemlerin kullanımı desteklenebilir.
- Uçucu kül esaslı ya da uçucu kül ile birlikte yüksek fırın cürufunun hibrit olarak kullanıldığı alkali aktivasyonlu sistemler araştırılabilir.
- Metakaolin kullanılarak alkali aktivasyonu yapılan sistemlerde alkali silika reaksiyonuna etkileri araştırılabilir.
- Sıvı sodyum silikat kullanılarak aktive edilen sistemlerde modül sayısı değiştirilerek alkali silika reaksiyonu üzerindeki etkileri araştırılabilir.



KAYNAKÇA

1. Sabir, B. B., S. Wild, and J. Bai. "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review." **Cement and concrete composites** 23.6, 2001. 441-454.
2. Purdon, A.O., 1940. The action of alkalis on blast furnace slag, **Journal of the Society of Chemical Industry**.
3. Stanton, T.E. 1940. "Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate." **Proceedings of the American Society of Civil Engineers**, 66(10): 1781-1811.
4. Kupwade-Patil, Kunal, and Erez Allouche. "Effect of alkali silica reaction (ASR) in geopolymer concrete." **World of coal ash (WOCA) conference**, 2011.
5. Gillott J.E. 1964. "Mechanism and Kinetic of Expansion in the Alkali-Carbonate Rock reaction" **Canadian Journal of Earth Science**. Volume 1, 1964, pp 121-145
6. Tang M. et al 1986. "Mechanism of Alkali-Carbonate Reaction" **Proc. Int. 7th Int. AAR Conf.**, pp 275-179, Ottawa, Canada
7. Hadley, D.W. 1961. "Alkali reactivity of carbonate rocks - expansion and dedolomitization." **Proceedings of the Highway Research Board**, Vol. 40, pp. 462-474.
8. Swenson, E.G. and Gillott, J.E. 1964. "Alkali-carbonate reaction." **Highway Research Record**, No. 45, pp. 2 1-40.
9. A.M. Neville, Background to Minimising Alkali-Silica Reaction in Concrete. **The Structural Engineer**, 2005. 83(18): p. 18-20.
10. Stanton, T.E. 1940. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. **Proc. ASCE** 66, 1781–1811.
11. Meissner, H.S. .1941. Cracking in concrete due to expansion reaction between aggregate and high-alkali cement as evidenced in Parker Dam. **Proc. Am. Conc. Inst.** 37, 549–568.
12. Swamy R. N. 1992. The Alkali-silica reaction in concrete: **New York Van Nostrand Reinhold**.
13. Andiç, Ö. 2002. Alkali silika reaksiyonun mineral ve kimyasal katkıları kullanılarak kontrol altına alınması, Yüksek lisans tezi, **EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 15-20.
14. Thomas, M.D.A, Fournier, B., Folliard, K.J 2013. **Alkali Aggregate Reactivity**

(AAR) Facts Book, Austin, TX, 9-10.

15. Thomas, M. D. A., & Innis, F. A. 1999. "Use of fly ash to prevent alkali-silica reaction in concrete: a review." **ACI Materials Journal**, 96(5), 481-492.
16. Rear, Kenneth et al. 1994. "Alkali-aggregate reactivity: a summary." **PCI Journal** kasım-aralık, 26-35.
17. Helmuth, R. (1993). *Alkali-silica reactivity*. **Portland Cement Association**, Skokie, Illinois.
18. Figg J. 1983. "An Attempt to provide an explanation for engineers of the expansive reaction between alkalis and siliceous aggregates in concrete", **6th Int. Conf Alkalies in Concrete Copenhagen**.
19. Hobbs, D. W. 1988. Alkali-silica reaction in concrete. **London: Thomas Telford Ltd.**
20. Farny, J. ve Kosmatka, S. 1997. Diagnosis and control of alkali-aggregate reactions in concrete, **Portland Cement Association**.
21. Diamond, S. 1983. "Alkali reactions in concrete - Pore solution effects." Proceedings of the 6th International Conference on Alkalies in Concrete, (Eds. G.M. Idorn and Steen Rostam), **Danish Concrete Association**, Copenhagen, 155-166.
22. Hansen, W.C. 1952. "Studies relating to the mechanism by which the alkali-aggregate reaction proceeds in concrete." **Journal of the American Concrete Institute**, 15(3): 213-227.
23. Thomas, M.D.A. 2001. "The role of calcium hydroxide in alkali recycling in concrete." Materials Science of Concrete Special Volume on Calcium Hydroxide in Concrete, (Ed. J. Skalny, J. Gebauer and I. Odler), **American Ceramic Society**, Westerville, OH, 269-280.
24. Wang H. & Gillot J.E. 1992. Competitive nature of alkali-silica fume and alkali-aggregate silica reaction. **Magazine of Concrete Research**, 44 No.161, 235-239.
25. Chatterji, S. 1979. "The Role of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the breakdown of portland cement concrete due to alkali-silica reaction." **Cement and Concrete Research**, 9(2): 185-188.
26. Chatterji, S. ve Clausson-Kass, N.F. 1984. "Prevention of alkali-silica expansion by using slag-portland cement." **Cement and Concrete Research**, 14(6): 816-818.
27. Bleszynski, R.F. ve Thomas, M.D.A. 1998. "Microstructural studies of alkali-silica reaction in fly ash concrete immersed in alkaline solutions." **Advanced Cement**

Based Materials, 7: 66-78.

28. Iler, R.K. 1979. The Chemistry of Silica. **Wiley-Interscience**, New York, 886 p.
29. Urhan, S. 1987. "Alkali silica and pozzolanic reactions in concrete. Part 1: Interpretation of published results and an hypothesis concerning the mechanism." **Cement and Concrete Research**, 17: 141-152.
30. Dent Glasser, L.S. and Kataoka, N. 1981b. "The chemistry of alkali-aggregate reactions." **Cement and Concrete Research**, 11: 1-9.
31. ERDOĞAN, T. Y., "Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri", **THBB Yayınları**, 2004
32. Matthes, Winnie; Vollpracht, Anya; Villagrán, Yury et al. / Ground granulated blast-furnace slag. Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 238-SCM, **Working Group 4. Vol. 25 Springer Netherlands**, 2017. pp. 1-53 (RILEM State-of-the-Art Reports).
33. N.M. Piatak, M.B. Parsons, R.R. Seal, Characteristics and environmental aspects of slag: a review, **Appl. Geochem.** 57 2015. 236–266.
34. WINTER, N., "Understanding Cement", **WHD Microanalysis Consultants**, 2009.
35. TOKYAY, M., ve ERDOĞDU, K., "Cüruflar ve Cüruflu Çimentolar", **TÇMB Yayınları**, 2011.
36. P.C. Nkinamubanzi, M. Baalbaki, J. Bickley, P.C. Aitcin, The use of slag for making high performance concrete, in: **Sixth NCB International Seminar on Cement and Building Materials**, XIII, NCB, New Delhi, 1998. pp. 13-39
37. Özbay, Erdoğan, Mustafa Erdemir, and Halil İbrahim Durmuş. "Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties—A review." **Construction and Building Materials** 105 2016. 423-434.
38. S.C. Pal, A. Mukherjee, S.R. Pathak, Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete, **Cem. Concr. Res.** 33 2003. 1481– 1486.
39. A.M. Neville, Properties of Concrete, fourth ed., ELBS Publication, **Addison– Wesley Longman Limited**, Essex, UK, 1996.
40. Stutterheim, N., "Portland Blast-Furnace Cement – A Case for Separate Grinding of Slag," Proceedings, Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement (Tokyo,1986), **Cement Association of Japan**, Part IV, Tokyo, 1969. pp. 270-274.
41. Spellman, L.U., "Granulated Blast-Furnace Slag as a Mineral Admixture," **Concrete**

- International**, ACI, July 1982. pp. 66-71.
42. Ghosh, K., Ghosh P., "Alkali-Activated Fly Ash Blast Furnace Slag Composites" **CRC Press**, 2020.
 43. Pacheco-Torgal, Fernando, et al., eds. Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes. **Elsevier**, 2014.
 44. Amer, Ismail, et al. "A review on alkali-activated slag concrete." **Ain Shams Engineering Journal** 12.2 2021. 1475-1499.
 45. Pacheco-Torgal F, Labrincha J, Leonelli C, Palomo A, Chindaprasit P. Handbook of alkali-activated cements, **mortars and concretes**. **Elsevier**; 2014.
 46. Phoo-ngernkham T, Maegawa A, Mishima N, Hatanaka S, Chindaprasit P. Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA–GBFS geopolymer. **Construction Building Materials** 2015. 91:1–8.
 47. Phoo-ngernkham T, Hanjitsuwan S, Damrongwiriyapap N, Chindaprasit P. Effect of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on strengths of alkali activated high calcium fly ash containing Portland cement. **KSCE J Civ Eng** 2017. 21(6):2202–10.
 48. Duxson P, Fernández-Jiménez A, Provis JL, Lukey GC, Palomo A, van Deventer JSJ. Geopolymer technology: the current state of the art. **J Mater Sci** 2007. 42 (9):2917–33.
 49. Amer, Ismail, et al. "A review on alkali-activated slag concrete." **Ain Shams Engineering Journal** 12.2 2021. 1475-1499.
 50. Puertas F, Fernández-Jiménez A, Blanco-Varela MT. Pore solution in alkaliactivated slag cement pastes. Relation to the composition and structure of calcium silicate hydrate. **Cem Concr Res** 2004. 34(1):139–48.
 51. Song S, Sohn D, Jennings HM, Mason TO. Hydration of alkali-activated ground granulated blast furnace slag. **J Mater Sci** 2000. 35(1):249–57.
 52. Lee WKW, Van Deventer JSJ. The effect of ionic contaminants on the early-age properties of alkali-activated fly ash-based cements. **Cem Concr Res** 2002. 32 (4):577–84.
 53. Kupwade-Patil, Kunal, and Erez Allouche. "Effect of alkali silica reaction (ASR) in geopolymer concrete." **World of coal ash (WOCA) conference**. 2011.
 54. Pouhet, Raphaëlle, and Martin Cyr. "Alkali–silica reaction in metakaolin-based geopolymer mortar." **Materials and Structures** 48.3 2015. 571-583.
 55. Krivenko, Pavel, et al. "Mechanism of preventing the alkali–aggregate reaction in

- alkali activated cement concretes." **Cement and Concrete Composites** 45 2014. 157-165.
56. Williamson, Trevor, and Maria CG Juenger. "The role of activating solution concentration on alkali-silica reaction in alkali-activated fly ash concrete." **Cement and Concrete Research** 83 2016. 124-130.
 57. Shi, Zhenguo, et al. "Comparison of alkali-silica reactions in alkali-activated slag and Portland cement mortars." **Materials and Structures** 48.3 2015. 743-751.
 58. Shi, Zhenguo, et al. "Effect of alkali dosage on alkali-silica reaction in sodium hydroxide activated slag mortars." **Construction and Building Materials** 143 2017. 16-23.
 59. Slaty, Faten, et al. "Durability of alkali activated cement produced from kaolinitic clay." **Applied Clay Science** 104 2015. 229-237.
 60. Puertas, F., et al. "Alkali-aggregate behaviour of alkali-activated slag mortars: Effect of aggregate type." **Cement and Concrete Composites** 31.5 2009. 277-284.
 61. García-Lodeiro, Inés, A. Y. Palomo, and Ana Fernández-Jiménez. "Alkali-aggregate reaction in activated fly ash systems." **Cement and Concrete Research** 37.2 2007. 175-183.
 62. Wang, Wei, and Takafumi Noguchi. "Alkali-silica reaction (ASR) in the alkali-activated cement (AAC) system: A state-of-the-art review." **Construction and Building Materials** 252 2020. 119105.
 63. Rodrigue, Alexandre, et al. "Alkali-silica reaction in alkali-activated combined slag and fly ash concretes: The tempering effect of fly ash on expansion and cracking." **Construction and Building Materials** 251 2020. 118968.
 64. Shi, Zhenguo, et al. "Alkali-silica reaction in waterglass-activated slag mortars incorporating fly ash and metakaolin." **Cement and Concrete Research** 108 2018. 10-19.
 65. Li, Zihui, Robert J. Thomas, and Sulapha Peethamparan. "Alkali-silica reactivity of alkali-activated concrete subjected to ASTM C 1293 and 1567 alkali-silica reactivity tests." **Cement and Concrete Research** 123, 2019. 105796.
 66. He, Pingping, et al. "ASR expansion of alkali-activated cement glass aggregate mortars." **Construction and Building Materials** 261 2020. 119925.
 67. Yang, Mijia, Shree Raj Paudel, and Eric Asa. "Comparison of pore structure in alkali activated fly ash geopolymer and ordinary concrete due to alkali-silica reaction using

- micro-computed tomography." **Construction and Building Materials** 236, 2020. 117524.
68. Fernández-Jiménez, Ana, Inés García-Lodeiro, and A. Palomo. "Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials." **Journal of Materials Science** 42.9, 2007. 3055-3065.
 69. Tänzer, Ricarda, Yu Jin, and Dietmar Stephan. "Effect of the inherent alkalis of alkali activated slag on the risk of alkali silica reaction." **Cement and Concrete Research** 98, 2017. 82-90.
 70. Shi, Zhenguo, et al. "Effects of alkali dosage and silicate modulus on alkali-silica reaction in alkali-activated slag mortars." **Cement and Concrete Research** 111 2018. 104-115.
 71. Mahanama, D., et al. "Evaluating Effect of GGBFS in Alkali-Silica Reaction in Geopolymer Mortar with Accelerated Mortar Bar Test." **Journal of Materials in Civil Engineering** 31.8, 2019. 04019167.
 72. Singh, Jagmeet, and S. P. Singh. "Evaluating the alkali-silica reaction in alkali-activated copper slag mortars." **Construction and Building Materials** 253, 2020. 119189.
 73. Naghizadeh, Abdolhossein, and Stephen O. Ekolú. "Investigation of mixture factors influencing alkali-silica reaction in fly ash-based geopolymer mortars." **71st RILEM Annual Week ICACMS** 2017. 95-400.
 74. UEHARA, Motoki, Takatsune SATO, and Atsushi YAMAZAKI. "Suppression of Alkali Silica Reaction Using H⁺-type Geopolymer." **Quarterly Report of RTRI** 59.2, 2018. 90-96.
 75. Fernández-Jiménez, Ana, and F. Puertas. "The alkali-silica reaction in alkali-activated granulated slag mortars with reactive aggregate." **Cement and Concrete Research** 32.7, 2002: 1019-1024.
 76. Shi, Caijun, et al. "A review on alkali-aggregate reactions in alkali-activated mortars/concretes made with alkali-reactive aggregates." **Materials and Structures** 48.3, 2015. 621-628.
 77. Lahoti, Mukund, et al. "Use of alkali-silica reactive sedimentary rock powder as a resource to produce high strength geopolymer binder." **Construction and Building Materials** 155, 2017. 381-388.
 78. Yang, Tao, et al. "ASR potential of nickel slag fine aggregate in blast furnace slag-

- fly ash geopolymer and Portland cement mortars." **Construction and Building Materials** 262, 2020. 119990.
79. Rashidian-Dezfouli, Hassan, and Prasada Rao Rangaraju. "Study on the effect of selected parameters on the alkali-silica reaction of aggregate in ground glass fiber and fly ash-based geopolymer mortars." **Construction and Building Materials** 2020. 121549.
 80. Khan, Md Nabi Newaz, Ashish Kumer Saha, and Prabir Kumar Sarker. "Evaluation of the ASR of waste glass fine aggregate in alkali activated concrete by concrete prism tests." **Construction and Building Materials**, Vol.266: 2021. 121121.
 81. Hafçı, Alkan. Development of a new short-term concrete prism test method (scpt) to improve predictability for potential alkali reactivity of aggregates. 2019. Phd Thesis. **Middle East Technical University**.
 82. TS EN 197-1, 2012. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bilesim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.
 83. ASTM D1193-06, "Standard Specification for Reagent Water" **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2006.
 84. TS EN 196-1., 2016. Çimento Deney Metodları – Bölüm 1: Dayanım Tayini, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.
 85. TS EN 1015-3., 2000. Kagit harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile), **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.
 86. ASTM C642-13. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2013.
 87. TS EN 1015-11., 2000. Kagit harcı - Deney metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.
 88. ASTM C597-09, "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete" **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2009.
 89. ASTM C1585-13 "Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes", **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2013.
 90. Davies, G., ve Oberholster, R. E., 1987. "Use of the NBRI accelerated test to evaluate the effectiveness of mineral admixtures in preventing the alkali-silica reaction," **Cement and Concrete Research**, Vol 17, 1987. sf. 97–107.

91. ASTM C295-90, “Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete” **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 1990.
92. ASTM C856 / C856M-04 “Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete”, **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2004.
93. ASTM C1260-21, “Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method)”, **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2021.
94. ASTM C490-11, “Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete”, **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2011.
95. ASTM C150-07, “Standard Specification for Portland Cement” **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2007.
96. Fournier, B., ve Berube, M. A., 1991. “Application of the NBRI accelerated mortar bar test to siliceous carbonate aggregates produced in the St. Lawrence lowlands, part 2: proposed limits, rates of expansion, and microstructure of reaction products,” **Cement and Concrete Research**, Vol 21, sf. 1069–1082.
97. Hooton, R. D., and Rogers, C. A., 1992. “Development of the NBRI rapid mortar bar test leading to its use in North America,” Proceedings, **Ninth International Conference on AAR in Concrete**, London, sf. 461–467.
98. Hooton, R. D., 1991. “New aggregate alkali-reactivity test methods,” **Report MAT-91-14**, Ontario Ministry of Transportation.
99. TS 13516, 2012. Agregaların potansiyel alkali reaktivitesinin tayini (harç çubuğu yöntemi), **Türk Standardları Enstitüsü**, Ankara
100. Durak, U., 2019. Nanoparçacık Katkıların Geopolimer Harcın Dayanım ve Dayanıklılık Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Doktora Tezi, Kayseri, 62.
101. Gökşen, Y., 2018. Uçucu külün ve cam tozunun alkali silika reaksiyonu üzerine etkileri, **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 80.
102. ASTM C33M-18 “Standard Specification for Concrete Aggregates”, **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2018.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Yusuf GÖKŞEN

Uyruğu: Türkiye (T.C)

Doğum Tarihi ve Yeri:

Medeni Durum:

e-mail:

Yazışma Adresi:

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü	2018
Lisans	Erciyes Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü	2011
Lise	Talas Fatma Kemal Timuçin Anadolu Lisesi, Kayseri	2005

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2013-Halen	Türk Standardları Enstitüsü	TSE Uzmanı
2012-2013	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demir Yolları	Mühendis

YABANCI DİL

İngilizce

Almanca

YAYINLAR

Tezler

- Mineral Katkıların Alkali Silika Reaksiyonu Üzerine Etkisi, TSE Uzmanlık Tezi, 2016
- Uçucu Külün ve Cam Tozunun Alkali Silika Reaksiyonu Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, 2018

Makaleler

- Gökşen, Y., Durak, U., İlkentapar, S., Atabey, İ. İ., Kaya, M., Karahan, O., & Duran Atış, C. (2023). Synergistic effect of waste glass powder and fly ash on some properties of mortar and notably suppressing alkali-silica reaction. Revista de la construcción, 22(2), 419-430.

Projeler

- FYL-2017-7453 kodlu Bilimsel Araştırma Projesi, 2017

Bildiriler

- Çinko-Kurşun Üretim Tesisi Atıklarının Beton Parke Taşlarında Kullanılması, Bildiri, 2021

Kitap Bölümü

- Multidisipliner Bakış Açısıyla Türkiye’de Enerji, Kitap Bölümü, 2022