

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONDA ALKALİ SİLİKA, REAKSİYONUNUN
AZALTILMASINDA MİNERAL KATKI
KOMBİNASYONLARININ OPTİMİZASYONU**

DOKTORA TEZİ
Korkmaz YILDIRIM

Enstitü Anabilim Dalı : **İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**
Enstitü Bilim Dalı : **YAPI MALZEMESİ**
Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Mücteba UYSAL**

Aralık 2013

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETONDA ALKALİ SİLİKA, REAKSİYONUNUN
AZALTILMASINDA MİNERAL KATKI
KOMBİNASYONLARININ OPTİMİZASYONU

DOKTORA TEZİ

Korkmaz YILDIRIM

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 09/12/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr.
Mücteba UYSAL
Üye

Prof. Dr.
Kemalettin YILMAZ
Jüri Başkanı

Prof. Dr.
Mehmet SARIBIYIK
Üye

Doç. Dr.
Serkan SUBAŞI
Üye

Yrd. Doç. Dr.
Salih Taner YILDIRIM
Üye

ÖNSÖZ

Doktora öğrenimimin son aşaması olan bu çalışmamın hazırlanmasında her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen, değerli düşünceleri ile beni doğruya yönlendiren Sayın Yrd. Doç. Dr. Mensur Sümer ve son dönemde desteğini aldığım Doç. Dr. Mücteba Uysal'a teşekkürlerimi arz ederim.

Deneysel çalışmalarım sırasında desteğini hissettiğim, birlikte çalışmaktan mutluluk duyduğum Düzce Üniversitesi Teknoloji Fakültesinden Doç. Dr. Serkan Subaşı'na, Oyak Bolu Çimento Fabrikası Genel Müdürlüğüne ve Kimya Laboratuvarı Personeline, Aydos Yapı Kimyasalları Şirketine, Türkiye Hazır Beton Birliği 23. Dönem Yönetim Kurulu'na teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarımın başından buyana yol gösteren, bilgi ve birikimlerini esirgemedi katkılarda bulunan Sayın Prof. Dr. Kemalettin Yılmaz ve Sayın Prof. Dr. Mehmet Sarıbyık'a teşekkürlerimi arz ederim.

Doktora çalışmalarım sürecinde beni gönülden destekleyen değerli eşime, çocuklarıma ve öğrenimim boyunca büyük fedakârlıklarda bulunan aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ÖZET	xviii
SUMMARY	xix

BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
------------	---

BÖLÜM 2.

ALKALİ AGREGA REAKSİYONU.....	3
2.1. Alkali Agrega Reaksiyonu (AAR)	3
2.2. Alkali Karbonat Reaksiyonu (ACR)	3
2.3. Alkali Silika Reaksiyonu(ASR)	4
2.3.1. Alkali silika reaksiyonu tanım ve içerik	4
2.3.2. Alkali silis reaksiyonunun mekanizması	9
2.3.3. Alkali silis reaksiyonunun kimyası.....	13
2.3.3.1. Agregada pesimum kavramı	14
2.3.4. Alkali silis reaksiyonunu etkileyen faktörler	15
2.3.4.1. Karışım oranlarının etkisi	15
2.3.4.2. Reaktif agreganın cinsinin ve tane büyüklüğünün etkisi	15
2.3.4.3. Alkalilerin etkisi.....	17
2.3.4.4. Rutubetin etkisi	18
2.3.4.5. Sıcaklığın etkisi.....	18
2.3.4.6. Sürüklenmiş havanın etkisi.....	19

2.3.5. Alkali silika reaksiyonu hasarlarının teşhisi	19
2.3.5.1. Alkali silis reaksiyonu hasarı olarak alkali silika jelleri	22
2.3.5.2. Alkali silika jellerinin genleşme mekanizması	23
2.3.5.3. Genleşme ve çatlama.....	26
2.3.5.4. Yüzeysel tortular	28
2.3.5.5. Parça atma.....	28
2.3.5.6. Yer değiştirmeler	29
2.3.6. ASR'yi önleme yöntemlerinde farklı ülkelerin yaklaşımları	29
2.3.7. Alkali silika reaktivitesinin tarihsel geçmişi	32

BÖLÜM 3.

MİNERAL KATKILARIN ALKALİ SİLİKA REAKSİYONUNA ETKİSİ	37
3.1. Alkali Silika Reaksiyonunu Azaltmada Mineral Katkılarının Rolü	37
3.1.1. Doğal puzolanların etkisi	40
3.1.2. Uçucu külün ASR'ye etkisi.....	42
3.1.3. Yüksek fırın cürufunun ASR'ye etkisi (YFC)	45
3.1.4. Silis dumanının ASR'ye etkisi (SD).....	46
3.1.5. Metakaolinin ASR'ye etkisi (MK)	48

BÖLÜM 4.

ALKALİ SİLİS REAKTİVİTESİNİN TESPİTİ İÇİN DENEY YÖNTEMLERİ	50
4.1. Alkali Silika Reaksiyonu Tespitinde Uygulanan Deney Metotları.....	50
4.2. Çalışma Kapsamında Agrega Üzerinde Yapılan Deney Yöntemleri.....	51
4.2.1. Petrografik inceleme (ASTM C295)	52
4.2.2. Kimyasal metot (ASTM C289)	54
4.3. Çalışma Kapsamında Harç Çubuğu Üzerinde Yapılan Deneyler	55
4.3.1. Harç çubuğu deneyi (ASTM C227).....	55
4.3.2. Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi (HHÇD) (ASTM C1260)	58
4.3.3. Otoklav metodu	60
4.4. Beton Üzerine Yapılan Deneyler	61
4.4.1. Beton prizma testi (ASTM C 1293)	61
4.4.2. Hızlandırılmış beton prizma deneyi (HBPD) (ASTM C1253)	62

BÖLÜM 5.

ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER	65
5.1. Malzemelerin Hazırlığı.....	65
5.2. Agregada	65
5.3. Kimyasal Metot ile Agregada Alkali Reaktivitesinin Belirlenmesi.....	67
5.4. Agregaların Petrografik Analizi (ASTM C295)	68
5.4.1. A1 agregasına ait mineralojik petrografik analizi	68
5.4.2. A2 agregasına ait mineralojik-petrografik analizi.....	69
5.4.3. A3 agregasına ait mineralojik-petrografik analizi.....	69
5.5. Bağlayıcılar ve Mineral Katkıları	70
5.5.1. Çimento özellikleri	70
5.5.2. Mineral katkıları	71
5.5.2.1. Uçucu kül.....	71
5.5.2.2. Yüksek fırın cürufu	73
5.5.2.3. Silis dumanı (Mikrosilis).....	74
5.5.2.4. Metakaolin	75

BÖLÜM 6.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	77
6.1. Çalışmada Kullanılan ASR Test Yöntemleri.....	77
6.2. Harç Çubuğu Deneyi Çalışmaları (HÇD) (ASTM-C 227).....	77
6.2.1. Deney numunelerinin hazırlanması	78
6.2.2. Harç çubuklarının üretimi	80
6.2.3. Kalıplara harç yerleştirilişi ve kür edilişi.....	81
6.2.4. Harç çubuklarının boylarının ölçüm zamanları.....	81
6.2.5. Sonuçların değerlendirilmesi.....	81
6.3. Harç Çubuğu Deneyleri.....	82
6.3.1. Referans numunede harç çubuğu deneyi sonuçları	82
6.3.2. Uçucu kül ikameli numunelerde harç çubuğu deneyi sonuçları.....	84
6.3.2.1. Uçucu kül ikameli numunelere ait varyans analizi sonuçları	85
6.3.3. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde harç çubuğu deneyi sonuçları.....	88

6.3.3.1. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelere ait varyans analizi sonuçları.....	89
6.3.4. Silis dumanı ikameli numunelerde harç çubuğu deneyi	91
6.3.4.1. Silis dumanı ikameli numunelere ait varyans analizi sonuçları.....	92
6.4. Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyleri (ASTM–C 1260)	95
6.4.1. Referans numunede hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonuçları ...	96
6.4.2. Uçucu kül katkı ikameli numunelerde hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonuçları.....	98
6.4.2.1. Uçucu kül ikameli numunelere ait varyans analizi sonuçları .	99
6.4.3. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonuçları.....	103
6.4.3.1. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelere ait varyans analizi sonuçları.....	104
6.4.4. Silis dumanı ikameli numunelerde hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonuçları.....	108
6.4.4.1. Silis dumanı ikameli numunelere ait varyans analizi sonuçları.....	110
6.4.5. Metakaolin ikameli numunelerde hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonuçları.....	113
6.4.5.1. Metakaolin ikameli numunelere ait varyans analizi sonuçları	114
6.5. Otoklav Deneyleri	116
6.5.1. Referans numunede otoklav deneyi sonuçları.....	119
6.5.2. Uçucu kül ikameli numunelerde otoklav deneyi sonuçları.....	119
6.5.3. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde otoklav deneyi sonuçları	120
6.5.4. Silis dumanı ikameli numunelerde otoklav deneyi sonuçları	121
6.5.5. Metakaolin ikameli numunelerde otoklav deneyi sonuçları	122
6.6. Harç Çubuğu, Hızlandırılmış Harç Çubuğu ve Otoklav Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	123
6.6.1. Uçucu kül ikameli numunelerde harç çubuğu deneyi, hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ve otoklav deneyi sonuçlarının karşılaştırılması.....	123

6.6.2. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde harç çubuğu deneyi, hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ve otoklav deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	124
6.6.3. Silis dumanı ikameli numunelerde harç çubuğu deneyi, hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ve otoklav deneyi sonuçlarının karşılaştırılması	125
6.6.4. Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ve otoklav deneyi sonuçlarının metakaolin ikameli numunelerde karşılaştırılması	126
6.7. Beton Prizma Metodu Deneyi (ASTM-C 1293).....	127
6.7.1. Hızlandırılmış beton prizma metodu deney sonuçları (ASTM-C1253).....	128

BÖLÜM 7.

ASR'DE MİNERAL KATKI KOMBİNASYONLARI İLE OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI	130
7.1. Çalışma Amacı.....	130
7.2. Mineral Katkı Kombinasyonları ile Hazırlanan Numunelerde Harç Çubuğu Deneyi Sonuçları.....	130
7.3. Mineral Katkı Kombinasyonları ile Hazırlanan Numunelerde Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi Sonuçları	132
7.4. Mineral Katkı Kombinasyonları ile Hazırlanan Numune Gruplarında Optimizasyon Çalışmaları	136
7.4.1. Kullanılan mineral katkılara ait ilişki analizi sonuçları	136
7.4.2. Silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun birlikte kullanımı ile optimizasyon çalışmalarının sonuçları	138
7.4.3. Silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolinin birlikte kullanımı ile optimizasyon çalışmalarının sonuçları	141

BÖLÜM 8.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	147
----------------------------	-----

KAYNAKLAR.....	151
----------------	-----

ÖZGEÇMİŞ	163
----------------	-----

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AAR	: Alkali agrega reaksiyonu
ACI	: Amerikan Beton Enstitüsü
ACR	: Alkali karbonat reaksiyonu
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
ASR	: Alkali silika reaksiyonu
ASTM	: Amerikan Standardı
BPD	: Beton prizma testi (ASTM C1293)
C	: Karbon
C ₃ A	: Tri kalsiyum alüminat
CaO	: Kalsiyum oksit
Ca(OH) ₂	: Kalsiyum hidroksit
CSA	: Canadian Standards Association
C-S-H	: Kalsiyum-Silikat-Hidrate
C ₃ S	: Trikalsiyum silikat
Fe ₂ O ₃	: Demiroksit
HÇD	: Harç çubuğu deneyi ASTM C227
HHÇD	: Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ASTM C1260
HBPD	: Hızlandırılmış beton prizma deneyi ASTM C1253
K	: Potasyum
K ₂ O	: Potasyumoksit
MgO	: Magnezyumoksit
MK	: Metakaolin
MPa	: Megapascal
NaCl	: Sodyumklorür
Na ₂ O	: Sodyumoksit
Na ₂ O _{eşdeğer}	: Eşdeğer sodyumoksit

NaOH	: Sodyum hidroksit
OH ⁻	: Hidroksil iyonları
PCA	: Portland çimento birliği
PRE	: Potansiyel genleşme hızı parametresi
RH	: Rölatif nem
S/C	: Su/Çimento oranı
SD	: Silis dumanı
SiO ₂	: Silisyum dioksit
SO ₃	: Kükürttrioksit
UK	: Uçucu kül
YFC	: Yüksek fırın cürufu

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Silis üzerine alkali çözeltilerinin etkisinin şematik gösterimi a) Çok iyi billurlaşmış silis b) Zayıf billurlaşmış silis.....	10
Şekil 2.2. İlerleme şeması ve ASR jelinin büyümesinin sonucu.....	11
Şekil 2.3. Karayolu yol bariyerinde gözlenen ASR çatlakları (Bolu 2011).....	11
Şekil 2.4. Çizimler dokuları gösteriyor, birincil alkalideki ASR'yi etkileyen morfoloji ve alaşım, hassas kayalar ve karakterestik desenler.	12
Şekil 2.5. Alkali silis reaksiyonunun şematik gösterimi (1. Aşama) C-S-H: Çimento, OH ⁻ : Beton boşluk suyunda bulunan OH ⁻ iyonları Si ₂ O: Reaktif agrega, Ca(OH) ₂ : Çimento hidratasyonu sonucu artan kireç.....	13
Şekil 2.6. Tipik pesimum reaktif agrega içeriği grafiği.....	14
Şekil 2.7. Deneysel çalışma sonucu elde edilen çimento hamuruna sızan ASR ürünü.....	20
Şekil 2.8. Beton numunelerde ASR görüntüleri.....	22
Şekil 2.9. ASR hasarına maruz kalmış yapı elamanlarından görüntüler.	25
Şekil 2.10. ASR hasarına maruz kalmış yapı elamanlarından görüntüler	27
Şekil 2.11. ASR mikro ve makro çatlakların idealize edilmiş modeli	27
Şekil 2.12. Parça atma olayının oluşma şekilleri.....	28
Şekil 2.13. Parapet elemanı, Val de Mare Barajı, Jersey.	29
Şekil 4.1. Alkalinite azalma (R _c) çözünen silis (S _c) grafiği (ASTM C289).....	55
Şekil 5.1. Hızlandırılmış harç çubuğu deneyinde A1 ve A2 agregalarına ait referans numune ortalama genişleme değerleri.....	66
Şekil 5.2. Mineral katkıların görüntüleri	76
Şekil 6.1. Agrega elek seti	79
Şekil 6.2. Deney sürecinin fotoğraflarla açıklamaları	80
Şekil 6.3. Numunelerde oluşan çatlak ve jel görüntüleri.....	82
Şekil 6.4. Referans numune harç çubuğu deneyi 12 aylık genişleme sonuçları	84

Şekil 6.5. Referans ve Uçucu kül ikameli numunelere ait harç çubuğu deneyi genleşme sonuçları.....	85
Şekil 6.6. Referans ve Uçucu kül ikameli numunelerin 12. ay genleşme sonuçları..	86
Şekil 6.7. Referans ve YFC ikameli numunelere ait harç çubuğu deneyi genleşme sonuçları.....	89
Şekil 6.8. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelerin 12. ay ortalama genleşme sonuçları.....	90
Şekil 6.9. Referans ve SD ikameli numunelere ait harç çubuğu deneyi genleşme sonuçları.....	92
Şekil 6.10. Silis dumanı ikameli numunelerin ortalama genleşme sonuçları	93
Şekil 6.11. Referans numune hızlandırılmış harç çubuğu deneyi genleşme sonuçları.....	97
Şekil 6.12. Referans numuneye ait Sterio mikroskopta çatlak ve SEM görüntüleri .	98
Şekil 6.13. Referans ve Uçucu kül ikameli numunelerde genleşme sonuçları	99
Şekil 6.14. Referans ve Uçucu kül ikameli numunelerin 28.gün genleşme sonuçları.....	100
Şekil 6.15. Uçucu kül ikameli numunelerde Sterio mikroskopta çatlak ve SEM görüntüleri.....	102
Şekil 6.16. Referans ve Yüksek fırın cürufu ikameli numunelere ait genleşme sonuçları.....	104
Şekil 6.17. Referans ve YFC ikameli numunelerin 28.gün genleşme sonuçları.....	105
Şekil 6.18. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde Sterio mikroskopta çatlak ve SEM görüntüleri.....	108
Şekil 6.19. Referans ve SD ikameli numunelerde deney sonuçları.....	109
Şekil 6.20. Silis dumanı ikameli numunelerin 28.gün genleşme sonuçları	110
Şekil 6.21. Silis dumanı ikameli numunelerde Sterio mikroskopta çatlak ve SEM görüntüleri.....	113
Şekil 6.22. Metakaolin ikameli numunelerde deney sonuçları	114
Şekil 6.23. Metakaolin ikameli numunelerin 28.gün genleşme sonuçları	115
Şekil 6.24. Deney sürecinin fotoğraflarla açıklamaları	118
Şekil 6.25. Referans ve Uçucu kül ikameli numunelerde Otoklav deney sonuçları	120
Şekil 6.26. Referans ve Yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde Otoklav deney sonuçları.....	121

Şekil 6.27. Silis dumanı ikameli numunelerde Otoklav deney sonuçları	122
Şekil 6.28. Silis dumanı ikameli numunelerde Otoklav deney sonuçları	123
Şekil 6.29. Referans ve UK ikameli numunelerde Harç çubuğu deneyi, Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ve Otoklav deneyi genişleme sonuçları.....	124
Şekil 6.30. Referans ve YFC ikameli numunelerde Harç çubuğu deneyi, Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ve Otoklav deneyi genişleme sonuçları.....	125
Şekil 6.31. Referans ve SD ikameli numunelerde Harç çubuğu deneyi, Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ve Otoklav deneyi genişleme sonuçları	126
Şekil 6.32. Metakaolin ikameli numunelerde Harç çubuğu deneyi, Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ve Otoklav deneyi genişleme sonuçları	126
Şekil 6.33. 75×75×285 mm boyutlarında harç kalıpları	127
Şekil 6.34. Beton prizma deneyi için hazırlanan numune gruplarına ait genişleme sonuçları.....	129
Şekil 7.1. Referans ve Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numunelere ait deney sonuçları	132
Şekil 7.2. Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numunelerde deney sonuçları.....	135
Şekil 7.3. Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numunelerde genişleme sonuçları.....	136
Şekil 7.4. Model genişleme değerleri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması	141
Şekil 7.5. Model genişleme değerleri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması	141
Şekil 7.6. Model genişleme değerleri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması	145

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Zeolitin inceliğine göre kullanım dozajları	42
Tablo 3.2. Metakaolin kimyasal analizi.....	48
Tablo 4.1. Harç çubuğu deneyleri için agrega elek analizi oranları	56
Tablo 4.2. Harç çubukları malzeme karışım oran ve miktarları.....	56
Tablo 4.3. Alkali silis reaksiyonu deneylerinde kullanılan standartlar ve yorumları.	63
Tablo 5.1. A1 Agregasına ait Özgül ağırlık, Birim hacim ağırlık değerleri	67
Tablo 5.2. A1 Kumuna ait Elek analizi değerleri.....	67
Tablo 5.3. A1 agregası TS-2517/ASTM C-289 ASR kimyasal analiz raporu.....	67
Tablo 5.4. A2 Agregası TS-2517/ASTM C-289 ASR Kimyasal analiz raporu.....	68
Tablo 5.5. Çimento ve Mineral katkılara ait alkali düzeyi çizelgesi	70
Tablo 5.6. CEM I 42.5, Yüksek fırın cürufu, F sınıfı Uçucu kül, Metakaolin, Silis dumanının kimyasal ve fiziksel analiz değerleri	71
Tablo 5.7. Silikon oranına göre SiO ₂ miktarları.....	75
Tablo 6.1. ASR deneyi için elek analizine uygun agrega hazırlama	78
Tablo 6.2. ASR deneyi harç numuneleri için uygun malzeme oran ve miktarları	79
Tablo 6.3. Harç çubuğu deneyinde referans numune karışım oran ve miktarları	83
Tablo 6.4. Harç çubuğu deneyinde referans numune 12. ay genişleme değerleri, Duncan çoklu karşılaştırma sonuçları.....	83
Tablo 6.5. Harç çubuğu deneyinde uçucu kül ikameli numune karışım oranları.....	84
Tablo 6.6. Uçucu kül ikameli numunelerde 12 aylık genişleme değerleri	85
Tablo 6.7. Uçucu kül ikameli numunelerde harç çubuğu ASR deneyi 12. ay sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler	86
Tablo 6.8. Uçucu kül ikameli numunelere ait Varyans analizi sonucu	86
Tablo 6.9. Uçucu kül ikameli numunelerde Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.....	87
Tablo 6.10. Yüksek fırın cürufu ikameli numune karışım oranları.....	88

Tablo 6.11. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelere ait 12 aylık genişleme değerleri	88
Tablo 6.12. Referans ve YFC ikameli numunelerde ASR deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler	89
Tablo 6.13. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelere ait Varyans analizi sonucu	90
Tablo 6.14. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları	90
Tablo 6.15. Silis dumanı ikameli numune karışım oranları	91
Tablo 6.16. Silis dumanı ikameli numunelere ait 12 aylık genişleme değerleri	92
Tablo 6.17. Referans ve SD ikameli numunelerde ASR deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler	93
Tablo 6.18. Silis dumanı ikameli numunelere ait Varyans analizi sonucu	93
Tablo 6.19. Silis dumanı ikameli numunelerde Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları	94
Tablo 6.20. ASR deneyi için elek analizine uygun agrega hazırlama	95
Tablo 6.21. ASR deneyi harç numuneleri için uygun malzeme oran ve miktarları	95
Tablo 6.22. Referans numune malzeme karışım oran ve miktarları	96
Tablo 6.23. Referans numune hızlandırılmış harç çubuğu deneyi genişleme değerleri	97
Tablo 6.24. UK ikameli numunelerde malzeme karışım oran ve miktarları	99
Tablo 6.25. Referans ve UK ikameli numunelerde 28 gün genişleme değerleri	99
Tablo 6.26. Uçucu kül ikameli numunelerde ASR deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler	100
Tablo 6.27. Uçucu kül ikameli numunelere ait Varyans analizi sonucu	101
Tablo 6.28. Uçucu kül ikameli numunelerde Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları	101
Tablo 6.29. Referans ve YFC ikameli numunelerde malzeme karışım oran ve miktarları	103
Tablo 6.30. Referans ve YFC ikameli numunelerde 28 günlük genişleme değerleri	103
Tablo 6.31. YFC ikameli numunelerde ASR deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler	105
Tablo 6.32. YFC ikameli numunelere ait Varyans analizi sonucu	105
Tablo 6.33. YFC ikameli numunelerde Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları	106

Tablo 6.34. Referans ve SD ikameli numunelerde malzeme karışım oran ve miktarları.....	109
Tablo 6.35. SD ikameli numunelerde 28 günlük genişleme değerleri	109
Tablo 6.36. Silis dumanı ikameli numunelerde ASR deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler	110
Tablo 6.37. Silis dumanı ikameli numunelere ait Varyans analizi sonucu	111
Tablo 6.38. Silis dumanı ikameli numunelerde Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.....	111
Tablo 6.39. Metakaolin ikameli numunelerde malzeme karışım oran ve miktarları	114
Tablo 6.40. Metakaolin ikameli numunelerde 28 günlük genişleme değerleri	114
Tablo 6.41. Metakaolin ikameli numunelerde ASR deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler	115
Tablo 6.42. Metakaolin ikameli numunelere ait Varyans analizi sonucu	115
Tablo 6.43. Metakaolin ikameli numunelerde Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.....	116
Tablo 6.44. Referans numuneye ait malzeme karışım oran ve miktarları	119
Tablo 6.45. Referans numune Otoklav deneyi genişleme değeri.....	119
Tablo 6.46. Uçucu kül ikameli numunelerde Otoklav deneyi malzeme karışım oranları ve miktarları	119
Tablo 6.47. Uçucu kül ikameli numunelerde Otoklav deneyi genişleme değerleri ..	120
Tablo 6.48. YFC ikameli numunelerde Otoklav deneyi malzeme karışım oranları ve miktarları.....	120
Tablo 6.49. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde Otoklav deneyi genişleme değerleri	121
Tablo 6.50. SD ikameli numunelerde Otoklav deneyi malzeme karışım oranları ve miktarları.....	121
Tablo 6.51. Silis dumanı ikameli numunelerde Otoklav deneyi genişleme değerleri	122
Tablo 6.52. Metakaolin ikameli numunelerde Otoklav deneyi malzeme karışım oranları ve miktarları	122
Tablo 6.53. Metakaolin ikameli numunelerde Otoklav deneyi genişleme değerleri.	123
Tablo 6.54. UK ikameli numunelerde Harç çubuğu deneyi, Hızlandırılmış harççubuğu deneyi ve Otoklav deneyi genişleme değerleri	124

Tablo 6.55. YFC ikameli numunelerde Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi, Harç çubuğu deneyi ve Otoklav deneyi genleşme değerleri	125
Tablo 6.56. SD ikameli numunelerde Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi, Harç çubuğu deneyi ve Otoklav deneyi genleşme değerleri	125
Tablo 6.57. Metakaolin ikameli numunelerde Hızlandırılmış çubuğu deneyi, Harç çubuğu deneyi ve Otoklav deneyi genleşme değerleri	126
Tablo 6.58. Beton prizma deneyi için hazırlanan numune karışım oran ve miktarları	128
Tablo 6.59. Beton prizma deneyi için hazırlanan numune gruplarına ait genleşme değerleri	129
Tablo 7.1. Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numune grupları	131
Tablo 7.2. Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numune gruplarında malzeme karışım oran ve miktarları	131
Tablo 7.3. Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numunelere ait 12 aylık genleşme değerleri	131
Tablo 7.4. Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numune grupları	133
Tablo 7.5. Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numune gruplarında malzeme karışım oran ve miktarları	134
Tablo 7.6. Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numunelerde 28 günlük genleşme değerleri	134
Tablo 7.7. Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numunelerde malzeme karışım oranları	135
Tablo 7.8. Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numunelerde 28günlük genleşme değerleri	136
Tablo 7.9. Harç çubuklarındaki uzama miktarı ile çimento ve puzolanların ilişkisi	137
Tablo 7.10. Program girdileri ve metot	138
Tablo 7.11. Model çözümü özeti	138
Tablo 7.12. Lineer Regresyon sonuçlarına göre elde edilen amaç fonksiyon katsayıları ve anlamlılık düzeyi	139
Tablo 7.13. Amaç fonksiyon katsayıları ile model genleşme çalışması	139
Tablo 7.14. Modelleme çalışması sonucunda bulunan optimum karışım formülü ..	139
Tablo 7.15. Optimum karışım denklem sonucu bulunan model genleşme değerleri ve deney sonuçları	140

Tablo 7.16. Program girdileri ve metot.....	142
Tablo 7.17. Model 2. çözümünün özeti	142
Tablo 7.18. Lineer Regresyon sonuçlarına göre elde edilen amaç fonksiyon katsayıları ve anlamlılık düzeyi	142
Tablo 7.19. Amaç fonksiyon katsayıları ile model genişleme çalışması.....	143
Tablo 7.20. Modelleme çalışması sonucunda bulunan optimum karışım ve sonucu	143
Tablo 7.21. Optimum karışım denklem sonucu bulunan model genişleme sonuçları ve deney sonuçları.....	144
Tablo 7.22. Optimum genişleme değerlerini veren optimum karışım miktarları.....	145
Tablo 8.1. ASR gelişmelerini önlemede etkin olan mineral katkı yüzdeleri.....	148

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Alkali Silika Reaksiyonu, Mineral Katkılar, Genleşme, Metakaolin

Bu çalışmanın amacı beton ve harç yapımında kullanılmakta olan doğal agregayı alkali silis reaktivitesi yönünden araştırmak, harç ve betonlarda görülen alkali silika reaksiyonu oluşumunda mineral katkıları kullanarak optimum azalma sağlayan karışım miktarlarını ve genleşme değerlerini tespit etmektir.

Çalışmanın ilk bölümlerinde alkali silis reaksiyonu, mineral katkıların ASR'ye etkisi ve ASR deney metotları anlatılmıştır. Deneysel çalışma için malzemelerin hazırlığı, deneylerin uygulanması beşinci, altıncı, yedinci bölümde, sonuçlar ve öneriler sekizinci bölümde sunulmuştur.

Çalışma içeriğinde harç çubuğu, hızlandırılmış harç çubuğu ve otoklav deney metodu uygulanmıştır. Deneysel çalışmada mineral katkıların %25 üzerinde, metakaolin'in %10 kullanıldığında ASR'yi standart değerlerin altında azalttığı görülmüştür. Mineral katkı kombinasyonları ile oluşturulan numune gruplarından elde edilen genleşme değerleriyle uygulanan optimizasyon çalışmalarına göre, İdeal genleşme değerini veren optimum karışımlarda silis dumanı miktarının %5 ila %10, metakaolin miktarının % 5, Yüksek fırın cürufu miktarının %15 ila %20, uçucu kül miktarının ise %15 ila %20 arasında kullanılması halinde ASR'yi azaltığı tespit edilmiştir. Mineral katkı kombinasyonlarında silis dumanı, metakaolin, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül birlikte %35 oranında, çimentonun %65 oranında kullanıldığında ASR'yi önlediği tespit edilmiştir.

THE OPTIMIZATION OF MINERAL ADMIXTURE COMPOSITIONS IN REDUCING CONCRETE ALKALI-SILICA REACTIONS

SUMMARY

Keywords: Alkali-Silica Reaction, Mineral Additives, Expansion, Metakaolin

The aim of this study is to search the natural aggregate that is being used as concrete and mortar, in terms of alkali silica reactivity and to determine the optimum reducing mixture quantities and expansion values by substituting mineral additives that are used in alkali-silica reaction seen in mortar and concretes.

At the first parts of the study, alkali-silica reaction, the effects of the mineral additives to ASR and ASR experiment methods are explained. The arrangement of the materials for the experimental studies and the practicing of the experiments are explained at the fifth, sixth, seventh parts; the results and suggestions are given at the eighth part.

In this study, mortar bar, accelerated mortar bar and autoclave test method are applied. In the experimental study, it is observed that when the mineral additives are used over 25 % and metakaolin at 10 % rates, they reduce ASR below the standard values. According to optimization studies that are applied with mineral additives combination that are formed with expansion values obtained from sample groups, the ASR is decreased if silica fume amount from 5% to 10%, metakaolin amount of 5%, blast furnace slag amount from 15% to 20% fly ash amount from 15% to 20% are used in optimum mixtures that give the ideal expansion value. It is found out that it prevents ASR when silica fume, metakaolin, blast furnace slag, fly ash amounts are totally used at 35% and the cement amount is at 65 % rate in mineral additive combinations.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

20 ve 21. yüzyıllarda artan dünya nüfusu ve kentleşme alanındaki hızlı büyüme yeni inşaat çalışmalarında yüksek bir talep yaratmıştır. Çimento esaslı beton kullanımının inşaat sektöründe artması üzerine, gelecekte inşaatlarda oluşabilecek bozulmaların önlenmesi amacıyla 19. yüzyılın sonundan bu yana çimento ve çimento esaslı ürünler kullanılarak büyük araştırmalar yapılmaktadır. Beton günümüzde dünya genelinde yaygın kullanılan bir yapı malzemesidir. Bu bakımdan betonda kullanılan malzemelerin niteliklerini bilmek, üretilen betonun özellikleri ile servis ömrünü uzatmak geliştirmek için çalışmalar devam etmektedir.

Beton; agrega, su, bağlayıcı olarak çimento ve katkılı çimento malzemelerinin bir araya gelmesiyle oluşur. Agregaya ile çimento arasındaki reaksiyonlar son derece karmaşıktır. Karmaşık reaksiyonlardan biride çimentoda bulunan Na^+ ve K^+ alkalileri ile agregada olan reaktif silis ortamda bulunan nem ile etkileşime girerek alkali silika jelini oluşturur. Bu jel betonda genişerek çatlak olarak bozulmalara neden olur. Bu etkileşim alkali silika reaksiyonunu olarak bilinir. Alkali silika reaksiyonu çatlakları betonda önemli hasara neden olabilir. Beton yapılarında alkali silika reaksiyonu yavaş gelişen, ileri yaşlarda betonda görülen bozulma nedenidir. Genel olarak betonarme yapı 5 ila 10.yıla ulaştığında alkali silika reaksiyonu nedeni ile oluşan çatlaklar belirgin hale gelmektedir.

Alabama Tuscaloosa Arizona bölgesindeki Stewart Barajı ve diğer yapılarda yaklaşık 30 yıl sonra alkali silika reaksiyonu hasarından etkilendiği görülmüştür [1]. Bazen de birkaç yıllık yapılarda ve 100 yıllık yapılarda da alkali silika hasarı görülmektedir. Betonun yapısal davranışı alkali silika reaksiyonundan etkilenmektedir. Betonda dayanıklılık, servis yeteneği ve uzun vadede tesisin güvenliği alkali silika reaksiyonundan etkilenmektedir [2]. Sertleşen betonlarda alkali silika reaksiyonu sonucu oluşan genişleme, beton içerisindeki çatlaklar ile deformasyona uğrar,

dolayısıyla betonun dayanıklılığını olumsuz etkilemektedir [3]. Portekizde bulunan Cabril barajından alınan elli yıllık beton numune Fernandes ve arkadaşları tarafından incelenmiş beton da agrega olarak kullanılan granit nedeniyle alkali silika bozulma belirtileri görülmüştür [4].

Alkali silika reaksiyonu erken fark edildiğinde, mevcut yapıların kullanım ömürleri küçük inşaat onarım ve rehabilitasyonlarla artırıldığında maliyet açısından çok büyük kazanımlar sağlayacaktır. İlk olarak 1940'ta Amerika'da görülen ve birçok ülkede gözlenen alkali silis reaksiyonu betonda zarara yol açan bir olgudur. Yayınlanmış birçok araştırmaya rağmen, bu mekanizma hala net olarak anlaşılamamıştır. Yinede, betonda zarara yol açan üç büyük faktör sayılabilir. Bunlar gözenekli çözeltideki alkaliler, reaktif amorf lar ya da zayıf kristalleşmiş silis içindeki bazı agregalar ve su olarak sıralanabilir. Bu nedenle alkali silika reaksiyonu ile betonda bozulma şiddetini azaltmak amacıyla araştırmaların gerekliliği ortadadır.

Bu çalışma kapsamında Sakarya Nehrinden çıkarılan ve bölge inşaatlarında kullanılmakta olan agregalar üzerinde sonradan oluşabilecek alkali silika reaksiyonu genişmesini minimum seviyeye indirmek için çalışılmıştır. Bu bağlamda 0-8 mm arası agrega Sakarya Nehrinden temin edilmiş, mineral katkı olarak F sınıfı uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, metakaolin kullanılmış ve CEM I 42.5 R çimento bu çalışma kapsamında kullanılmıştır.

Çalışma içeriğinde ASR'yi tespit eden deneyler üzerinde mineral katkıları ile çimento arasında yer değiştirerek tek tek ve kombine kullanım sonucu elde edilen harç çubuğu gruplarında alkali silika reaksiyonu genişleme değerlerinin hangi düzeyde engellediği ve azalttığı araştırılmıştır.

BÖLÜM 2. ALKALİ AGREGA REAKSİYONU

2.1. Alkali Agregas Reaksiyonu (AAR)

Alkali agrega reaksiyonu (AAR) betonda ileriki dönemlerde meydana gelen durabilite yönünden bozulma şeklidir. Genellikle sertleşmiş beton yüzeylerde harita şekilli çatlaklar, pullanma ve diğer bozulma mekanizmaları ile gözlenir. Alkali agrega reaksiyonu iki şekilde ortaya çıkar, birincisi alkali karbonat reaksiyonu, diğeri ise alkali silika reaksiyonudur. Kısaca alkali silika reaksiyonu, reaktif agregadaki silika ve Portland çimentosunda bulunan alkali silikatlar arasındaki reaksiyonun ortamın nemi ile birleşmesi sonucu oluşan alkali silika jel harita şekilli çatlakları şeklinde kendini gösterir. Bu reaksiyonlar ayrıntılı olarak aşağıda anlatılmıştır.

2.2. Alkali Karbonat Reaksiyonu (ACR)

Alkali karbonat reaksiyonu, reaktif karbonat kayalar ve çimento hamuru içindeki alkali silikatlar arasındaki reaksiyonu, ortamın nemi ile birleşmesi sonucu görülen kimyasal reaksiyondur. Alkali karbonat reaksiyonu ilk olarak 1967 yılında Swenson tarafından tariflenmiştir. Swenson, Ontario'da bazı beton kaldırımlarda yapımından altı ay sonra fazla miktarda genleşme sebebiyle derzlerde kapanma ve çatlamlar gözlemlemiştir. Swenson, oluşan reaksiyonun alkali silis reaksiyonundan farklı olarak killi kalsitik dolomit agregası ile çimento alkalileri arasında meydana geldiğini fark etmiştir [5]. Bu orijinal araştırmadan sonra dünyanın farklı ülkelerinde de benzer sorunların yaşandığı bildirilmiştir. Alkali karbonat reaksiyonunun farklı çeşitleri olup bunların hepsi zararlı değildir.

Aşağıdaki faktörler betonun ACR genleşmelerini arttırmaktadır;

1. Kaba agreganın boyutunun artması,

2. Ortamda nemin bulunması,
3. Ortam sıcaklığının artışı,
4. Beton alkali içeriğinin ve boşluk çözültisi pH'ın yüksek olması,
5. Kaba agregada içerisinde reaktif faz miktarının yüksek olması,
6. Beton dayanımının düşük olması.

ASTM C295 “Beton Agregalarının Petrografik Analizi” standardına göre potansiyel zararlı alkali karbonat reaktivitesi gösteren kayalar genellikle kalkerli dolomitler ile killi çözünmeyen kalıntıya sahip dolomitik kireçtaşlarıdır. Kil bulandırmayan ve çözünmeyen kalıntısı az olan (çoğunlukla kuvars olan) ince taneli kireçtaşları alkali karbonat reaktivitesi gösterebilir, fakat bu reaksiyonlar genellikle zararsızdır. Alkali karbonat reaksiyonu betonda alkali silika reaksiyonu kadar tepki göstermez.

2.3. Alkali Silika Reaksiyonu(ASR)

Betonarme veya beton yapı elemanlarının zamanla bozulup işlevlerini beklenen servis ömürlerine ulaşmadan yitirmelerine birçok faktör sebep olabilir. Yapı elemanının durabilitesini belirleyen etkenler arasında beton bileşimini oluşturan malzemelerin fiziksel ve kimyasal yapısından kaynaklanan iç etkiler ve çevreden kaynaklanan dış etkiler sayılabilir. Bazı durumlarda, beton bileşimini oluşturan malzemelerin kendi aralarında veya çevreden gelen zararlı maddelerle kimyasal reaksiyonlar yapabildiği, böylece yapının ya da yapı elemanının hacim sabitliğinin bozulması nedeniyle zarar görebildiği bilinmektedir. ASR, bu tür kimyasal bozulma nedenlerinden biridir. Dünya çapında alkali silika reaksiyonu, alkali karbonat reaksiyonuna göre daha çok görülen ve tanınan bozulma türüdür. Yani alkali karbonat reaksiyonunda oluşan genleşme miktarı alkali silika reaksiyonunda oluşan genleşmelerden daha azdır.

2.3.1. Alkali silika reaksiyonu tanım ve içerik

Alkali silika reaksiyonu, harçlarda veya betonda meydana gelmektedir. Çimentoda veya diğer kaynaklarda mevcut alkalilerle ilişkili hidroksil (OH^-) iyonları ve büyük veya küçük boyutlu agregalarda var olabilen belirli reaktif silisli bileşenler arasındaki

zararlı kimyasal reaksiyon bir jel meydana getirir. Bu alkali silis jeli, nemi absorbe ettiği zaman genişir ve sonunda betondaki çimento hamurunda ve agrega parçacıklarında çatlaklar oluşturur [6].

Betonun su emmesi artar, artan jel oluşumu çatlakları büyütür, özellikle agrega çimento ara yüz bağının çekim gücünü zedeleyerek betonun parçalanmasına yol açar. Bu nedenle alkali silika reaksiyonu konusundaki araştırmalar hem kimyasal hem de yapısal açıdan ele alınmaktadır [6]. Reaktif silis içeren agrega tanelerinin büyüklükleri reaksiyonun hızını etkilemektedir. Küçük tanelerin reaksiyonu sonucunda genişme 1 veya 2 ay içerisinde oluşmakta iken daha büyük tanelerin reaksiyonunda oluşan genişme yıllar sonra ortaya çıkmaktadır [6].

Alkali silis reaksiyonu ile bu reaksiyon sonucu oluşan genişme arasında ayırım yapılmalıdır. Alkali silis reaksiyonu sonucunda genişme oluşabilir, ancak oluşan bu genişme betonda her zaman hasar yaratabilecek düzeyde gerilime neden olmaz. Alkali silis reaksiyonu ve ardından betonda oluşan genişme bazı şartlar aynı anda oluştuğunda meydana gelir;

1. Beton yeterince suya doymuş ise (20 °C sıcaklıkta, yaklaşık %75-85 bağıl nem),
2. Betonda kullanılan agrega içerisinde yeterince reaktif silis varsa,
3. Betonda kullanılan çimentoda veya mineral katkı içerisinde yüksek oranda alkali (sodyum, potasyum) iyonu varsa boşluk suyunda pH'ı artırır. Hidroksil iyonlarının konsantrasyonu yükselir. Çözeltinin pH'nın artması ile reaktif silis içeren agrega içerisinde silis çözünürlüğü artar ve alkali silis jelinin oluşumu meydana gelir.

Bu nedenle Alkali silis reaksiyonunu kontrol altına almak, aşağıdaki şartları sağlamakla mümkündür;

1. Ortamdaki rutubeti kontrol altına almak,
2. Reaktif silis içeren beton veya agreganın tipini veya miktarını kontrol altına almak,
3. Boşluk suyunun pH'ını agrega içindeki silisi çözemeyecek kadar düşük seviyede tutmak (çimentodan ve mineral katkıdan gelecek olan alkali miktarını azaltmakla),

4. Yukarıdaki koşullar sağlanamıyorsa betonda çimentoya ilaveten düşük alkali içeren bir mineral katkı (puzolan) kullanmak,
5. ASTM C 150 Portland çimentoları için (Na₂O)eşdeğer alkali içeriğini %0.6 ile ASTM C 618 ise mineral katkılar (uçucu kül ve tras) için aynı parametreyi %1.5 ile sınırlanmıştır.

ASR'nin oluşabilmesi için agregada reaktif silis formları, yeterli miktarda alkali yanında ortamda nem bulunmalıdır. Bu koşullardan herhangi biri olmazsa ASR nedeniyle bir genleşme de olmayacaktır. ASR basitçe iki aşamada görülebilir;

1. Alkali + Reaktif Silis+ Su : → Alkali-Silis Jel Ürünleri
2. Alkali + Silis Jeli + Nem → Genleşme

Reaksiyonun oluşabilmesi için çimento alkali içeriğinin “eşdeğer Na₂O” değeri olarak % 0.6 değerini aşması gerekir. Portland çimentosunun toplam alkali içeriği sodyum oksit eşdeğeri olarak denklem 2.1 ile hesaplanmaktadır.

$$(Na_2O)_{eşdeğer} = Na_2O(kütlece\%) + 0.658 * K_2O(kütlece\%) \quad (2.1)$$

Bu alkalilerin çimento ve beton örneğindeki miktarlarının bulunması BS 4550 “Çimento için Deney Metotları”nda açıklanan nitrik asitle çıkarma metoduna göre yapılmaktadır.

Beton örneklerinde bu yöntemle göre belirlenen alkali oranları normalde ASR için ortamda bulunan miktardan daha fazladır. Bunun nedeni, feldspat gibi alkali içeren agregalardan da asitle reaksiyona girerek açığa çıkan alkalidir. Yine de, toplam alkali miktarı maksimum değerinin bulunmasında asitle çıkarma yöntemi mühendislikte uygun bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir [7].

Çimentoda bulunan sodyum ve potasyum oksitler çimentonun hammaddelerinden (kil, kireçtaşı, şeyl vb) kaynaklanır. Ayrıca alkaliler, çimento dışında; agrega, karışım suyu, beton katkı maddeleri, buz çözücü tuzlar, zemin suyu, beton kür suyu ve endüstriyel atık suları aracılığıyla beton bünyesine girebilir [8].

Genelde çimento ve çimentolanma özelliği olan malzemelerin alkalinitesi göz önüne alınmaktadır. Ancak, betona katılan kimyasal ya da mineral katkıları alkali içeriyorsa gelen ilave alkali miktarı da gözönüne alınır. Beton içine alkali girişi sadece çimentodan kaynaklanıyorsa alkali içeriği aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir [9]

$$(\text{çimento kg/m}^3) \times (\% \text{ Na}_2\text{O eşd çimento}) / 100 = \text{kg/m}^3 \text{ Betondaki alkali miktarı}$$

Amerika Birleşik Devletleri'nde ise betonun toplam alkali içeriğini sınırlandırmak yerine düşük alkalili çimento kullanımı önerilmektedir. ASTM C150 standardına göre düşük alkalili çimento, eşdeğer Na₂O içeriği %0.60'nın altında olan çimento olarak tanımlanmıştır [10]. Kanada standardı (CSA 23.1) yapının cinsine ve dış etkilere göre betonun toplam alkali içeriğini 1.7 ile 3 kg/m³ arasında sınırlandırır [11]. Ancak, düşük alkalili çimento ile yapılan betonlarda; alkali göçü, yüksek reaktiviteli agrega kullanımı, mineral ve kimyasal katkılardan, karma suyundan veya agreganın kendisinden gelen alkaliler gibi sebeplerden dolayı ASR oluşma riski devam etmektedir [12,13]. Devamlı kuruma ıslanma tekrarları, alkalilerin lokalize konsantrasyonuna sebebiyet verebilmektedir. Nem, beton içerisinde gezindikçe çözünen alkalileri de beraberinde taşır ve beton yüzeyinde buharlaştığında geride yüksek miktarda alkali bırakmaktadır. Alkali göçü olarak da adlandırılan bu durum, toplam alkali miktarı düşük bile olsa beton yüzeyinde lokal alkali konsantrasyonu artışına sebebiyet vermektedir [12]. Diamond, ıslanma kuruma tekrarında alkalilerin bir kısmının kalıcı olarak sabitlendiğini ve tekrar ıslanma ile çözünemez hale geldiğini belirtmektedir [14]. Betonun alkalinitesi arttıkça ASR potansiyeli de artmaktadır. Alkali hidroksit çözeltisi, reaktif agregalarla kolayca reaksiyona girmektedir. Yüksek konsantrasyonlu alkali çözeltide, silisin kararlı formları bile güçlü silikon bağlarının kırılması nedeniyle reaksiyona girmektedir. Agreganın reaktifliği arttıkça daha düşük alkalili çözeltilerde bile jel reaksiyonu oluşmaktadır.

Silis mineralleri reaktiflikleri açısından opal, kalsedon, kristobalit, kriptonkristal kuartz olarak sıralanabilir. Bu minerallerden bir veya birkaçının bir arada bulunduğu kayalar arasında, opal, kalsedon, kuartz çörtleri, silisli kireçtaşları, silisli dolomitler, riyolit ve tüfleri, dazit ve tüfleri, silisli şeyller, filitler, opalli oluşumlar, çatlamış ve boşlukları dolmuş kuartzlar sayılabilir. ASR' nin genel mekanizması bilinmekle

birlikte, beton üzerine yapmış olduğu etkiler henüz tam olarak açıklığa kavuşmamıştır. Örneğin çimento alkalinitesi belli bir değere erişince betonda şişme görülmekte, fakat alkalinite ile doğru orantılı olarak artmamaktadır. Buna karşılık çimento dozajının artışı, şişmenin de artmasına neden olmaktadır. ASR için mutlaka suya ihtiyaç olduğu halde, su içinde bekletilen betonlarda şişme meydana gelmemektedir. Maksimum şişme betonun doygun rutubetli atmosferde tutulması halinde görülmektedir. Reaktif agreganın inceliği reaksiyon hızını arttırmakla beraber, yüksek incelikte olan mineraller her zaman aynı derecede şişmeye neden olmamaktadır. Beton yapının boşluklu olması halinde, oluşan alkali silis jeli beton boşlukları içine dolarak betonda herhangi bir şişme meydana getirmemektedir [15].

ASR' nin oluşumuna neden olan bir diğer koşul olan nem, bozulmanın ve hacim değişikliğinin şiddeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. ASR, yalnızca nem varlığında gerçekleşmektedir. Nem, alkali iyonlarının yayılmasına, oluşan jel ise su emerek şişip genişlemeye ve betonda içsel çekme gerilmelerinin doğmasına böylece agregaya ile onu çevreleyen çimento harcının çatlamasına neden olmaktadır. Çatlamadan sonra ortama giren su, jelin emebileceğinden fazla olursa bir miktar jel dışarı sızar, bu durum ileri düzeyde bir hasarın kanıtıdır. Su, ASR'de iki rol üstlenmiştir, taşıyıcılığın yanı sıra jelin büyümesini de sağlar. Betonun kurutulması ve ileride su ile temasının önlenmesi reaksiyonun durdurulması için etkilidir. Aksine, tekrarlı ıslanma ve kuruma, alkali iyonlarının göçünü hızlandırarak reaksiyonun şiddetini arttırmaktadır. ASR sonucu meydana gelen genişleme agregaya boyutu ile de ilgilidir ve reaktif parçacığın boyutu küçüldükçe genişleme artar ancak parçacık boyutu 20 µm den daha küçük olduğunda bu artış sürekli değildir. Örneğin, sadece reaktif ince agregaya içeren betonlarda meydana gelen genişleme erken dönemde artar, daha ileri dönemlerde sabit kalmaktadır.

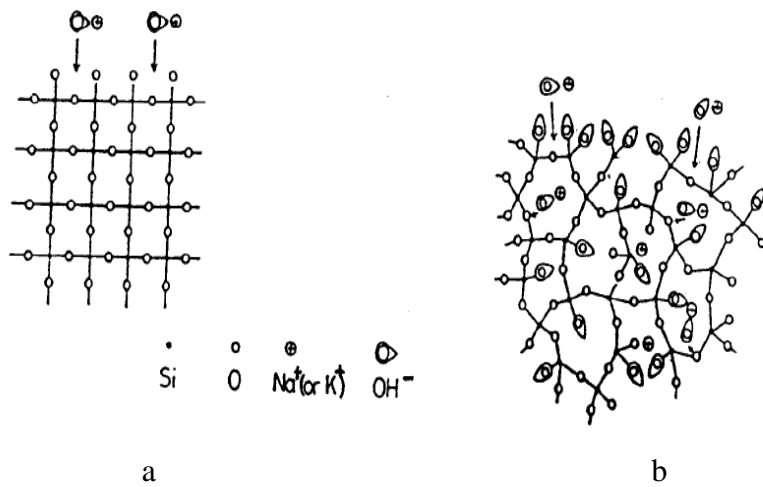
Sadece reaktif iri agregaya kullanılarak üretilen betonlarda oluşan genişleme yavaş gelişmekte ancak uzun süre devam etmektedir. Agregadaki silis mineralleri kristalleşmiş ise kararlı, amorf ise reaktiftir, ancak kristalleşmiş olmalarına karşın SiO₂' in, tridimit ve kristobalit formları reaktiftir, ancak kristalleşmiş, geniş yüzeyli, zayıf kristal dokulu, amorf, camsı ve mikrogözenekli agregaların ASR eğilimi fazladır. Betonun alkalinitesi arttıkça ASR potansiyeli de artmaktadır, çünkü alkali

hidroksit çözeltisi, reaktif agregalarla kolayca reaksiyona girmektedir. Yüksek konsantrasyonlu alkali çözeltisinin etkisinde silisin kararlı formları bile güçlü silis bağlarının kopması nedeni ile reaksiyona girmektedir. İçinde aktif silis bulunan ve ASR'ye yol açan agregaların kullanılması zorunlu ise, bağlayıcı maddeye bir miktar puzolan madde ilave edilerek reaksiyon hızı azaltılabilir [16].

2.3.2. Alkali silis reaksiyonunun mekanizması

Araştırmacıların çoğu, ASR'nin ana tepkisinin, agrega içindeki mevcut silislerin ve gözeneklerdeki hidroksil iyonları (OH^-) arasında bir tepki olduğunu kabul etmektedir [17-18]. Betonun hidrate olmasının başlangıcında, kalsiyum iyonları hidratasyon ürünleri ile birleşir ama potasyum ve sodyum çözeltide parça halinde kalmakta ve en sonunda (C-S-H) kalsiyum silikat hidrat mono sülfatı oluşturacak şekilde kısmen birleşmektedir [19]. Gözenekli çözeltideki alkalilerin miktarı çimentodaki çözülebilir alkalinin miktarı ile orantılıdır. Hidroksil iyonları, bir silis yüzeyine doğru harekete geçmektedir. Eğer silis, iyi bir kristalin yapıya sahipse korunmasız taraflar bu yoğunluğun dışında kalan ve silis bağlantısını önleyen taraflardır (Şekil 2.1a), ama zayıf kristalin silis durumunda, agrega bütününde kristalin yapının parçalanmasını sağlayan pek çok zayıf nokta bulunur (Şekil 2.1b) [20, 21]. Nötr yapıdaki dengeyi korumak için Na^+ ve K^+ katyonları jel yapıdaki materyali oluşturmak için hidroksil iyonlarına doğru difüze olmaktadır. Powers ve Steinoor'a göre, Na^+ ve K^+ katyonlarının geçişi yavaştır, bu nedenle bu katyonların yerini Ca^{+2} iyonu alır. Eğer jel kalsiyumca çok zenginse, su ile karşı karşıya geldiğinde daha az yayılmakta ve bu nedenle betonda çatlama olmamaktadır [52, 22].

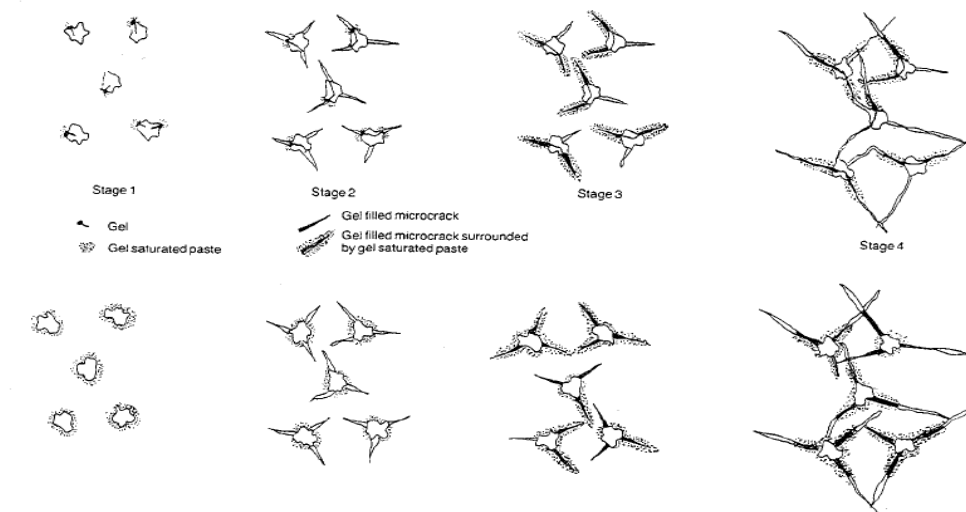
Diamond, gözenekli çözeltide kalsiyumun çok az olduğunu buldu. Bu, zaten yüksek pH'ın, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin reaksiyona girme kabiliyetini zayıflattığı biliniyordu [19]. Helmuth and Stark, jel oluşumunda güvenlik ve şişme arasındaki ayrıma değinmez fakat ASR tarafından üretilen jelin içeriğinde birden fazla bileşim bulunduğunu ifade etmektedirler [21].



Şekil 2.1. Silis üzerine alkali çözeltilerinin etkisinin şematik gösterimi
 a) Çok iyi billurlaşmış silis b) Zayıf billurlaşmış silis [11]

Jelin yapısı aslında zararlı değildir. Betonun yapısında meydana gelen bozulma, jel tarafından suyun emilmesi ve genişlemesinden kaynaklanmaktadır. Daha aşağı seviyedeki görel nemlerde oluşturulmasına rağmen, rölatif nemin jelin büyümesi için %80'den daha yüksek olmasının gerektiği raporlanmıştır [20-23].

Hobbs'a göre, ASR büyümesinin devamı, Şekil 2.2'de gösterilen jel modellerini takip etmelidir [17]. Sistemin gerilim kuvveti aşıldığında, çatlaklar oluşur ve çoğalır. Çatlakların çoğalması için ayrı bir yön olmadığı gibi, ayrıca çatlakların başlaması için yerleri rasgele seçildiğinden, haritaya benzeyen ASR'nin karakteristik bozulmalarını ortaya çıkarır. Çatlakların yerleri, agrega üzerindeki reaktif silislerin yerleri ve çevredeki (OH^-) hidrosil iyonlarının varlığı tarafından belirlenir (Şekil 2.2 ve Şekil 2.3).

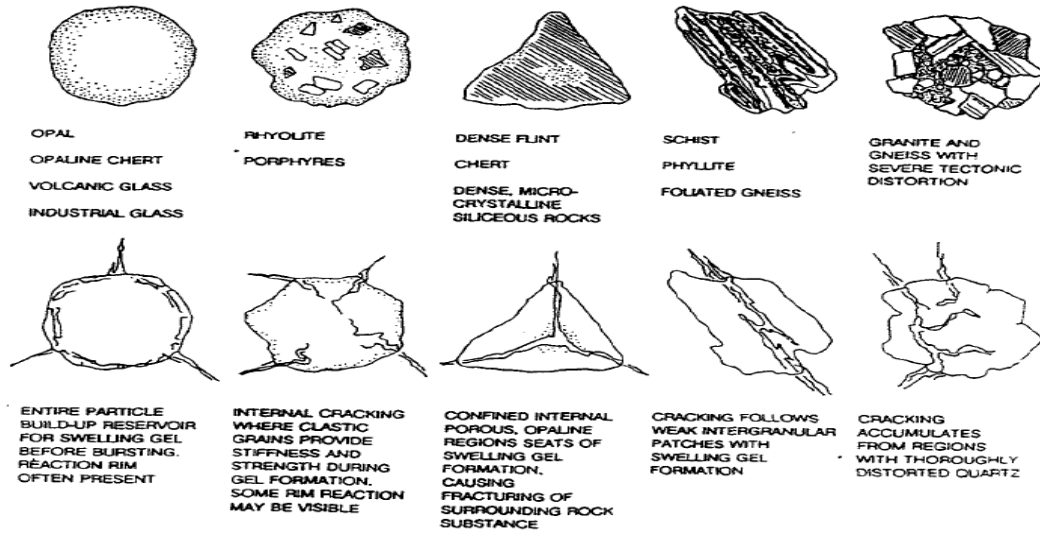


Şekil 2.2. İlerleme şeması ve ASR jelinin büyümesinin sonucu [3]



Şekil 2.3. Karayolu yol bariyerinde gözlenen ASR çatlakları (Bolu 2011)

Şekil 2.4. Çeşitli agregaları ve onların ASR ile ilgili reaksiyon modellerini göstermektedir.



Şekil 2.4. Çizimler dokuları gösteriyor, birincil alkalideki ASR'yi etkileyen morfoloji ve alaşım, hassas kayalar ve karakterestik desenler [23].

Karışımın dizaynı düşünülmelidir, çünkü toplam agregası içeriği ve boyutu, su/çimento oranı ve hava içeriği jel oluşumunu etkilemektedir. Örneğin, Hobbs [17,24], daha yüksek bir genişleme ile sonuçlanacak olan agreganın bütünün bir pessimum miktarı olduğunu anlatmaktadır. Buna rağmen, çok küçük boyutlarda, bir puzzolanik etkinin, genişlemenin miktarını azalttığı yaptığı çalışmalarda bildirilmiştir. Genleşmede su/çimento oranının etkisi düzgün değildir, daha yüksek S/C oranı, betonun yaşı ve toplam boyutu gibi diğer faktörlere öncülük eder, her ikisi de genişlemeye sebep olmaktadır [25].

Çimento matrisinin yapısını vurgulamadan mevcut kılcal gözenekler veya boşluklar genişletilen jel ile açıklanabilmektedir. Puzolanik dolgu malzemeleri olarak uçucu kül, silis dumanı veya diğer mineral karışımları gibi, kullanılması sonucunda ASR tarafından etkilenen betonun genişmesini ve jel oluşumunu azalttığı tespit edilmiştir [26]. Genleşme ve jel mekanizmaları iyi anlaşılmalı değildir, ama silisin mineral karışımları içerdiği kabul edilmekte, silis agregalarda (OH^-)'tan daha hızlı tepki gösterir [18, 27]. Bu yüzden alkaliler hızlıca tüketilir ve bir (OH^-) seviyesi ya çok az yoğunlaşan ya da hiç yoğunlaşmayan belli bir seviyeye kadar azalmaktadır.

Ayrıca, bazı mineral karışımlar, bazların zarar verici miktarlarını da içermektedir. Genleşme ve jel mekanizmalarında bu kısa gözden geçirmeden sonra, ASR üzerindeki mevcut bilgiyi özetleyen maddeler aşağıdaki gibidir [25].

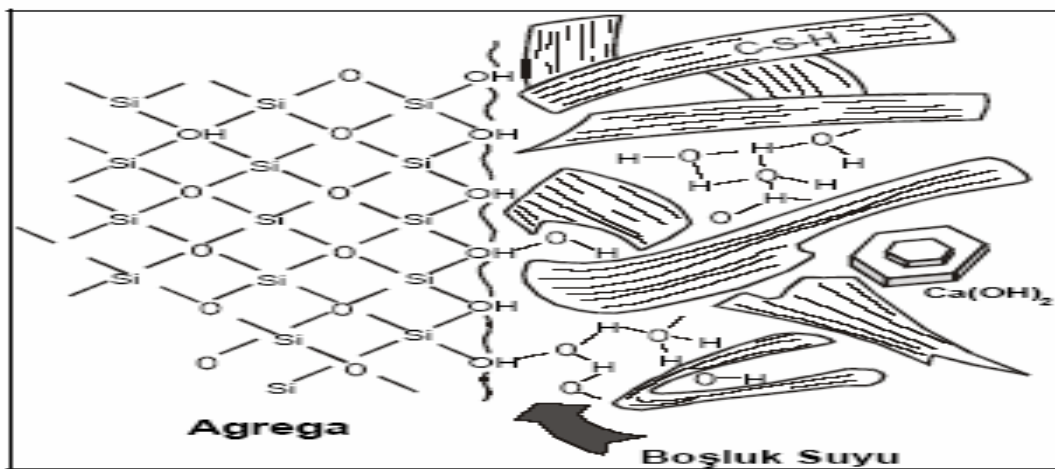
ASR, gözenekli çözeltilerdeki bir (OH^-) ile agregalarda bulunan zayıf kristalleştirilmiş silis arasında bir tepki sonucu oluşan jeldir.

1. Jel ürünü, suyu içmekte ve genişlemektedir.
2. Suyun ya da %80'den daha fazla rölatif nemin varlığı jelin genişlemesi ve betonun kırılması formu için gereklidir.
3. Bir miktar silisli mineral karışımlar, gözenekli çözeltilerdeki alkalileri tüketir, pH'ı düşürür bu yüzden olası ASR'yi azaltmaktadır.
4. Agregası tipi ve boyutu, betonun ölçülen genişleme değerinde önemli bir rol oynamaktadır.
5. Diğer faktörler olarak, betonda ASR nedeniyle oluşan hava sürüklenmesi ve S/C oranı sayılabilir.

2.3.3. Alkali silis reaksiyonunun kimyası

Ortamda hidroksil iyonları (OH^-) yoksa reaktif silis, içine çok az miktarda su molekülü alabilmektedir. Ortamda aşırı oranda hidroksit iyonu bulunması durumunda ise reaktif silis, dış ve iç yüzey genişliğine ve atom yapısındaki bütünlüğüne bağlı olarak çözünmeye ve şişmeye başlamaktadır (Şekil 2.5) [16].

Silis + Alkali \rightarrow Alkali Silis Jeli + Su = Genleşme

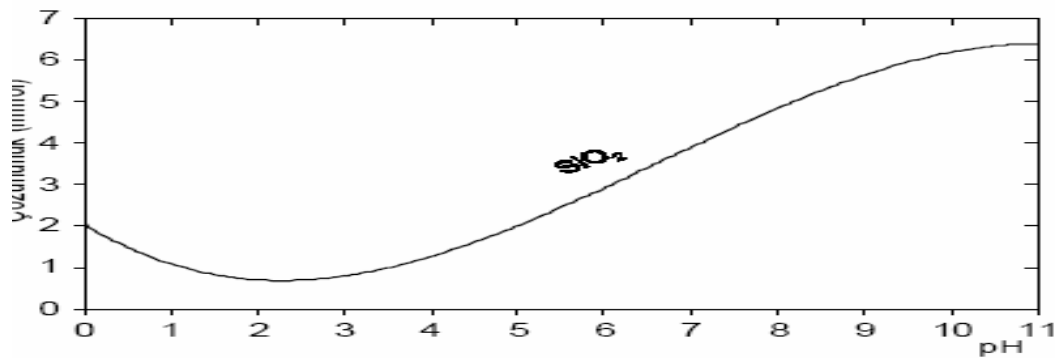


Şekil 2.5. Alkali silis reaksiyonunun şematik gösterimi (1. Aşama) C-S-H: Çimento, OH⁻: Beton boşluk suyunda bulunan OH⁻ iyonları Si₂O: Reaktif agrega, Ca(OH)₂: Çimento hidratasyonu sonucu artan kireç[28].

2.3.3.1. Agregada pesimum kavramı

Reaksiyon sonucu betonda en fazla genişmeye ve hasara neden olan reaktif agrega oranına “Pesimum oranı” denilmektedir [29].

Pesimum oranının, alkali silis reaksiyonu sonucu betondaki genişme üzerine etkisini gösteren tipik bir eğri Şekil 2.6 'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Tipik pesimum reaktif agrega içeriği grafiği

Bu grafikte dikey eksen betonda meydana gelen genişmeyi ve yatay eksen ise betonda kullanılan agrega içinde reaktif agrega oranını göstermektedir. Eğrinin pik yaptığı nokta, betonda alkali silis reaksiyonu sonucu en yüksek genişmeye neden olan pesimum reaktif agrega içeriğine karşılık gelmektedir. Pesimum oranını gösteren eğrinin şekli çimento çeşidinden, kompozisyonundan, oranından, agrega özelliklerinden ve aynı zamanda alkali miktarından da etkilenmektedir [30].

Sabit olan alkali içeriği, S/Ç, vs. gibi parametrelerle, potansiyel olarak reaktif olan farklı agregaların genişmesindeki fark, esas olarak (I) oluşturan mineral fazlarının veya kaya tiplerinin doğasında var olan reaktivitesine, (II) reaktif parçacığın tane boyutuna ve (III) reaktif agreganın içindeki bu reaktif fazların oranlarına bağlıdır. ASR'ye yatkın olan agregaların tümü, her nasılsa, pesimum etki göstermez. Bu pesimum etkisi olmayan agregalar, agregada bulunan reaktif parçacık miktarının bir fonksiyonu olarak artan bir genişme sergiler. İnce agrega daha fazla olan yüzey alanından dolayı ASR'ye daha yatkındır [29].

2.3.4. Alkali silis reaksiyonunu etkileyen faktörler

ASR 'ye bağlı beton hasarı ilk defa Kuzey Amerika' da 1940'ta Stanton tarafından fark edilen bir olgudur. Stanton'un ilk makalesinden sonra birçok çalışma yayınlanmış, fakat ASR mekanizması halen tam olarak anlaşılamamıştır. Yine de, ASR'yi oluşturan başlıca etkenler bu bölümde tanımlanmıştır. Su varlığında gözenek çözeltisindeki alkaliler belirli agregalarda bulunan reaktif silis ile etkileşir. Önemli rol oynayabilecek ilgili etkenler; çevresel bağıl nem, betonun gözenekliliği ve betondaki mineral katkıdır [31].

ASR üzerinde beton karışım oranları, agrega boyutu, hava katkısı, mineral ve kimyasal katkıların ve ortam sıcaklığının da etkisi vardır.

2.3.4.1. Karışım oranlarının etkisi

Reaktif agrega içeren bir betonun karışım oranlarını değiştirerek betonun reaktif agrega içeriği, alkali içeriği ve hidroksil iyonu konsantrasyonu değiştirilebilir. Bu değişim aynı zamanda betonun sonuçtaki genleşme miktarını da etkiler. Harç ve betonların bu davranışı pratikte önemlidir. Betondaki tüm alkaliler sadece Portland çimentosundan ileri gelmektedir. Çimento alkalilerinin yanı sıra bazı agregaların da betonun boşluk çözeltisinin alkalinitesine katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Su/çimento oranı ile ince agrega miktarı yüksek karışımlarda bazı bazaltların betonun boşluk çözeltisinin alkalinitesini hayli arttırdığı gözlemlenmiştir [30].

2.3.4.2. Reaktif agreganın cinsinin ve tane büyüklüğünün etkisi

Betonda alkali silis reaksiyonunun oluşabilmesi için herhangi bir formda "reaktif silis" in bulunması gerekmektedir. Reaktif silis oldukça farklı doku ve kristal yapı sergilemektedir. Silisin doku farklılığı, kayaçlaşma sürecinde azalan soğuma hızına bağlıdır. Agregadaki silisli mineraller kayaç oluşum sürecinde soğuma hızına bağlı olarak amorf veya camsı (kristalleşmemiş) yapıdan kriptokristal, mikrokristal ve kristal yapıya kadar geniş bir aralığa dağılırlar. Kimi durumlarda kuvars kristallerinin

oluşumu sırasında içsel gerilmeler oluşur. Bu tür kuvars mineralleri içeren agregalar reaktiftir.

Silisli bir agreganın reaktif olup olmadığını belirleyen silisin formudur. Reaktif agreganın tane büyüklüğü de alkali silis reaksiyonu sebebiyle oluşabilecek zararlar üzerinde etkilidir.

Reaktif agreganın boyutunun etkisi, reaktif agreganın fiziksel ve mineralojik karakterine de bağlıdır. Reaktif agreganın gözenekliliği de alkali silis reaksiyonu bakımından önem taşımaktadır, gözenekliliği fazla olan agreganın içine boşluk çözeltisinin girişi daha kolay olmakta ve reaksiyon alanı artmaktadır.

Agreganın tane boyutunun ve gradasyonunun genişmeye olan etkisi üzerindeki araştırmalar sınırlıdır. Bazı araştırmacılar, reaktif silis içeren agregaların reaktif parçacık boyutu azaldıkça harç çubuğu genişmelerini arttırdığını, ancak parçacık boyutu 20 µm'nin altına düştüğünde genişmenin aynı şekilde artmadığını belirlemişlerdir. Büyük agrega parçacıkları kullanıldığında genişmelerin geciktirildiğini belirtmişlerdir. Sadece reaktif ince agrega kullanıldığı takdirde betonun genişmesinin ilk aşamalarda oluştuğunu ve ileriki zamanda sabit kaldığını belirlemişlerdir. Diğer taraftan, reaktif agrega olarak sadece kaba agrega kullanıldığı takdirde ise genişmeler yavaş ve daha uzun sürede meydana gelmektedir.

Agrega boyutu arttıkça maksimum genişmeyi veren çimento/agrega oranı azalmaktadır. Agreganın boyutu büyüdükçe genişmeler yavaş ilerlediğinden tek-boyutlu agrega gradasyonunun kullanımının ASR genişmelerini azaltmak açısından daha avantajlı olduğu söylenebilir [30].

Katayama (2000) bildirisinin sonucunda hızlandırılmış harç çubuğu metodu ile petrografik analiz yönteminin birlikte kullanılmasının bölgedeki agreganın reaktivitesini belirlemede etkili olduğunu belirtmiştir [32]. Genelde yüksek miktarda reaktif silis içeren agregalar ile daha yüksek oranda puzolan kullanılması durumu ortaya çıkmaktadır.

2.3.4.3. Alkalilerin etkisi

Bilinen alkaliler olarak sodyum $[Na^+]$ ve potasyum $[K^+]$ gösterilebilir. Beton, çoğunlukla alkaliler (Na^+ , K^+) ve hidroksil (OH^-) iyonları içeren çözeltiyle dolu olan, sayılamayacak kadar çok gözenekten oluşmaktadır. ASR'nin oluşması için gözenekteki çözeltideki alkali seviyesi yüksek olmalıdır.

Aşağıdakiler betondaki alkalilerin kaynaklarıdır;

1. Çimentodan gelen alkaliler, çimento, çimento minerallerinin hidrasyonundan dolayı çözülebilir alkalilerin başlıca kaynağıdır. ASTM C 150'ye göre düşük alkalili çimentoyu tayin ederken standart seçenek % 0.6'dır. Ancak, bu değer bile reaktif agrega ile birlikte kullanıldığında yüksek olabileceği belirtilmektedir.
2. Çözünen tuzlardan gelen alkaliler, bu tuzlar, çözünen tuzların kullanıldığı alanlarda alkalilerin yaygın bir kaynağıdır. Betona zarar verebilecek tüm kimyasalların deneylere tabi tutulması için özenli çabalar gerekmektedir.
3. Tamamlayıcı bağlayıcı malzemeler, örneğin, yüksek alkali içeriği ile uçucu kül alkali meydana getirebilir.
4. Agregalar, bazı agregaların kendisi alkaliler için potansiyel olabilir. Tipik olarak, agreganın kafes sistemi ASR sırasında bozulmaya başladığı zaman, alkaliler yayılmaktadır. Bu alkaliler, sonradan daha ileri seviyede ASR için ilave bir kaynak hazırlamaktadır [33].

Kar mücadelesinde kullanılan tuz ($NaCl$), deniz suyu, beton kür suyu ve endüstriyel atık suları aracılığıyla beton bünyesine dışarıdan giren alkaliler, dış alkaliler olarak adlandırılır. Özellikle geçirimli betonlarda ve/veya çatlaklar oluşmuş betonlarda dış alkaliler ASR'nin neden olduğu genişmeleri arttırır. Deniz suyunun betona olan etkisini incelemek üzere yapılan araştırmada 500 kg/m^3 normal Portland çimentosu içeren reaktif andezit agrega ile dökülen betonlarda reaksiyon sonucu oluşan genişlemenin yarısına kadar deniz suyuna batırılmış betonlarda tamamen deniz suyuna batırılmış betonlara nazaran daha hızlı olduğu görülmüştür. Deniz suyunun sertleşmiş betonda oluşan ASR genişmelerini arttırıcı etkisi, içeriğindeki hidrate C3A ve Portlandit bileşenlerinin $NaCl$ ile oluşan reaksiyonu sonucu (OH^-)

miktarının artması sebebiyledir. Özellikle İngiltere’de betonun alkali miktarını 3-4 kg/m³ gibi bir değerle kısıtlamak koruyucu olarak kabul edilmesine karşın araştırmalarında bu alkali içeriğinde ve yavaş reaktif agrega ile yapılan betonlarda bile NaCl etkisi ile fazla miktarda genleşmeler oluştuğu belirlenmiştir [16].

2.3.4.4. Rutubetin etkisi

Rutubet, silisin çözünmesine, alkali iyonların yayılmasına ve reaksiyon bölgesinde jel oluşumuna sebep olur. Oluşan jel ise su emerek şişip genişler ve betonda içsel çekme gerilmeleri oluşmasına yol açar. Araştırmalar, bağıl nem oranı %80’ in üstünde olan betonlarda alkali silis reaksiyonunun oluştuğunu göstermektedir.

Düşük su/imento oranlı beton, ilave imento, mineral katkı veya herhangi başka bir yolla beton geirirnililiği azaltılırsa, rutubetin betona girişi ve beton içinde dolaşımı azalmaktadır.

Dolayısıyla beton içinde alkalilerin yayılması da azaltılmış olur. Nem, ASR için zaruri elemanlardan biridir. Bu reaksiyon oluşumu nem yokluğunda gerçekleşemez. ASR jel nemi emer. Bu yüzden, daha yüksek rutubet, nem emilimini arttırır ve böylelikle betonda daha fazla genleşmeye sebep olur [33].

2.3.4.5. Sıcaklığın etkisi

Sıcak iklim koşullarındaki yapılar, soğuk iklim koşullarındakilere göre alkali silis reaksiyonuna karşı daha duyarlıdır.

Çünkü reaksiyonun hızı sıcaklık arttıķa artar. Jones ve Tarleton’un (1958) imento tableti üzerindeki agreganın aşırı alkali çözeltisine maruz bırakıldığı ‘jel pat’ deneyi ile alkali silis reaksiyonunun bu tipte bir reaksiyon olduğu kanıtlanmıştır [114]. Sıcaklık artışı, agregaların büyük çoğunluğunda aşırı termal gerilmelere sebep olur. Agregaların büyük çoğunluğu daha yüksek sıcaklıklarda daha fazla reaktiflik göstermektedir [33].

Diamond'un yaptığı araştırmaya göre, yüksek sıcaklıklarda reaksiyon ve genişleme daha erken başlayarak daha hızlı devam etmiştir. Zaman geçtikçe hem reaksiyonun hem de genişlemenin hızı azalmıştır. Tersi olarak, düşük sıcaklıklarda kürlenmiş betonlar ve harçlar daha yavaş reaksiyona girmekte ve zamanla yüksek sıcaklıklarda kürlenmiş harç ve betonların genişlemelerine yaklaşmakta veya onları geçmektedir [14].

2.3.4.6. Sürüklenmiş havanın etkisi

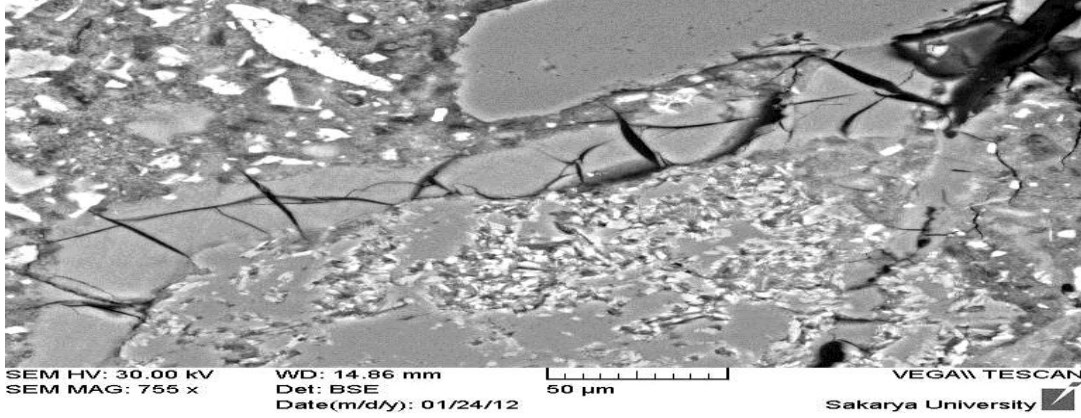
Reaktif agrega içeren ancak alkali silis reaksiyonu sebebiyle hasar görmeyen yapılar incelendiğinde, jelin hava boşluklarını tamamen veya kısmen doldurduğu görülmektedir. Bundan dolayı, jelin hasar görmemiş betonda hava boşluklarını doldurarak ilerlediğini ve hava sürükleyici katkı kullanımının alkali silis reaksiyonu sebebiyle oluşan hasarı önleyebileceğini söylemişlerdir [30].

2.3.5. Alkali silika reaksiyonu hasarlarının teşhisi

Reaksiyon ürünleri olmadan zararlı ASR genişmelerinden bahsetmek mümkün değildir. Ancak tersi geçerlidir, ASR ürünlerinin gözlemlenmiş olması zararlı ASR genişmelerinin olduğu anlamında değildir [12]. İngiliz Çimento Birliği (BCA), ASR hasarlarının teşhisi için sırasıyla saha incelemesi, örnek alma, laboratuvar çalışması ve sonuçların değerlendirilmesi ile gelecekte oluşabilecek hasarların öngörülmesini kapsayan bir çalışma uygulamaktadır. Bu programın en kapsamlı bölümünü saha incelemesi oluşturur [34]. ASR sebebiyle oluşan genişleme ve çatlakların, beton yapılarda yapısal ve kullanımsal sorunlar doğurduğu açıktır. Geleneksel yöntemler, yüzeyde görülen çatlakların belirlenmesi ve hasarlı betondan karot alınarak dayanımının ölçülmesine dayalıdır. Oysaki araştırmalar, betonda ASR sebebiyle oluşan hasarların beton basınç dayanımından çok elastisite modülünü ve çekme dayanımını etkilediğini göstermektedir [35].

Beton üzerinde yapılan petrografik analizlerle ASR hasarını teşhis etmek mümkündür. Betondan hazırlanan kesitlerin mikroskop altında deneyimli bir petrograf tarafından incelenmesi ile reaktif agrega ve ASR ürünleri belirlenebilir.

ASR jeli agrega içerisinde veya çevresinde bulunabilir. Şekil 2.7’de optik mikroskopla çekilmiş deneysel çalışma sonucunda çimento hamuruna sızan ASR ürünü görülmektedir. Ancak bu yöntemle hasarın ne mertebede olduğunun teşhisi zordur.



Şekil 2.7. Deneysel çalışma sonucu elde edilen çimento hamuruna sızan ASR ürünü

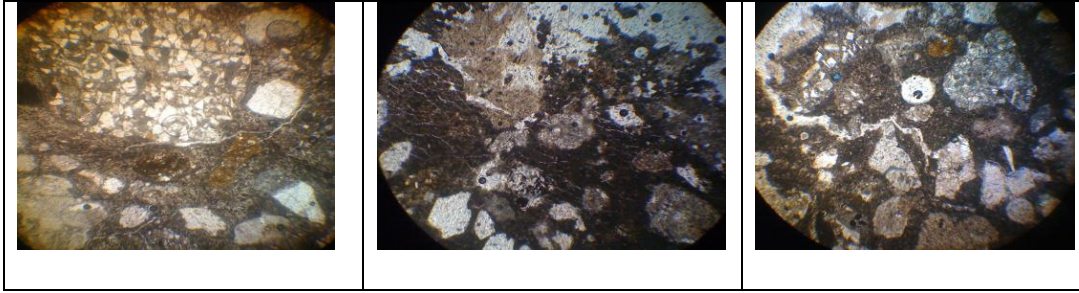
1980’lerin başında Blight vd, ASR hasarı şiddetinin belirlenmesi için görsel incelemeye dayalı bir metot geliştirmiştir. Buna göre, makroskobik boyutta bir hasar oluşmadan önce, cilalanmış kesit örneklerinde ASR hasarının başlangıcının belirlenebileceği bildirilmiştir. Araştırmacılar, petrografik analiz yöntemi ile incelenen örneklere hasarın şiddetine göre 0 ile 5 arası sayı vermektedir [36].

Aşağıda sözü edilen gözlemlerin hiçbirisinin olmaması durumunda,

1. Agrega parçacıklarının etrafında koyu renkli reaksiyon halkası gözlenmesi durumunda,
2. Beyaz, porselensi, asitte çözünebilir reaksiyon ürünleri (Jel) görülmesi durumunda,
3. Agrega parçacıklarının içerisinde çatlaklar bulunması durumunda,
4. Harçta çatlakların bulunması durumunda,
5. Harç ve kaba agrega arasındaki çimento pastasının çatlak oluşturması bu nedenle aderansın kaybolmuş olması durumundadır.

Bu hasarların örneklerde sıklıkla bulunup bulunmadığı da önem taşımaktadır. Berube vd, her biri belli bir katsayı içermek suretiyle çeşitli faktörleri bir arada bulunduran bir potansiyel genleşme hızı (PRE) parametresi geliştirmiştir. Bu parametre söz konusu betonun laboratuvar koşullarındaki genleşmesine, kullanılan agreganın reaktivitesine, karotlar üzerinde yapılan genleşme deneylerinden önce ve sonra elde edilen petrografik karakteristiklere, betonun suda çözünebilir alkali miktarına, servis ömrü süresince bulunduğu ortamın nem ve sıcaklık koşullarına ve bu sürede üzerine etkiyen basınç gerilmesine bağlı olarak belirlenmektedir. PRE ile betonun zamanla oluşabilecek potansiyel genleşmelerinin tahminlenmesi sağlanabilir [37].

Stark, sertleşmiş betondaki ASR hasarlarının ve potansiyel genleşmelerin belirlenmesi için bir inceleme yöntemi öne sürmüştür [38,39]. Bu metotla sertleşmiş betonda ASR'ye yol açabilecek, nem, mevcut alkaliler ve reaktif agrega değerlendirmektedir. Öncelikle saha betonunun mevcut nem durumu standart tekniklerle belirlenmektedir. Daha sonra saha betonundan 100mm'lik karotlar alınarak farklı kür koşullarına tabi tutulmaktadır. Karotların bir kısmı 38°C'de suda, diğer bir kısmı 38°C'de 1N NaOH çözeltisinde, bir kısım ise 38°C'de kapalı kaptaki yüksek bağıl nemde bekletilir. Suda bekletilen örnek, çözeltide ve kapalı kaptaki bekleyen örnekler için kontrol örneği görevi görmektedir. Tüm numunelerden 12 ay boyunca genleşme ölçümü alınmıştır. Suda bekletilen örnekle, çözeltide bekletilen örnek arasındaki genleşme farkı %0.03'den fazlaysa, betonda ileri yaşlarda ASR genleşmeleri oluşabileceği anlamını taşımaktadır. Kapalı kaptaki bekleyen numunelerde ölçülen genleşmeler ise mevcut betonda ASR oluşması için yeterli alkali olup olmadığının bilgisini vermektedir [40]. Betonda oluşan ASR jelini belirlemenin bir diğer metodu da ASTM C 856 "Sertleşmiş Betonun Petrografik İncelemesi" standardının ekinde söz edilen uranil asetat uygulamasıdır. Bu yöntemde, beton yüzeyi uranil asetat çözeltisi ile spreylenecek ve suyla durulanmakta, ardından mor ötesi ışık altında incelenmektedir. Işık altında sarımsı yeşil parlayan kısım ASR jelinin varlığına işarettir (Şekil 2.8). Ortamda jel varlığının ASR hasarı oluşmasına yetmediği gibi, bu yöntemle jelin tespiti de tek başına ASR hasarının oluştuğuna işaret etmez [12, 40, 41].



Şekil 2.8. Beton numunelerde ASR görüntüleri [41]

ASR hasarlarının tespitinde, betonda oluşan genleşmeler, çatlaklar, yüzeysel tortular, parça atmalar ve renk değişimleri de incelenmektedir.

2.3.5.1. Alkali silis reaksiyonu hasarı olarak alkali silika jelleri

Alkali silis reaksiyonu ürünlerinin kompozisyonu, boşluk çözeltisinin kompozisyonuna, reaktif silisin tipine, reaksiyon sıcaklığına ve reaksiyona giren ürünlerin konsantrasyonuna bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Reaksiyona uğramış bir betonun çatlaklarında yer alan jel, genelde şeffaf ve reçinemsiz olup viskozitesi kaba motor yağı ile reçine arasındadır. Jel örneklerinin viskoziteleri arasında kayda değer farklılıklar bulunmaktadır. Örneklerin bazıları yeterince sıvı olup çatlaklar arasından akarak beton boşluklarını tamamen veya kısmen doldurur. Tipik olarak, jeller havayla temas ederek zamanla karbonatlaşır, beyaz ve kuru bir hal alır. Bunlarda aynen kurumuş kilde olduğu gibi kuruma çatlakları gözlenir [42].

ASR ürünlerinin kompozisyonu ve morfolojisi ile ilgili çalışmalar son yıllarda yapı malzemesi üzerinde uygulanan tarayıcı elektron mikroskobu çalışmalarının artmasıyla önem kazanmıştır. ASR jelinin görsel incelemesine dayalı bir çalışma da, Thaulow vd., çimento hamurundaki çatlaklarda ve hava boşluklarında amorf jele rastlarken kaba agrega parçacıklarının içinde gölsü kristal yapıda ASR ürünleri belirlemiştir [43]. Moranville-Regourd, reaksiyon ürünlerini jeller ve kristaller olmak üzere iki şekilde sınıflandırır. Jeller masif (yoğun) veya süngersi (dokulu ve taneli) görünümlü olarak tanımlanmaktadır [44].

Thaulow vd, amorf ürünlerin zamanla kristalize ürünlere dönüştüğünü savunmuştur [43]. Genel olarak kabul gören teori, amorf jelin zamanla kristalize hale geldiğidir.

Jelin kristalize olmasını açıklayan pek çok mekanizma öne sürülmüştür. Cole ve Lancucki, jelin kurumması ile kristalizasyonun gerçekleştiğini belirtmiştir. Ayrıca 12 gün oda koşullarında kürlendikten sonra 110°C'ye ısıtılan ASR jelinde kristalizasyona rastlamıştır [45]. Thordal Andersen ve Thaulow (1990) ile Thaulow vd (1996), kristalize olmuş jellere genellikle agrega içerisinde rastlandığına ve çimento hamurundaki çatlaklarda daha az rastlandığına değinmiştir [46, 43]. ASR jellerinin kimyasal kompozisyonu değişken olmasına rağmen basitçe üç kategoride toplanabilir;

1. Kısmen reaksiyona uğramış ve şişmiş silis,
2. Nispeten saf alkali silikat çözeltileri veya çeşitli alkali ve su içeriklerinde jeller,
3. Neredeyse sabit kompozisyonda (su içerikleri hariç) iki komponentli basit karışımlar.

Kirkpatrick (1991)'in araştırmaları bu olasılığı doğrulamaktadır [47]. Yazar, alkali silis jelinin alkali-silikat-hidrat ve kalsiyum-silikat-hidrat fazlarının bir karışımı olduğunu söylemiştir. Ayrıca, Gutteridge ve Hobbs (1980), Beltane opal taneciklerinin etrafındaki reaksiyon sahasının sodyum silikat ile sodyum kalsiyum silikattan oluştuğunu vurgulamaktadır [48].

2.3.5.2. Alkali silika jellerinin genleşme mekanizması

Oluşan jelin karakteristik bileşimi henüz tam belirlenememiş olmakla beraber silisyum, sodyum, potasyum, kalsiyum ve magnezyum içerdiği sanılmaktadır. Jel ve kristal ürünlerinin agrega harç ara yüzünde ve hava boşluklarında meydana geldiği belirtilmiştir [16]. ASR yüksek pH değerlerinde ortaya çıkar, çünkü reaktif silis ancak pH'ı yüksek çözeltide çözünür. Oluşan genleşmeler betonun çekme gerilmesini aştığında çatlaklar meydana gelmektedir. Alkali silis jelinin hasara yol açan özeliği su emerek genleşme olduğundan, genleşmeye yol açan mekanizmalar üzerinde durmakta fayda vardır. Bu konuda farklı teoriler mevcuttur. Absorblanma teorisine göre ASR genleşmesi, jelin hacimsel konsantrasyonuna, gelişme hızına ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. Jelin gelişme hızı yavaş olduğunda, jelin beton içinde yayılması sebebiyle içsel gerilmelerin oluşması önlenir. Jelin hızlı gelişmesi

durumunda ise, içsel gerilmeler betonu genişletirip çatlatacak kadar yüksek olmaktadır [17].

Ozmotik basınç teorisine göre çimento hamuru, silikat iyonlarına karşı geçirimsiz bir membran gibi davranmaktadır [49]. Bu membran, içinden su, hidroksil iyonları ve alkali metal iyonlarının difüzyonuna izin verirken, silikat iyonlarının difüzyonuna engel olmaktadır. Bu durumda, reaksiyon oluşan her bölge, bu membran tarafından tutulmuş çimento hamurunda artan bir basınç oluşturur. Hansen'e göre (1944), beton boşluk çözeltisinin bu membrandan difüze olması reaksiyonu da hızlandırmaktadır [49]. Vivian (1950), reaksiyondan sonra da çatlamların devam etmesi ve çimento hamurunun geçirimsiz bir membran gibi davranmasının olanaksız olduğunu belirterek bu teoriyi eleştirmiştir [50]. Dolayısıyla, doğal puzolan, uçucu kül ve cüruf içeren harç çubuklarında yüksek miktarda $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$ ve düşük miktarda $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$ oranına sahip ASR ürünleri daha yüksek genleşmeler meydana getirmektedir. Betondaki ASR ürününün kompozisyonu zamanla çimento hamurundan kalsiyum iyonu toplamasıyla değişime uğramaktadır. ASR ürününün kalsiyum içeriği, ürünün betondaki yeri ve yaşına bağlı olarak değişmektedir [51].

Yine de kalsiyum iyonlarının ASR genleşmesine etkisi tartışmalıdır. Powers ve Steinour (1955)'un teorisine göre, beton boşluk çözeltisindeki kalsiyum iyonu konsantrasyonunun alkali iyonu konsantrasyonuna oranı jel genleşmesini kontrol etmektedir [52]. Kalsiyum / alkali iyon oranı yüksekse “şişmeyen” (veya şişmesi sınırlı) tipte bir kalsiyum - alkali - silis kompleksi oluşması beklenir. Tersine kalsiyum / alkali iyon oranı düşükse “şişen” tipte alkali silikat hidrattan oluşan ve az miktarda kalsiyum içeren jel oluşmaktadır. Ayrıca güvenli reaksiyon oluşması için, bir kısım silisin reaksiyona uğrayan tabakalar arasından difüze olması su, kalsiyum iyonları ve alkalilerin de reaksiyon bölgesine difüze olması gerekmektedir. Wang ve Gillot, kalsiyum-alkali-silis jelinin şişmeyen özellikte olduğunda hemfikirdir. Ancak yazarlar, ortamda aşırı miktarda kalsiyum hidroksit bulunmasının da reaksiyonu ilerleteceğini belirtmektedir [53]. Wang ve Gillot, kalsiyum iyonlarının ASR ürünleri içindeki alkalilerin yerine geçerek bunların ortama salıverilmesini desteklediğini ve açığa çıkan alkalilerin de ortamdaki reaktif silisle reaksiyona girerek genleşmeleri arttırdığını belirtmişlerdir [53]. Chatterji'ye göre kalsiyum hidroksit, sodyum,

kalsiyum, hidroksil iyonlarıyla su moleküllerinin reaktif taneciğın içine girişini hızlandırmaktadır [54]. Yüksek kalsiyum iyon konsantrasyonu, silikat iyonlarının reaktif tanelerden dışarı difüzyonunu da azaltır. Sonuç olarak, reaktif tanelerin içine ve dışına yayılan silikat iyonlarından daha fazla sodyum, kalsiyum, hidroksil gibi iyonların girmesiyle genleşme oluşur [55, 56, 57].

Helmuth ve Stark, ASR ürünlerinin alkali silikat hidrate jeli ile değişken su içeriğinde ve alkali içeren zayıf kristalin kalsiyum silikat hidratların karışımı olduğu sonucuna varmıştır [21]. Diamond, tamamen reaksiyona uğramış doğal opal kum taneciklerinin içindeki çözünmemiş ASR ürünü kalıntılarını analiz etmiştir. Diamond, alkalice zengin bileşenin tümüyle çözünerek ortamdan ayrılmadığını gözlemlemiştir [51].



Şekil 2.9. ASR hasarına maruz kalmış yapı elamanlarından görüntüler [40].

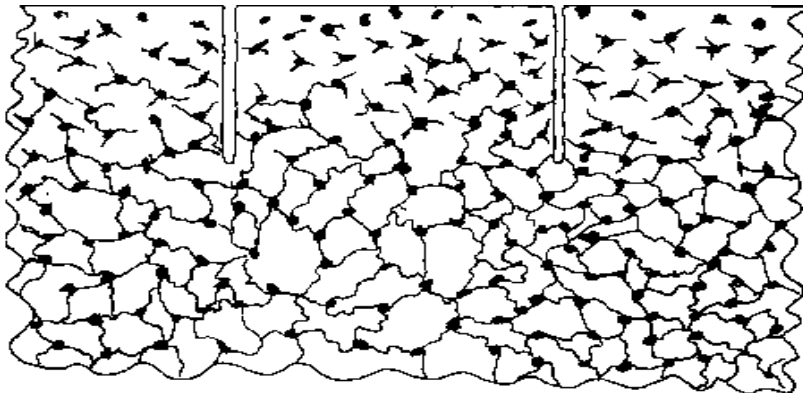
2.3.5.3. Genleşme ve çatlama

ASR hasarı gösteren bir betonda en dikkat çekici görüntü, harita şeklindeki ağ çatlaklarıdır. ASR hasarı tespitinde görsel inceleme ile çatlakların yeri, uzunluğu, genişliği, görünür derinliği ve devamlılığı ile çatlağın agreganın içinden mi yoksa çevresinden mi devam ettiği belirlenebilir. Çatlaklarla ilgili olarak, yapıdaki gerilme yönü, donatının yeri ve diğer zorlanmalar tespit edilmelidir [34]. Özellikle yağmurdan sonra betonun kurumması sırasında ince çatlaklar daha belirgin şekilde gözlemlenebilir [12]. ASR genleşmeleri reaktif agreganın içinde veya etrafında jel oluşumunu takiben jelin su emmesi ile başlar. Su emen jel, her yönde yaklaşık 10 MPa veya daha fazla gerilme oluşturur. Homojen küresel bir agreganın etrafındaki çimento hamuruna uyguladığı basınç her yönde eşit olup böyle bir hacim artışı karşılayan minimum çatlak sayısı üçtür ve genelde bu çatlaklar birbiri ile 120° açı yapar. Bu çatlaklar üç-dört kollu yıldız şeklinde agrega etrafında başlayarak yayılır. Bu çatlakların birbiri ile birleşmesi sonucunda zorlanmamış ve donatısız betonda klasik harita çatlakları oluşur [58]. Zorlanma bulunan yapılarda ise çatlaklar gerilme doğrultusunda yönlendirilir [42]. Donatılar ana gerilmeye paralel bulunduğu için doğrusal ASR çatlakları da bu yöndedir. Ancak, çelik korozyonu çatlaklarından farklı olarak bunlar donatı üzerinde değil, donatılar arasında oluşur. Şekil 2.10-c'de bir karayolu köprü kolonu üzerindeki yük ve alkali silis reaksiyonu etkisiyle oluşan çatlamlar görülmektedir. Bu kolon daha sonra köprüden ayrılarak parçalara ayrılmış ve reaksiyonun devam etmesine izin verilmiştir. Yük kaldırıldıktan sonra kolonun yüzeyinde tipik harita çatlakları gözlenmiştir. Donatının her iki yönde de eşit olarak dağıldığı döşeme gibi yapılarda ise çatlaklar genellikle dikdörtgen biçimli harita çatlakları şeklindedir (Şekil 2.10) [7].

 <p>a- ASR etkilenen bir köprü yapısında parapet duvarı bölümleri bitişik bağıl hareketi</p>	 <p>b- Köprü kiriş genişletilmesi kiriş ve dolgu arasında boşluk kaybına yol açan ve sonunda lokalize pullanma ile kirişin uç ezilmesi</p>	 <p>c- Mott Mac Donald test sahasında bir karayolu köprüsünün kolonu</p>
 <p>D- Pop out dona duyarlı gözenekli iri agrega partikül genişlemesi</p>	 <p>e- Alkali silika reaksiyonu çatlakları ve Thomas E. Stanton (Fotoğraf Kaliforniya Ulaştırma Bölümünden Alınmıştır.)</p>	 <p>f- İzmir Adnan Menderes Havalimanı değiştirilen pist ve taksi yolu betonu</p>

Şekil 2.10. ASR hasarına maruz kalmış yapı elemanlarından görüntüler [39, 40, 32, 7]

Alkali silis reaksiyonuna maruz kalmış beton elemanlarının yüzeyinde 0.1 mm ile 10 mm (ekstrem durumlarda) arasında makro çatlaklar oluşmaktadır. Makro çatlaklar ASR'ye maruz kalan yüzeye dikey durumda 25~50 mm olacak şekilde uzanmaktadır [17]. Mikro ve makro çatlakların idealize edilmiş modeli Şekil 2.11'de gösterilmektedir [17].



Şekil 2.11. ASR mikro ve makro çatlakların idealize edilmiş modeli

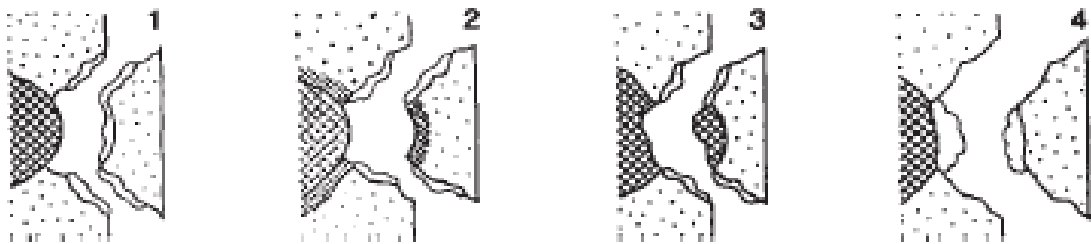
ASR hasarının ileri aşamalarında, derzlerin kapanması, kapak atmaları ve beton elemanın bazı kısımlarının bölgesel yer değiştirmeleri de gözlemlenmektedir.

2.3.5.4. Yüzeysel tortular

ASR jeli düşük viskozitede ise beton yüzeyindeki boşluklarda birikir ve nem miktarına bağlı olarak sulu bir bölge oluşturup yavaşça karbonatlaşarak beyaz bir görünüm kazanır. Nem lekeleri ve salyangoz şeklinde gözlenen izleri ASR için kullanılabilir teşhis belirtileridir [59]. Çatlaklar üzerinde ASR jeli tortuları veya kalsiyum karbonat görülebilir. Bunlar ardında beyazdan koyu griye kadar farklı renklerde tortular bırakır. Bu tortuların incelenmesi ve tortuların ASR sonucunda oluşup oluşmadığının belirlenmesi reaksiyonun teşhisi için bir yöntemdir [12].

2.3.5.5. Parça atma

Parça atma, tek bir agrega parçasının genişmesi veya beton yüzeyine yakın jelin genişmesi sonucunda yüzeyden koni biçimindeki parçanın sökülerek atılması olayıdır (Şekil 2.12) [34, 42]. Parça atmalar genellikle hızlı reaksiyona girerek genişleyen agregalarla üretilmiş betonda veya buhar kürü uygulanan elemanlarda görülmektedir [58].

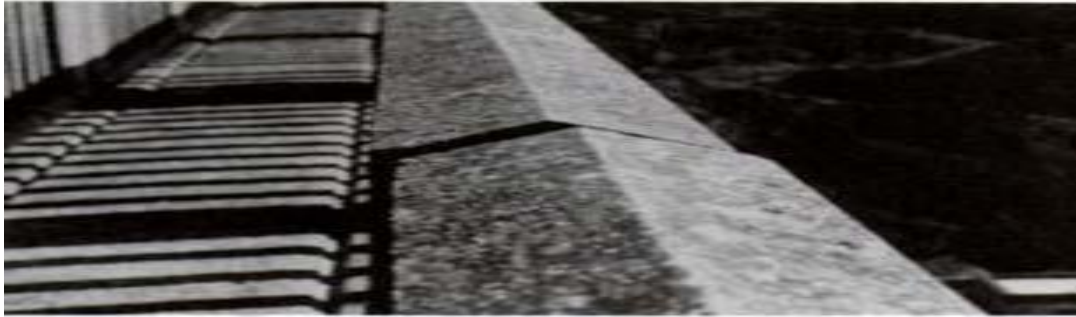


Şekil 2.12. Parça atma olayının oluşma şekilleri

Betonda parça atma oluşumu şöyle gelişmektedir. 2.12.1. nolu görüntüde agrega ve yakınındaki harç arasındaki aderans azalır, 2.12.2'de. agrega içindeki reaksiyon halkası sınırdan kırılır, 2.12.3'de. reaksiyon halkası oluşmadan kırılma agregada gerçekleşir, 2.12.4'de. agrega üzerinde oluşan jel genişleyerek üstteki harç tabakasını iter [42].

2.3.5.6. Yer değiştirmeler

ASR'nin yapıdaki beton elemanlarda genleşmelere yol açan bir olay olduğu ve bu reaksiyonun çoğu zaman yapısal elemanın her yerinde aynı şiddette olmadığı göz önüne alındığında boyutsal yer değiştirmelerin de ASR hasarlarının tipik bir belirtisi olduğu açıklanabilir. Bazı saha örneklerinde farklı zamanlarda dökülen betonların diğerlerinden daha şiddetli etkilendiği görülmektedir. şekil 2.13'deki Val de Mare barajı parapetinde görüldüğü gibi beton elemanlardan biri diğerlerine göre 50 mm kadar yer değiştirmiştir [42].



şekil 2.13. Parapet elemanı, Val de Mare Barajı, Jersey [42].

2.3.6. ASR'yi önleme yöntemlerinde farklı ülkelerin yaklaşımları

ASR tespitinde uluslararası kabul görmüş tek bir standart olmadığı gibi, betonda olası ASR hasarının önüne geçmek için de kabul edilmiş tek bir yaklaşım bulunmamaktadır. Farklı ülkelerin veya araştırma merkezlerinin bu konuda hazırladıkları yönetmelikler veya tavsiye niteliğinde çalışmalar aşağıda derlenmiştir. Betonlu oluşturan malzemelerle ilgili Kanada standardı olan CSA Standart A23.1-94-Ek B'ye göre ASR'yi önlemede kullanılacak olan imento yerine kullanılan malzemenin aşağıdaki şartları sağlaması gerekmektedir [11].

1. Belirtilen kimyasal özelliklere sahip olmalı,
2. Gereken minimum dozajın altında kullanılmamalıdır.

Mineral katkı minimum dozajın altında kullanılacak ise beton prizma deneyi veya hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ile söz konusu oranda kullanılan malzemenin

genleşmeyi kontrol altına almadaki etkisi incelenmelidir. Kimyasal özellikler bakımından yüksek fırın cürufu maksimum %1 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$ alkali içeriğine sahip olmalıdır. Uçucu külün toplam alkali içeriği %4.5 ve suda çözünebilir alkali içeriği ise maksimum %0.5 olabilir. Külün veya cürufun toplam alkali miktarı ve silis + alümina miktarına bağlı olmak üzere kullanılması gereken minimum dozaj, yüksek fırın cürufu için %50, uçucu kül için ise %20~%30'dur. Kullanılacak uçucu külün kireç içeriği %8'in altında olmalıdır. CSA Standardı A23.1-94-Ek B'ye göre alkali içeriğini 3 kg/m^3 ile sınırlandırmak aşağıdaki durumlarda etkili bir yöntem olmayabilir;

1. Kütle betonlarda kullanıldığında (bu tür betonların çok az genleşmeye uğraması bile istenmez),
2. Betona dış alkali girişi olduğu durumda,
3. Yüksek reaktiviteli agregaya kullanıldığında,

Kaliforniya Ulaştırma Dairesi (CALTRANS) mineral katkılarla ASR'yi önlemek için yaptığı çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlara varmıştır [60].

1. Çimento alkalitesi yükseldikçe ASR'de artar,
2. ASTM C150'de çimento için belirtilen %0.6 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$ üst limiti ASR hasarını önlemek için yeterli değildir,
3. Yüksek kireç içeren mineral katkıları ASR hasarını artırabilir,
4. F sınıfı uçucu kül çimentonun kütleye %30'u kadar kullanıldığında genleşmeleri azaltmada etkili olmaktadır,
5. CaO içeriği %10'un üzerinde olan uçucu küller ASR'yi önlemede etkili değildir,
6. Düşük kireç içerikli (<%2) ve düşük alkali içerikli (<%3) doğal puzolanlar, çimentonun kütleye %15'i oranında kullanıldığında genleşmeleri azaltmada etkilidir,
7. Az miktarda silis dumanı ASR genleşmelerini azaltmada etkilidir,
8. Dış kaynaklı alkaliler ASR genleşmelerini artırır,
9. Farklı alkali miktarlarına sahip çimentoyla puzolanın farklı genleşme göstermesi beklenir.

AASHTO, betonda ASR hasarının önüne geçmek için aşağıdaki yöntemleri önermektedir [60].

1. Düşük alkalili veya katkılı çimento kullanımı,
2. Çimentonun kütlece minimum %15'i kadar F sınıfı uçucu kül veya %25'i kadar cüruf kullanımı,
3. Lityum katkısı (lityumum karbonat, nitrat, hidroksit, hidroksit mono hidrat tuzları gibi) kullanımı. Portland çimento birliği (PCA), reaktif agrega kullanıldığında beton üretiminde aşağıdaki önlemlerin alınması gerektiğini belirtir;
4. Normal veya katkılı çimento ile puzolan ve cürufun birlikte veya ayrı kullanılmasıyla bu kombinasyonun etkili olduğunun kanıtlanması,
5. Sadece katkılı çimento kullanımı ve bunun etkili olduğunun kanıtlanması,
6. Düşük alkalili çimento ile saha betonunda kullanılacak oranlarda karışım hazırlanarak etkili olduğunun kanıtlanması olarak söylenebilir.

Etkinliğin kanıtlanması iki yolla olabilir;

1. ASTM C1260 deneyi sonucunda oluşan genleşmeler %0.1'in altında ise,
2. ASTM C441 deneyi sonucunda, deney örneğinin genleşmesi %0.5~%0.6 Na₂O eşdeğer civarında düşük alkali içeren kontrol örneğinden az olması halindedir.

Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), ASR ve önlenmesi hakkında pek çok döküman yayınlamıştır. Bu raporlara göre;

1. Çimentonun alkali limiti %0.4 Na₂O eşdeğer olarak tercih edilmelidir,
2. Düşük kireç içeren uçucu kül tercih edilmelidir,
3. Silis dumanı kullanılırken topaklaşması önlenmeli, karışım içerisinde iyi yayılması sağlanmalıdır,
4. ASTM C1260 genleşme limiti %0.08 olarak önerilmektedir,
5. Tane boyutu küçük olan agregalar daha az genleşme göstermektedir [60].

RILEM ve İngiliz Standartlar Enstitüsü (BSI) agregaların reaktivite tespiti üzerinde deneyler yayınlamalarına rağmen önleme yöntemleri ile ilgili tavsiye

yayınlanmamıştır. Hollanda'da CUR-Recommendation 38, çimentonun kültece %25'i uçucu kül veya %50'si oranında cüruf kullanıldığında reaktif agregaların sorun yaratmadığını bildirmiştir [61]. Avusturalya'da Queensland Department of Main Roads (1999) tarafından yayınlanan şartnameye göre önerilmeli yol betonunda çimentonun %20'si kadar uçucu kül kullanılması gerekmektedir. Bu oranın üzerinde uçucu kül içeren diğer tüm betonlar için ayrıca deneye gerek yoktur. Uçucu külün maksimum toplam alkali içeriği %2, maksimum ortama salıverilen alkali içeriği ise %0.5 ile sınırlandırılmıştır. Bu sınırlar, cüruf için sırasıyla %1 ve %0.5'tir [60].

2.3.7. Alkali silika reaktivitesinin tarihsel geçmişi

1930'lu yıllarda, Kaliforniya'da bazı yapılardaki betonlarda beklenmedik genişleme ve çatlakların görülmesi kaygı yaratmıştır. 1930'ların sonlarına doğru, bu alanda çalışmalar yapan Stanton, genişlemelerin ve çatlakların çimentonun alkali içeriğine bağlı olduğunu ve sözü edilen yapılardaki hasarın alkali silis reaksiyonu sonucu meydana geldiğini saptamıştır. Stanton'un deneysel çalışmaları, hasarın sebebinin opal agregası ve yüksek alkalın çimentonun bir araya gelerek oluşturduğu genişlemeler olduğunu göstermiştir [62]. Stanton'un çalışmasının sonucu olarak, önemli yapılarda, çimentonun alkali içeriğinin kültece %0.6 ile sınırlandırılması şartı getirilmiştir. Çimentonun alkali içeriğinin sınırlandırılması, reaktif agregası kullanılması halinde hala kullanılan bir yöntemdir. Stanton'un çalışmasının yayınlanmasından kısa süre sonra 1941 yılında Blanks ve Meissner, Parker barajının betonunda oluşan çatlak ve bozulmaları incelemiştir. Araştırmacılar, betonda alkali silis reaksiyonu ürünü bulunduğunu ve reaktif bileşenlerin toplam agreganın %2'sini oluşturan altere andezit ve riyolit parçaları olduğunu belirtmiştir [63, 64].

Danimarka, Almanya ve İngiltere gibi soğuk iklimlerde betonda bozulmaya sıcaklığın etkisi ile oluşan kimyasal reaksiyonların neden olduğu endişe edildi ise de araştırmalar sonunda beton bozulma nedeni olarak alkali silika reaksiyonu yayınlanarak tüm dünyada tanınmıştır.

1974 yılında alkali agregası reaktivitesi konusunda faaliyet gösteren araştırmacıların katıldığı uluslararası toplantılardan ilki Danimarka'da yapılmıştır. Ardından pek çok

araştırmacının yayınlarının derlendiği konferanslar sırasıyla İzlanda (1975), İngiltere (1976), Amerika (1978), Güney Afrika (1981), Danimarka (1983), Kanada (1986), Japonya (1989), Londra (1992), Avusturalya (1996), Kanada (2000) ve Çin'de (2004) düzenlenmiştir.

Aşağıda bu konu ile ilgili yurtdışında ve ülkemizde yapılan bazı çalışmalara yer verilmiştir:

Ülkemizde, ASR'nin ilk hasarları, Karayolları 2. Bölge Müdürlüğü köprü mühendislerinin ön incelemeleri sırasında İzmir yöresindeki birçok köprüde geniş çatlakların gözlenmesi ile ortaya çıkmıştır. 1995 yılında, T.C. Karayolu Köprülerinin Korunması ve iyileştirilmesi çalışmaları projesi kapsamında, İzmir yöresinde hasar gören 5 köprünün (Naldöken, Turgutlu, Buca, Hilal II, Turan) inceleme çalışmaları Japon Jica firmasınınca üstlenilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, beton üretiminde kullanılan özellikle Gediz ve Nif nehri yatak ve teraslarındaki doğal kumların içerdiği reaktif silislerin (camsı riyolit, camsı riyolitik tuf ve çört) ASR'ye yol açtığı anlaşılmıştır. Bu durumda, Gediz ve Nif nehirleri yatak ve teraslarındaki doğal kumun kullanılmaması prensibi benimsenmiştir [65, 66].

A.Fernandez - Jimenez, F. Puertas, reaktif agrega kullanarak, yüksek fırın cürüf çimentolu harçların genleşmesini araştırmıştır. Araştırma sonuçlarını normal portlant çimentolu harçlarla yapılan deney sonuçlarıyla karşılaştırmış ve elde edilen sonuçlara göre yüksek fırın cürüflü çimentolu harçların alkali silis reaksiyonu nedeniyle genleşmeye uğradığını, ama benzer koşullar altında normal portlant çimentolu harçlardaki genleşmeden daha düşük hızda genleşmenin olduğu sonucuna ulaşmıştır [67].

L. Turanlı, F. Bektaş, P. J. M. Monterio, alkali silis reaksiyonu yayılımını minimize etmek için puzolonik madde özellikleri taşıması amacıyla kil tuğla kullanmışlardır. Bu amaçla yaptıkları deneyler sonucunda kil tuğlanın; çimento ile kısmi yer değiştirdiğinde ve ASR'den dolayı oluşan genleşmeyi durdurma amaçlı kullanıldığı zaman puzolanik malzeme olarak bir potansiyele sahip olduğunu gözlemlemişlerdir [68].

A. Mladenovic, J. S. Suput, V. Ducman, A. S. Skapin, hafif agregaların harçlar ve sıvalar için kullanıldığında alkali silis reaksiyonu hakkında önemli verilere ulaşılabileceğini düşünerek, dört hafif agrega (şişen vermikülit, şişen killer, şişen cam ve perlit) üzerinde alkali silis reaksiyonuna bağlı olarak çalışmalar yapmıştır. Hafif agregalar kullanılarak yapılan çimento kompozitlerinin içindeki alkali silis reaksiyonunun olası tehlikesinin araştırıldığı çalışmanın sonuçları; şişen vermikülit ve kilin alkali silis reaksiyonu için bir potansiyel tehlike sergilemediğini göstermiştir. Diğer taraftan, diğer iki camsı agregalar (şişen cam ve perlit), yüksek reaktiflik göstermiştir. Hızlandırılmış testten sonra camsı agregaların yapısında (dokusunda) ciddi bir bozulma olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, bu hafif agregaları içeren çimento kompozitleri üzerinde uzun dönemli bir negatif etki oluştuğunu gözlemiştir [69].

V. Jensen, 1949~1951 yılları arasındaki periyotta Norveç'te inşa edilen Elgester köprüsünde gözlenen beton ve çatlak genişlemesinin modelini ASR tarafından açıklamaya çalışmıştır. Özellikle köprünün batı yüzünde ASR reaksiyonlarının oluşumundan dolayı hasar oluştuğu gözlenmiş ve bunun üzerine yapılan kolon testlerinde mono silane emdirilmesi ile çok ümit verici sonuçlar elde edilmiştir. Krema kıvamında olan bu ürün, önemli bir derecede ASR'yi azaltmıştır. Bu çalışmada yaklaşık zeminden 1,5m kolon horizontal olarak delinmiştir. Mikro yapısal analizlerde cilanmış beton parçaları uygulanmış ve ince bölümlere floresan boyalar emdirilmiştir. Beyaz jel çökmesi hava boşlukları ve çatlakları, koyu kenarlar kaba agregalar bütün kolonlarda gözlenmiştir. Gözlenen yarık ve genişlemelerin çoğunlukla ASR nedeniyle olduğu sonucuna varılmış ve reaksiyon ürünleri içindeki kumtaşının aşırı bir şekilde kristallere benzer kriptokristaline kumtaşlarından oluştuğu gözlenmiştir [70].

R. H. Haddad, M. M. Smadi, alkali silis reaksiyonuna uğramış portland çimentolu betondaki aşırı genişleme ve çatlamanın engellenmesi amacıyla fiberin kullanımını araştırmış ve bu amaçla yaptıkları deneysel çalışmada, alkali silis reaksiyonuna göre portland çimentolu betonun aktif alkali silis reaksiyonunun genişleme kontrolündeki geciktirmeye fiberin katkıda bulunduğunu ve fiber kullanımının çatlaklardaki büyüklüğü sınırlandırıldığını saptamıştır. Polypropylene fiberlerin, düşük modüllü

elastik ve yüksek oranlı olanının, çatlamaya yüksek modüllü elastik pirinç kaplama çelik fiberlerden daha iyi karşı koyduğu sonucuna varmıştır [71].

Ö.Çakır ve F.Aköz üç farklı agrega için çimentoya %0, %30, %60 oranlarında yüksek fırın cürufu katılmış harçlarda, hızlandırılmış deneyler yaparak, sıcaklık, basınç ve nem artışının alkali agrega reaksiyonunu hızlandığı, cürufun ise yavaşlattığını görmüştür [72].

İ. B. Topçu, üç farklı renkte ve dört farklı miktarda atık camla harç çubukları üreterek, alkali-silis reaksiyonuna camların etkisini araştırmıştır. Beyaz, yeşil ve kahverengi camlardan beyaz camın en fazla genişmeye neden olduğunu ve cam agregaların tane çapının küçülmesiyle alkali silis reaksiyonunun hızlandığını gözlemiştir [73].

Topal vd. reaktif agrega boyutunun ve yüzey köşeliliğinin alkali-silis reaksiyonu üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu amaçla, reaktif olduğu bilinen Gediz nehri yatağı doğal agregasından aldıkları örnekler üzerinde çeşitli deneyler yapmışlardır. Deney sonuçları tek boyutlu agrega kullanımının alkali silis reaksiyonu genişmelerini arttırdığını göstermiştir. Köşeliliğin alkali silis reaksiyonu genişmeleri üzerindeki etkisi ise seçilen her agrega grubunda tam olarak belirlenememiştir [74].

Sağlık vd. Deriner Barajı ve Hes İnşaatı kütle betonunda kullanılması planlanan agregalarda alkali-silis reaksiyonundan dolayı oluşacak hasarları azaltma ve önlemeye yönelik bir deneysel çalışma yapmıştır. Deneysel çalışmada biri yaklaşık %20, diğeri ise %30' un üzerinde reaktif silis içermekte olan agregalar, çimento yerine farklı yüzdelerde ikame edilen F sınıfı uçucu kül ile hazırlanan harç çubukları üzerinde yürütülen deneysel çalışma sonucunda kırmataş ince agrega ile en az %25 ve doğal şekillenmiş ince agrega ile en az %35 civarında uçucu kül kullanımı ile alkali-silis reaksiyonunun büyük ölçüde önlendiği tespit edilmiştir [6].

M. Korkanç, ve A.Tuğrul, farklı bileşim ve dokusal özelliklere sahip Orta Anadolu'da yaygın olarak kullanılan Niğde yöresi bazaltlarını reaktivite açısından değerlendirilmiştir. Bazalt agregaları ile yapılan alkali silis reaksiyon deneylerinde,

asit orta karakter sunan bazaltlar ile matriksinin tamamı volkan camından oluşan bazaltik andezitler, yapılan araştırma ve gözlemlere göre, potansiyel olarak düşük reaktivite gösteren agregalardır. Bu tür bazaltların beton agregası olarak kullanılması durumunda, düşük alkaliniteye sahip çimentoların veya beton içerisine puzzolanik maddelerin katılmasının uygun olacağı önerilmiştir [75].

İ. H. Zarif, vd. İstanbul'daki dolomitik kireçtaşları üzerinde bir inceleme yapmıştır ve dolomitik kireçtaşlarının zararsız agregalar oldukları ve imento alkalinitesi fazla olan çimentolar kullanılsa bile bu agregaların beton üretiminde kullanılabileceği sonucuna varmışlardır [76].

A. Binal, harçlarda en fazla genleşmeye neden olan ve literatürde pesimum oranı olarak adlandırılan tüm agregada içindeki reaktif agrega oranını araştırmak için çeşitli deneyler yapmış, opal yumrusu, rt, kalsedon yumrusu, andezit ve bazalt türü beş farklı reaktif agreganın alkali reaktivitelerini araştırmıştır. Opal türü agregalar çevresinde haleler şeklinde alkali silis jel gelişirken, rtte kılcal çatlaklar boyunca, kalsedonda ise lif lif ayrılmalar şeklinde alkali silis jel gelişimlerini saptamıştır [77].

Son yıllarda lkemizde ASR hasarlarının betonda oluşmadan önce nlenmesine yönelik araştırmalar önem kazanmıştır. Hızlandırılmış harç çubuğu metodu uygulanarak reaktif olduğu belirlenen agreganın çeşitli mineral katkılar veya bunların kombinasyonları ile lityum tuzları kullanımının ASR genleşmelerine etkisi incelenmiştir [78, 79, 30, 32].

K.Yılmaz ve G.Sert, Sakarya bölgesindeki bazı agregada taş ocaklarından alınan kırma taş ve kırma kum agregada örneklerinin alkali silika reaktivitesine ilişkin özelliklerini incelemişlerdir. Bölge genelinde kullanılan kırma kum ve kırma çakıl agregalarında ASR oluşmadığını bulmuşlardır [80].

BÖLÜM 3. MİNERAL KATKILARIN ALKALİ SİLİKA REAKSİYONUNA ETKİSİ

3.1. Alkali Silika Reaksiyonunu Azaltmada Mineral Katkılarının Rolü

Alkali silis reaksiyonu mekanizmasını göz önünde bulunduracak olursak, reaksiyonun oluşmasını ve/veya betonda oluşan reaksiyon ürününün şişerek genleşme yaratmasını engellemek gerekmektedir. Bu nedenle, öncelikle ortamda hasar oluşturabilecek parametrelerin sınırlandırılması önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında üçüncü bölümde ASR'yi etkileyen faktörler kısmında bu parametrelerin nasıl sınırlandırıldığına değinilmiştir. Özetleyecek olursak;

1. Betondaki alkali miktarının sınırlandırılması (çimento alkalinitesinin belirli bir seviyenin altında tutulması veya betonun toplam alkali içeriğinin belli bir sınırın altına düşürülmesi),
2. Reaktif olmayan agreganın seçimi veya iyileştirilerek kullanımı (reaktif olmayan agregaya ile karıştırılarak kullanımı gibi),
3. Betonun dışarıdan nem almasını önlemek (geçirimliliği düşürerek veya koruyucu önlemler alarak).

Yukarıda bahsedilen önlemler çoğu zaman tek başına yeterli olmamaktadır. Günümüz beton teknolojisinde, gerek normal portland çimentosu dışındaki bağlayıcılar, gerekse beton özelliklerini iyileştirici kimyasallar olsun, betona dışarıdan eklenen katkıları olmadan beton tasarımından bahsetmek neredeyse imkânsızdır. Dolayısıyla bu katkıların ASR'ye etkisinin araştırılması önem kazanmıştır. Özellikle mineral katkıları veya ilave bağlayıcı malzemeler adı verilen puzolanik özellik taşıyan beton bileşenlerinin pek çoğunun ASR genleşmelerini azaltıcı etkisi olduğu bilinmektedir. Puzolanik malzemelerin ASR'yi önlemedeki asıl mekanizmasının boşluk çözültüsü alkalinitesini düşürmek olduğu kabul edilmektedir. HHÇD, dışarıdan sınırsız alkali girişi sağlayan bir deney metodu olduğundan bu

metotla mineral katkıların davranışının değerlendirilmesi mümkün gözükmemektedir. Ancak araştırmacılar, bu deney koşullarında mineral katkıların 14 gün boyunca boşluk çözültisi alkalinitesini düşürmede başarılı olduğunu belirlemiştir. Ortamdaki aşırı alkali yüküne rağmen mineral katkıları, ASR genleşmelerini önlemede etki göstermiştir [81, 82]. Farklı araştırmalar sonucunda, 16 günlük periyot sonunda %0.1 gibi bir değer baz alındığında, HHÇD'nin mineral katkıların etkinliği konusunda beton prizma metodu ile benzer sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Bu sebeple, 2 yıl gibi bir bekleme süresinin olmadığı durumlarda bu metodun kullanılması tavsiye edilmektedir. Bu deney, beton prizma yönteminden daha şiddetli koşullara maruz bırakılan numuneler üzerinde uygulandığından, mineral katkıların kullanım oranları hakkında daha koruyucu değerler verebilmektedir [83-86].

Mineral katkılarla ilgili Kanada standardı CAN/CSA A23.5 mineral katkıların etkinliğini ölçmek üzere hızlandırılmış harç çubuğu metodunu modifiye etmiştir. Standart, mineral katkı kullanılmadan hazırlanacak kontrol karışımında agreganın en az %0.3 gibi bir genleşme değeri vermesini şart koşmaktadır. Buna göre, deney süresi sonunda kontrol numunesi genleşmelerini %0.1 değerinin altına düşüren minimum katkı miktarı, kullanılacak "emniyetli miktar" olmaktadır. Araştırmacılar, mineral katkı kullanılırken yayılma değeri yerine su/çimento oranının sabit tutulması gerektiğini belirtmektedir [86, 87].

Hızlandırılmış harç çubuğu metodu, kimyasal katkıların etkinliğini ölçmek amacıyla da kullanılmaktadır. Stark, vd. bu metodun uygulanışı esnasında lityum tuzlarının harç çubuklarının dışına sızdığını belirlemiştir [88]. Bu sebeple, kür suyuna da aynı miktarda lityum tuzu katmıştır. Ancak, Barringer pratikte lityum tuzunu dış koruyucu olarak kullanmanın mümkün olmadığını belirleyerek deneylerini sadece 1N NaOH çözültü ortamda gerçekleştirmiştir [84]. Yukarıda bahsedilen tüm araştırma sonuçları, genleşme limit değerini %0.1 olarak tanımlamaktadır.

Beton yapıların ömrünü artırmaya odaklanarak, betonda çimentoya tamamlayıcı mineral katkı malzemeleri kullanmak ilgi odağı olmuştur. Mineral katkıları, tek başına bağlayıcı olarak tanımlanmayan, ince öğütüldüğünde ve nemli ortamda

çimento hidratasyonu sonucu açığa çıkan kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcı özeliğine sahip bileşenler oluşturan silisli veya silisli alüminli malzemelerdir. Hanna puzolan kullanımının ASR genleşmelerini azalttığını laboratuvar çalışmalarıyla kanıtlayan ilk araştırmacıdır [89]. Rogers argilit ve grovak içeren reaktif agreganın kullanıldığı Lower Notch Barajı'nda %20 oranında uçucu kül ile oluşabilecek ASR çatlaklarının önlendiğini rapor etmiştir [90]. Bu araştırma, yüksek alkalin çimento ve reaktif agrega varlığında betonda oluşabilecek ASR hasarının mineral katkı kullanımıyla önlendiğine dair ilk katalog bilgi niteliğindedir [40].

Thomas, vd. ise reaktif agrega ve mineral katkı kullanılarak inşa edilen pek çok barajın 50 yıldan beri mükemmel koşullarda işlevlerine devam edebildiklerini belirtmektedir [91, 92].

Puzolanik veya mineral katkıların kullanılmasının betonun durabilitesini ve ASR etkilerine karşı direncini artırması bakımından avantajlara sahip olduğu düşünülmektedir. Mineral katkıların ASR genleşmesini azaltmasında hangi mekanizmanın baskın olduğu konusunda tam bir fikir birliğine varılamamıştır. Fakat bazı ana teoriler gözden geçirilmiştir:

1. Katkı maddeleri, portland çimentosundan daha az reaktif oldukları ve daha düşük oranlarda alkali açığa çıkardıkları için seyreltici görevi görmektedir. Katkı içeren karışımlar, sadece çimento içeren karışımlara nazaran daha yüksek efektif su/çimento oranına sahiptirler ve bu alkali içeriğinin daha da seyrelmesine yol açar. Bazı mineral katkılarda ise çimentodan daha fazla çözünebilen alkali bulunmaktadır. Bu tür katkıları kullanıldığında yararlı etki görülmeyebilir.
2. Mineral katkıları, boşluk ve agrega çimento ara yeri iyileştirmesi yaparak daha düşük geçirimsizliğe yol açmaktadır. Bu sayede, alkalilerin reaktif agregaya göçü yavaşlamaktadır.
3. Katkı maddeleri, çimento hamurundaki Ca(OH)_2 içeriğini azaltarak pH'ını düşürmektedir. Ancak Glasser, pH'ın Ca(OH)_2 , C-S-H ve boşluk çözeltisi arasındaki denge ile belirlendiğini ve bunların bağımsız olduğunu belirtmiştir [28].

4. Katkı maddesi içeren sistemler, alkalileri sadece portland çimentosu ile hazırlanan karışımlardan daha güçlü bir şekilde bağlarlar. Dolayısıyla genleşme miktarını azaltırlar.

Chunxiang, vd. tarafından, uçucu kül ve cürufun alkalilerle agregalar arasındaki kimyasal reaktiviteyi azalttığı gözlemiştir [93]. Ayrıca, katkıların çimento yerine kullanım yüzdesi arttıkça reaktivitede azalma da artmaktadır. Betonun veya harcın zarar görmesini etkileyen en önemli faktör, reaktif agregalar ile alkaliler arasındaki kimyasal reaksiyonun şiddetidir. Monteiro, vd., Prezzi, vd. tarafından öne sürülen çift tabaka teorisi yardımıyla mineral katkıların etkinliğini açıklamıştır [94]. Mineral katkıların alkali içerikleri önem taşımaktadır ve yüksek miktarda alkali içeren mineral katkıların etkili olabilmeleri için betonda yüksek oranda kullanılmaları gerektiği araştırmalarla kanıtlanmıştır [95]. Dahası, mineral katkının aşırı miktarda alkali içermesi halinde çok yüksek oranlarda kullanılsa bile etkili olamadığı bilinmektedir. Mineral katkıların alkalileri çözeltiye zamanla salıverilir, ancak bunun bir kısmı ASR için mevcut olarak kalmaya devam ederken, alkalilerin çoğu çimentonun hidratasyonu ve puzolanik reaksiyon gibi kimyasal reaksiyonlara katılırlar [30]. Alkali içeriği çimento ve mineral katkıları için elde edildikleri hammadde ile belirlenmektedir. Mineral katkının etkinliği kimyasal ve fiziksel özelliklerine, agreganın reaktifliğine ve portland çimentosunun alkali içeriğine bağlıdır. Genelde yüksek miktarda ve oldukça reaktif silis içeren agregalar ile daha yüksek oranda puzolan kullanılması durumu ortaya çıkmaktadır.

3.1.1. Doğal puzolanların etkisi

“Puzolan” terimi gerçekte şiddetli yanardağ patlamaları sonucu oluşan camsı piroklastik malzemeler için kullanılmaktadır. Literatürde uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi yapay malzemeler için de “yapay puzolan” terimi zaman zaman kullanılmaktadır. Pişirilmiş kil, pişirilmiş şeyl ve zeolit gibi betonda kullanılan doğal malzemeleri de “doğal puzolanlar” olarak gruplandırmak mümkündür. Puzolanların, genleşme yaratan reaksiyonlara karşı etkili oldukları bilinmektedir. Mindess vd. kireç puzolan reaksiyonunda boşluk çözeltisi pH'ının düşmesi sonucu puzolanların etkili olduğunu öne sürmüşlerdir [96]. Ayrıca, reaktif

puzolanların alkalilerle reaksiyona girerek alkalileri tükettiklerini ve genişleme yaratmayan ürünler oluşturduklarını belirtmiştir. Mehta, puzolanik Santorin toprağı ile yaptığı hızlandırılmış genişleme deneylerinde çimento yerine %10, %20 ve %30 oranlarında kullanmıştır. Referans numunesine kıyasla, %30 Santorin toprağı içeren örneğin genişmesi %0.7 azalarak %0.15 değerine düşmüştür [97].

Andriolo ve Sgarboza, doğal reaktif agrega ile harç çubuğu metodu uyguladıkları harç örneklerinin %0.18 olan genişmelerinin, çimento yerine %15 pişirilmiş kil kullandıklarında, %0.02 mertebesine düştüğünü belirlemiştir [98]. Bektaş, vd. geliştirilmiş perlit tozu ve doğal perlit tozunun etkisini, hızlandırılmış harç çubuğu deney metoduna göre incelemiştir. Araştırmada, bir tip yüksek reaktif ve bir tip yavaş genişen tipte agrega kullanmıştır. Genleştirilmiş perlit tozu ve silis dumanı, yüksek reaktif agregada %16 oranında kullanıldığında, yavaş genişen agregada ise %4 ve üzeri oranlarda kullanıldığında genişmeleri limit değerinin altına düşürmüştür. Doğal perlit tozu ise yavaş genişen tipte agrega ile %16 ve üzeri kullanım oranlarında benzer etkiyi vermiştir [113].

Naiqian, vd, doğal zeolitin ASR genişmesi üzerindeki etkisini incelemiştir. Araştırmada, iki çeşit reaktif sentetik agrega (yüksek ve orta reaktiviteli) ve bir çeşit potansiyel reaktif doğal agrega kullanılmıştır. Japonya'nın farklı yörelerinden elde ettikleri iki farklı doğal zeolit tozunun klinoptilonit içerdikleri x-ışını difraktometre ile belirlenmiştir [99].

Zeolitler, özgül yüzey alanları 2510, 5280, 6860 ve 8820 cm²/g olan dört farklı incelikte öğütülmüştür. Kullanılan tek tip çimentonun alkali içeriği NaOH çözeltisi yardımıyla ayarlanmış ve dökülen harç çubukları 38°C'de kürlenerek 180 günlük genişleme ölçümleri alınmıştır. Araştırmanın sonuçları Tablo 3.1'de derlenmiştir. Deneyler sonucunda ASR sebebiyle oluşan genişmenin toplam alkali miktarı ve agrega reaktivite seviyesinin yanısıra katkı maddesinin dozajına ve inceliğine bağlı olduğu belirlenmiştir. Diğer mineral katkılarla kıyaslandığında, doğal zeolit tozunun uçucu kül ve cüruftan daha iyi performans gösterdiği, ancak, en iyi performansı silis dumanının verdiği belirtilmiştir [99].

Tablo 3.1. Zeolitin inceliğine göre kullanım dozajları [99]

Zeolit Özgül yüzey alanı, cm^2/g	Yüksek reaktiviteli agrega için gerekli dozaj	Orta reaktiviteli agrega için gerekli dozaj
2000-3000	~ %40	~ %30
5000-7000	~ %30	~ %20
> 10000	~ %15	Bilinmiyor

Naiqian ve Tingyu, doğal zeolit tozunun doygun $\text{Ca}(\text{OH})_2$ çözeltisinin pH'ını etkin bir şekilde düşürdüğünü gözlemlemiştir. Çözeltinin pH'ı artan zeolit tozu miktarı ve zamanla azalmaktadır. Doğal zeolit tozunun inceliği arttıkça pH'daki azalma daha fazladır. Ayrıca, kullanılan zeolit tozu miktarı arttıkça alkali iyon konsantrasyonları da azalır. Alkali iyon konsantrasyonlarındaki azalma üç faktöre bağlıdır; bunlar iyon değişimi, adsorblanma ve puzolanik reaksiyondur. Doğal zeolit tozunun kristal yapısı, camsı yapıdaki uçucu kül ve yüksek fırın cürufuna nazaran alkaliniteyi azaltmada daha etkilidir. Bunun ana nedeni, iyon değişimine ek olarak, doğal zeolit tozunun gözenekli yapısının pek çok alkali iyonunu adsorplayabilmesidir. Doğal zeolit tozunun inceliği arttıkça yapısı daha açık bir hal almakta ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'ye doygun çözelti ile doğal zeolit tozu ara yer alanı artmaktadır. Bu sebeple alkali iyonlarının adsorblanması artmaktadır. Doğal zeolit tozunun miktarı arttıkça (OH^-) miktarı da azalmaktadır. Doğal zeolit tozu içermeyen harç numunelerinin genişmesi %0.51 iken %30 oranında doğal zeolit tozu kullanıldığında genişleme %0.10'a düşmüştür. Sonuçlar, alkalinitedeki azalma ile genişlemedeki azalmanın bağlantılı olduğunu göstermektedir [100, 30].

3.1.2. Uçucu külün ASR'ye etkisi

Uçucu küllerin ana kimyasal bileşenleri; silis (SiO_2), alümin (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3)'tir. Uçucu küller, santralin yakma kabiliyeti ve kullanılan yakıtta göre farklı miktarlarda kalsiyum oksit (CaO), magnezyum oksit (MgO), kükürttrioksit (SO_3) ve yanmamış kömür parçacıkları (karbon, (C)) içerirler. Uçucu kül puzolanik özellik gösterir. Yüksek oranda (%10'dan fazla) CaO içeren uçucu kül puzolanik özelliğin yanısıra bağlayıcı özellik de gösterir. Uçucu küller, katkılı çimento üretiminde kullanıldığı gibi betonda belirli oranlarda çimento veya ince agrega yerine de

kullanılmaktadır. Uçucu küller, taze betonda sabit su/çimento oranında işlenebilirliği arttırır. Sertleşmiş betonda ise dayanım kazanma hızını yavaşlattığından erken yaşlardaki dayanımı düşürürken ileri yaşlardaki dayanımı arttırır. Ayrıca, puzolanik özeliği sayesinde oluşturduğu ikincil C-S-H'larla yapıyı daha yoğun hale getirir, agrega-harç ara yerini iyileştirir ve bu sayede betonun geçirimsizliğini azaltır. Bu sebeple, çeşitli kimyasal ve fiziksel etkilere karşı betonun durabilitesi artar. Uçucu küllerin çeşitliliği sebebiyle araştırmacılar ASR'ye olan etkileri hakkında çoğu zaman çelişkili görüşler öne sürmüşlerdir. Çelişkilerin sebebi, araştırmalarda kullanılan uçucu küllerin ve çimentoların kimyasal ve mineralojik özelliklerinin ve agregaların reaktivitelerinin farklı olmasıdır.

Örneğin, Nixon, vd. ve Stark, yavaş reaksiyona giren agregalar için çimentonun kütlece %20-30 oranında uçucu külle yer değiştirmesi halinde ASR sebebiyle betonda oluşabilecek genleşmelerin azaldığını belirlemişlerdir [101-103]. Ancak Hobbs, laboratuarda yaptığı deneysel çalışmada yüksek reaktiviteye sahip opali, agrega olarak kullanmış ve çimento ile en yüksek genleşmeyi veren kombinasyonu sağlamıştı ki bu pratikte imkânsızdır [104]. Böyle durumlarda, en etkili uçucu küller bile genleşmeyi zararsız seviyelere düşürememiş, buna rağmen yine de genleşmelerde kayda değer düşüşler görülmüştür. Bu tür deneylerin sonuçları pratikte uygulanamamaktadır. Hızlandırılmış harç çubuğu metodu diğer genleşme deneylerine alternatif olmaktadır. Bu deney yardımı ile mineral katkıların etkililiği hakkında bilgiler rapor edilmektedir.

Davies ve Oberholster, çalışmalarında uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı kullanmışlardır [105]. HHÇ deneyinde belli bir agrega için kullanılacak maksimum mineral katkı miktarı bulunmaktadır. Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi (1 M NaOH, 80°C) uçucu külün ASR üzerindeki uzun süreli etkisinin tahmininde kullanılabilir. HHÇD metodu, boşluk çözeltilisi alkali içeriği 1M NaOH veya altında değerlerde olan betonlara uygulanabilir [106, 107].

Stark, vd. NBRI hızlandırılmış harç çubuğu deneyine tabi tuttıkları üç farklı uçucu kül ve bir çeşit yüksek fırın cürufunu üç farklı agrega için buldukları sonuçları ve yorumları yayımlamışlardır [88]. Deney sonuçlarından da görülmüştür ki, kullanılan

uçucu kül oranı arttıkça genişmedeki azalma da artmaktadır. Hızlandırılmış deney metodunun ASR hasarlarını minimuma indirmede kullanılacak mineral katkıların miktarını belirlemede güvenilir ve hızlı bir metot olduğu, farklı kaynaklardan alınan agregalarla, farklı kimyasal ve mineralojik özelliklere sahip çimento ve mineral katkıların davranışlarının bu metotla saptanabildiği söylenebilir.

Portland çimentosu kullanıldığında uçucu külün çimento ile kısmi yer değişimi toplam hidroksit iyon konsantrasyonunu azaltmada etkisiz olmaktadır. Ancak, yüksek alkalin çimento kullanıldığında toplam hidroksit iyon içeriği azalmaktadır ve bu azalma miktarı, yüksek fırın cürufu sebebiyle oluşan azalma miktarından fazladır [17].

Ayrıca, uçucu kül ve cürufun harç çubuklarındaki genişmeyi erken yaşlarda (örneğin 28 günde) azalttığını gözlemlemişlerdir. Bu durumda, çimento hamurunun puzolanik reaksiyon sonucu yoğunlaşmış olması sebebiyle genişmeyi azaltmış olması ihtimali yüksek değildir. Çünkü uçucu külün ve cürufun hidratasyon hızı çimentonunkinden düşüktür. Uçucu külün (F sınıfı) alkali silis reaksiyonunu azaltması ve hatta önlemesi aşağıdaki mekanizmalarla açıklanabilmektedir;

1. Çimento uçucu kül reaksiyon ürünü, sadece Portland çimentosunun reaksiyonu sonucunda oluşan kalsiyum silis ürününden daha düşük $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ (C/S) oranına sahiptir. Bunun yanında kalsiyum silis hidrate (CSH) jelinin alkalileri bağlama kapasitesi daha yüksektir ve sonuçta beton boşluk suyunun pH'ı azaltılmış olacağından alkali silis reaksiyonu önlenir.
2. Uçucu külün puzolanik reaksiyonu ortamdaki kalsiyum hidroksitle ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reaksiyona girip çimento pastasında daha fazla CSH meydana getireceğinden daha sıkı bir mikro yapı oluşacak ve alkali iyonlarının difüzyonu ve dolayısıyla reaksiyona girmeleri zorlaşacaktır. Bunun diğer bir faydası ise betonun daha az geçirgen olması nedeniyle ortama rutubet girişinin önlenmesidir.

3.1.3. Yüksek fırın cürufunun ASR'ye etkisi (YFC)

Pik demirinin elde edilmesinin ardından kalan kül yüksek fırın cürufu olarak adlandırılmaktadır. YFC ve çimento bileşimi betonunun geçirgenliğini azaltmakta ve kirecin değiştirilen rolü, CSH aşamasının C/S oranında değişimler, CSH aşamasında alkalilerin tuzağı, puzolanik aktivitesi, alkali silika reaksiyonunu engelleme etkisini içermektedir.

Yüksek fırın cürufunun (YFC) bağlayıcı madde olarak betonda kullanımı, istenilen özelliklere bağlı olmak üzere toplam bağlayıcı maddenin %20'si ile %80'i arasında değişebilmektedir. Yüksek alkalin portland çimentosu ile yüksek fırın cürufunun kısmi yer değişiminin ASR sebebiyle oluşan genleşmeleri önlemedeki etkinliği ile ilgili ilk araştırma 1950 yılında Cox tarafından yapılmış ve bu konuda günümüze değin pek çok araştırma yayımlanmıştır [16].

Kanada Standardı CSA 23.1 Ek B, ASR'nin kontrolü için %50 oranında çimento yerine kullanıma izin vermektedir. Ancak yapılan araştırmalar az reaktif agregalarda daha az miktarda yüksek fırın cürufunun etkili olabildiğini göstermektedir [11]. Thomas ve Innis, reaktif silisli kireçtaşı ile beton prizma deneyi (CSA A23.2-14A) uygulamış ve %50 oranında cüruf kullanımının standarttaki 24 aylık genleşme sınır değeri olan %0.04'ün altında kaldığını belirtmiştir. Daha az reaktif agrega olan grovak içeren çakıl ile %35 oranında yüksek fırın cürufu kullanımı halinde genleşme kritik sınırın altına düşmektedir. Her iki agrega için de kullanılan çimentonun eşdeğer Na₂O miktarı kütlece %1.25'tir [86].

1989'da Ontario'da Magpie Nehri'nde yapılan çalışmalarda bazı baraj ve elektrik santrallerinin yapımında yavaş genleşen kaba agreganın kontrol altına alınması için çimento yerine %50 oranında YFC kullanılmıştır. 1996 yılında ise bu yapıların yakınındaki normal portland çimentosu ile yapılmış aynı yaştaki karayolu köprüsünde çatlaklar görülürken sözü geçen yapılarda ASR sonucu oluşanlara benzer çatlakların görülmediği gözlenmiştir [108]. YFC'deki alkaliler camsı fazlarda bağlı bulunmakta ve Portland çimentosuna nazaran daha yavaş bir şekilde ortama salıverilmektedir. YFC'nin toplam alkali içeriği (asitte çözünebilir alkali) kütlece

%0.3 ile %2.6 eşdeğer sodyum oksit değerleri arasında değişmektedir. Barlow ve Jackson (1988), üç değişik YFC üzerinde yaptıkları araştırmada YFC mevcut alkali içeriklerinin toplam (asitte çözünebilir) alkali içeriklerinin kütlece %39'u ile %63'ü arasında olduğunu bulmuşlardır [109].

3.1.4. Silis dumanının ASR'ye etkisi (SD)

Son yıllarda SD'nın beton katkı maddesi olarak kullanımında faydalı bileşen olduğu doğrulanmıştır. SD'nın kullanımında artan su ihtiyacı için süper akışkanlaştırıcı uygun dozajda kullanıldığında silis dumanının etkisi ile daha dayanıklı ve geçirimsiz beton elde edilmektedir. Bu malzemenin silis içeriği %85 ile %98 arasında değişmektedir. Kimyasal yapısındaki ikincil bileşenler, karbon, (yanmamış kömür artığı), demir oksit (Fe_2O_3), alümina (Al_2O_3), magnezyum oksit (MgO) ve alkaliler (Na_2O ve K_2O)'dir. Yapısında fazla miktarda SiO_2 bulundurması ve çok ince partiküller halinde olması sebebiyle üstün puzolanik özelliklere sahiptir. Silis dumanının amorf halde bulunan silis içeriği, çimento yerine kullanıldığında beton henüz taze haldeyken çimentonun alkalileriyle reaksiyona girer. Bu reaksiyonun beton taze iken hızla oluşmasının sebebi, silis dumanının inceliğinin çok yüksek olmasıdır. Yeterli miktarda silis dumanı kullanıldığında, beton gerekli dayanımı kazanmadan önce çimento ve silis dumanı tarafından ortama salıverilen sodyum ve potasyum iyonlarının büyük kısmı reaksiyon esnasında tükenir. Betonun dayanım kazanmasından önce gelişen bu reaksiyon zararlı genleşmeler ve çatlaklara yol açmaz. silis dumanını ASR üzerindeki etkisi, kimyasal kompozisyonuna (SiO_2 ve alkali içeriğine), kullanım yüzdesine, çimentonun tipi, alkali içeriği ve inceliğine bağlıdır.

Olafsson, ASTM C227'nin modifiye versiyonunu uyguladığı araştırmalarında püreksi ince agrega olarak kullanmış ve silis dumanı gibi yüksek yüzey alanına sahip puzolanlarda düşük oranlarda kullanımı yararlı olabildiğini gözlemlemiştir [110]. Silis dumanı, İzlanda'da 20 yılı aşkın süredir çimentoda katkı olarak kullanılmaktadır. 1981-1983 arasında yapılmış binalardan alınan karotlar incelendiğinde %5 oranda silis dumanı ve reaktif agrega ile yapılmış bu betonlarda

jel oluşumunun çatlamaya yol açmayacak kadar az miktarda olduğu belirlenmiştir [136].

Silis dumanı harç ve beton numuneler içinde her zaman ince bir toz halinde dağılmış olarak bulunmamaktadır. Sertleşmiş betondaki silis dumanının bir kısmının topaklaşarak kaldığı bilinmektedir. Yoğunlaştırılmış silis dumanının hacimsel yoğunluğu çok fazla olduğunda beton içinde tamamen yayılması zorlaşmaktadır. Bu topaklar aynen reaktif agrega gibi davranarak sertleşmiş betonda çimento alkalileri ile reaksiyona girebilirler.

Marusin ve Shotwell tarafında verilen rapor da silis dumanının yumrularının (topakları) kurşunlar gibi betonu çatlatıyor olduğu ilişkilendirilmiş yayılma ile silikon jeli (ASR) biçimlendirmek için çimento alkalileri ile benzer reaktif topaklar arası etkileme gözlenmiştir. Bunun sonucunda betonda erken yaşlarda gerilme çatlamaya özellikle de bozulmaya yol açmaktadır. ASR hasarı, özellikle betonda geniş alanda topaklanan zerrelere, reaktif agrega ile reaksiyona girerek geniş alkali silika jelleri oluşumuyla çatlaklar meydana getirerek oluşmaktadır [111]. Pettersson tarafından 10% ikame silis dumanı ile bir yüksek alkali çimentosu ve kullanıldı. Üretilmiş harçta görülen büyük yayılmalar da oluşan tipik ASR çatlağı sergilemiş, açık bir biçimde kaba zerrelerden geliştiren ASR jellerinin kanıtları bulunmuştur [137].

ASR'de silis dumanının gerçek etkileri de genellikle uygun raporların görüntüsünde çoğunlukla gözardı edilir. Betonda silis dumanı ikame edilerek kullanımı, basınç dayanımını artırır, kanama, segregasyon, geçirimsizlik ve hidrasyon ısısını azaltır, ayrıca buz çözücü tuzlar, sülfatlar gibi çeşitli dış etkilere ve alkali agraga reaksiyonuna karşı durabiliteyi artırır. Ancak, inceliği sebebiyle su isteğini arttırması, plastik büzülme sebebiyle çatlamaya yakın olması gibi etkiler kullanım esnasında gözönünde bulundurulmalı ve gerekli önlemler alınmalıdır [30].

Silis dumanı, betonda % 20 üzerinde kullanıldığında ASR sıkıntısını önler. Fakat silis dumanının %10'un üzerinde kullanımı betonda istenmemektedir. Bu nedenle ASR'yi önlemediği bilinmektedir.

3.1.5. Metakaolinin ASR'ye etkisi (MK)

Yüksek reaktivite metakaolin (HRM) kaolinitik kil saflaştırılmış ısıtılmış işlem gören üretilen bir mamuldür. Üretim sırasında, yüksek saflıkta kaolin kili kullanılarak ısıtılır, yapısının yeniden kristalleşmesine neden olmadan, sulu kaolin parçacık dehidroksilat için termal aktivasyon kontrol edilir. Sonuçta neredeyse % 100 reaktif kimyasal ek çimentolu ürünler oluşturmak için kalsiyum hidroksit ile birleştirecek olan metakaolin ve reaktivitesi saflığına bağlıdır. Kaolin ve ısıtılmış işlem koşullarının yüksek reaktivite metakaolin daha az aktif ve bu malzemenin ayırt etmek için kullanılıp, karışık kalsine killeri ve bazen de bazı kaolen bileşeni dâhil edilmesi nedeniyle metakaolin olarak anılacaktır (Tablo 3.2).

Tablo 3.2. Metakaolin kimyasal analizi

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₃	LOI
52.1	45.3	0.60	1.64.	0.05	0.21	0.16	0.10	0.51

Ramlochan, vd. metakaolinin etkisini incelemek üzere bir dizi deney yapmıştır. Beton prizma deneylerinde %1.02 olan Na₂O eşdeğeri içeriği, karışım suyuna NaOH eklenerek %1.25'e çıkarılmıştır. Harç çubuğu deneylerinde ise alkali içeriği %0.98 Na₂O eşdeğeri olan yüksek alkaline çimento kullanılmıştır. Hamur numuneleri üzerinde yapılan boşluk çözeltisi analizlerinde, metakaolin kullanılan numunelerde kontrol numunesine kıyasla OH⁻ miktarında azalma belirlenmiştir. Metakaolinin, harçlarda %15 ve betonda %20 oranında kullanılması kontrol genişmesi %0.25 civarındaki Spratt agregası genişleme sonuçlarını limit değerinin altına düşürmüştür. Daha az reaktif olan (kontrol genişmesi %0.20) Sudbury agregasında ise %10 oranında metakaolin kullanımı da etkili olmuştur [87].

Balogh, A., yaptığı çalışmada HRM metakaolin orta düzeyde kullanımı (8 ±% 12) önemli ölçüde ASR zararlı genişleme riskini azalttığını bulmuş ve aşağıdaki sonuçları özetlemiştir [112].

1. % 8 ile % 12 arasında (HRM) metakaolin kullanılması ile önemli ölçüde klorik iyonu difüzyon katsayısı alçaltılmıştır.

2. Azalma düzeyi, kontrol örnekleri ile karşılaştırıldığında sırasıyla % 8 ve % 12 H ile HRM karışımları için ortalama% 50 ve % 60 olmuştur.
3. Toplu difüzyon değerleri klorür marufiyetinin arttığı dönemlerle (iyileştirmek) azaltmak ve HRM yararlı desteklemeye devam etmektedir.
4. Görünen yayılma katsayısı olarak zaman bağımlı indirgeme HRM seviyelerinin yükselmesi ile daha belirgin olduğu görülmektedir.

BÖLÜM 4. ALKALİ SİLİS REAKTİVİTESİNİN TESPİTİ İÇİN DENEY YÖNTEMLERİ

4.1. Alkali Silika Reaksiyonu Tespitinde Uygulanan Deney Metotları

Tüm dünyada agregaların, harçlar ve betonların ASR yönünden değerlendirilmesi için tek bir metot bulunmadığından çeşitli ülkelerde uygulanan metotları bilmekte fayda vardır. Öncelikle ASTM tarafından kabul görmüş metotlara daha sonra literatüre girmiş bazı diğer metotların neler olduğu tespit edilmiş deneysel çalışma kapsamında kullandığımız deneylerin ayrıntılarına değinilmiştir. Laboratuvar deneylerin bazılarında reaksiyon, çok yüksek miktarda çimento kullanımı, alkali ekleme veya yüksek sıcaklıklarda test edilerek hızlandırılmaktadır. Bu sebeple deney metotları, iki ana faktör göz önüne alınarak değerlendirilmelidir.

Birincisi, bu tür anormal koşullarda bazı silisli bileşenler normal koşullarda olduğundan çok farklı hızlarda reaksiyona girebilirler. İkincisi, reaksiyonun fiziksel etkileri çok farklı olabilir. Bu deneyler ancak, şantiye koşullarıyla veya normal şartlarda kürlenmiş numuneler üzerinde yapılan deneylerle karşılaştırıldığında anlamlı sonuçlar verebilir. ASR belirlenmesine yönelik olarak çeşitli araştırmacılar tarafından farklı deney yöntemleri önerilmiştir. Günümüzde bilinen ve uygulanan deney yöntemleri şunlardır.

1. Agregaların Petrografik Analizi (ASTM C295),
2. Kimyasal Metot (ASTM C 289),
3. Harç Çubuğu Metodu (ASTM C227),
4. Hızlandırılmış Harç Çubuğu Metodu (ASTM C1260),
5. Mineral Katkıların Veya Yüksek Fırın Cürufunun Etkinliklerini Ölçen Standart Deney Metodu (ASTM C441),
6. Beton Prizma Metodu (ASTM C1293),
7. Hızlandırılmış Beton Prizma Metodu (ASTM C1253),

8. Jel Pat Metodu,
9. Alman Çözünme Metodu,
10. Ozmotik Hücre Metodu,
11. Cornell Üniversitesi Leke Metodu ve Jel Floresan Testi,
12. Los Alamos Milli Laboratuvarı Leke Metodu,
13. Boyama Metotları,
14. Kireçli Harçlardaki Alkali-Silis Tepkimelerine Bağlı Gerilimi Ölçme Metodu,
15. Otoklav Metotları.

4.2. Çalışma Kapsamında Agregada Üzerinde Yapılan Deney Yöntemleri

ASR'undan korunmanın en iyi yolu, betonu yerleştirmeden önce gerekli önlemleri almaktır. Bu işlem, uygun bağlayıcı malzeme ve agreganın seçimi ve bunların etkili ve ekonomik şekilde bir araya getirilmesi ile mümkün olur [12]. ASR'nin tespiti ile ilgili laboratuvar yöntemleri aşağıda sıralanan amaçları kapsamaktadır;

1. Agregada tipinin potansiyel alkali reaktif olup olmadığının belirlenmesi,
2. Betondaki çimento-agrega kombinasyonunun reaktivite hızının tespiti ve reaktivitenin tetiklendiği durumlarda agreganın yavaş-geç genişleyen tipte olup olmadığının belirlenmesi,
3. Belirli çevresel koşullar ve karışım oranları dâhilinde betonda zaman içinde oluşabilecek maksimum genişlemenin belirlenmesidir.

Bu deneylerin esası, uzun sürede oluşan reaksiyonu dış etkiler yardımıyla hızlandırmaktır. Bu amaçla, agreganın öğütülerek kullanılması, yüksek sıcaklıklı veya basınçlı kür uygulanması, dışarıdan alkali eklenmesi gibi yöntemler uygulanmaktadır. Sonuçta oluşan reaksiyon, örneklerin genişmelerinin, ortamdaki alkalitenin veya çözünen silisin ölçülmesi gibi yöntemlerle belirlenir. Özellikle harç veya beton numunelerinin genişmelerini ölçmeye yönelik deneylerde alkalitenin atırılması için iki yöntem vardır. Yüksek alkalili çimento kullanmak veya alkaliniteyi dışarıdan eklenen sodyum veya potasyum hidroksitlerle arttırmaktır. Diamond, dışarıdan eklenen alkali çözeltilerinin ortamda gecikmiş Etrenjit veya Candlot tuzu oluşumuna yol açtıklarını ve hidroksit iyon konsantrasyonu artışında

beklenen etkiyi göstermediğini vurgulamıştır [114]. ASR genleşmeleri, normal betonda ve normal kür koşullarında uzun zamanda oluşmaktadır. Bu sebeple, ASR genleşmelerini harç ve beton örnekleri üzerinde ölçen laboratuvar deneyleri tasarlanırken reaksiyon çeşitli şekillerde hızlandırılmıştır. Reaksiyonu hızlandırmak için aşağıdaki yöntemlerden biri veya birkaçı bir arada uygulanır;

1. Alkali konsantrasyonunun artırılması,
2. Reaktivitesi yüksek silis formu kullanılması,
3. Yüksek sıcaklık uygulanması.

Bu koşullar, gerçek ortam koşullarından uzaklaştıkça elde edilen sonuçlar gerçekten uzak olacaktır [115].

4.2.1. Petrografik inceleme (ASTM C295)

Agregaların mineral kompozisyonu potansiyel reaktivitesinin iyi bir göstergesidir. Amerikan standartlarında ASTM C295, “Agregaların Petrografik Analizi için Standart”, İngiliz Standartlarında BS 812-104 ve BS 6100-5.2 agregaların mineral kompozisyonunu ve formunu belirlemede kullanılır. RILEM TC-191-ARP teknik komitesi ise petrografik yöntemle agregaların alkali-reaktivitesinin belirlenmesini kapsayan bir metot önermektedir. AAR-1 ismiyle önerilen bu metodun tam ismi “Detection of Potential Alkali-Reactivity of Aggregates-Petrographic Method”dur. Bu analizin sonucunda agregalar; alkali reaktivitesi göstermekten çok uzak - Sınıf I, alkali reaktivitesi belirsiz - Sınıf II, ve alkali reaktivitesi gösterebilir - Sınıf III olmak üzere üç şekilde sınıflandırılmıştır. Komite, bu analizin ışığında ileri deneylerin yapılmasını önermektedir. ASR konusundaki araştırmaların ilk adımının petrografik analiz olduğu vurgulanmaktadır. Burada vurgulanan bir diğer nokta ise, petrografik analizin yöredeki agregalar hakkında bilgisi olan deneyimli bir petrograf veya jeolog tarafından yapılması gerektiğidir. Bu yöntem kısaca ince kesit alınan agregaların nokta sayımı vb. yöntemlerle incelenmesi ve mineralojik, dokusal, biçimsel özelliklerinin belirlenerek sınıflandırılması ve analiz sonucunda reaktivite potansiyeli hakkında bir yorum yapılması işlemlerini kapsamaktadır [116].

Agreganın petrografik analizi deneyimli bir petrograf tarafından yapıldığında agrega örneğindeki potansiyel reaktif mineraller belirlenebilir. Agreganın değerlendirilmesi makroskopik veya mikroskopik metotlarla yapılabilir. Makroskopik analizde, agrega örneği gruplara ayrılarak benzer kayaç tipleri sınıflandırılır. Agreganın reaktivitesi, toplam örnek içindeki potansiyel reaktif kayaç tiplerine göre hesaplanır. Mikroskopik analiz daha kapsamlı ve zaman alıcı bir prosedürdür. Bu nedenle, genellikle daha az agrega örneği üzerinde analiz yapılır. Çoğunlukla petrografik mikroskop kullanılır ve agregaların ince kesitleri polarize ışık altında incelenir. Toz haline getirilmiş agrega örneğinin kırılma indeksi ve özgül ağırlığı da değerlendirilir [12].

Petrografik mikroskobun pek çok değişik fonksiyonu vardır. Petrografik mikroskop kullanan deneyimli bir petrograf, düz ve çapraz polarize ışık altında örneği inceleyebilir, zararlı elemanların yerini, alterasyon olup olmadığını belirleyebilir [7]. Agregada örneğinin mineral kompozisyonunun karakterizasyonu için geçirimsiz elektron mikroskobu (TEM) ve tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) de kullanılabilir. Agregada parçası içindeki silis kristal yapısının ve dokusunun karakterizasyonu için x-ışını difraksiyonu ve kızılötesispektrografisi gibi analitik teknikler de uygulanmaktadır. Agreganın petrografik analizi zaman alıcı olduğundan küçük örnekler üzerinde çalışılır. Bu sebeple seçilen örneğin agregayı temsil etmesi gerekmektedir. Petrografik analiz sonuçları ile agreganın servis ömrü süresince tutulan kayıtlarının ilişkilerinin değerlendirilmesi yararlıdır. Petrografik analiz sonuçları, agreganın betonda zararlı genişleme gösterip göstermeyeceği ile ilgili fikir veremez. Bunun belirlenmesi için diğer deney metotları uygulanmalıdır [12]. İngiliz Karayolları Şartnamesi (Specification for Highway Works) gibi şartnameler ise alkali-silis reaksiyonunu kontrol altına almak için agregada istenmeyen fazları belirtmiştir. Buna göre, ince ve kaba agregaların kütlece %95 ve daha fazlasının reaktif olmayan tipteki agregalardan oluşması; bunların opal, tridimit ve kristobalit gibi reaktif silis mineralleri tarafından kirletilmemiş olması ve ayrıca kütlece toplamda %2'den daha fazla çört, flint veya kalsedon içermemesi durumunda zararsız olduğu kabul edilmektedir. Pesimum oran nedeniyle, toplam agregadaki çört veya flint içeriği kütlece %60'dan fazla ise ve önceden bahsedilen silisli mineralleri içermiyorsa yine zararsız kabul edilmektedir. Kuvars ise kuvarsit ve yine kütlece %30'dan fazla miktarda metamorfizma geçirmiş kuvars içermemelidir [7]. Bu teknikler agreganın

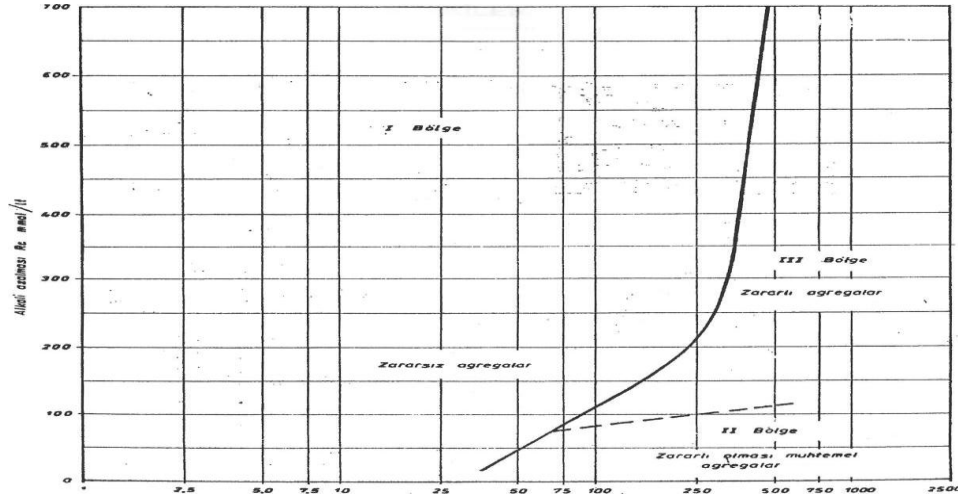
mineralojik yapısını ve bu minerallerin agregadaki miktarını belirlemede çok faydalıdır. Yine de bu tür tekniklerin hiçbirinin ASR hasarının olup olmayacağını kesin olarak tespit edemediğini de göz önünde bulundurmak gereklidir. Agregaların hacim yoğunluğu, porozitesi, parça boyutu dağılımı, reaktif parçacıkların miktarı, agregaların şekli ve pürüzlülüğü gibi etmenlerle çevresel etkiler ASR genleşmesinde rol oynamaktadır. Bu sebeple, petrografik analizin her zaman için beton agregalarının uygunluğunu belirlemede sadece ilk adım olduğu unutulmamalıdır.

4.2.2. Kimyasal metot (ASTM C289)

Amerikan standartlarında ASTM C289 “Agregaların Potansiyel Reaktiviteleri için Deney Metodu (Kimyasal Metot)” adıyla yer alan yöntem, hızlı kimyasal metot adıyla da bilinmektedir ve silisli agregaların potansiyel reaktivitesini tahmin etmek için kullanılır. ASTM C289 kimyasal yöntemde, her ocak için 50 ve 100 nolu elekler arasında kalan malzemedan “çeyrekleme yöntemi” kullanılarak alınan örnekler akar saf su altında yıkanarak toz ve ince parçalardan arınması sağlanır. Yıkanan malzeme 24 saat süreyle 105⁰C sıcaklıkta etüvde kurutulur. Elenen, yıkanan ve kurutulan örneklerden elektronik tartı ile 25 g’lık 3 adet örnek alınarak reaksiyon kabı içerisine konur. Bu kapların her birine 25 ml. 1 N NaOH çözeltisi ilave edilerek reaksiyona uğrattılır. İçerisine örnek konulmayan dördüncü kaba sadece 25 ml. 1 N NaOH çözeltisi konur. Örnek kapları 80 C^o sıcaklıkta sabit tutulan su banyosunda konarak 24 saat bekletilir. Bu süre sonunda örnekler su banyosundan çıkarılarak 30 C^o sıcaklığa kadar soğutulup kapakları açılarak kuru bir kap içerisine süzülür. Homojenliğin sağlanması için karıştırıldıktan sonra bir pipet yardımıyla 10 ml. çekilerek 200 ml’ lik balon jöjeye alınmış ve üzeri damıtık su ile 200 ml. ye tamamlanır.

Bu çözelti, çözünmüş silisin ve alkali azalmasının tayini için kullanılır. Böylece agregada çözünen silis ile çözeltinin alkalinitesindeki azalma belirlenmiş olur. Bu değerler Şekil 4.1 ’de görülen grafik üzerinde işaretlenir. Agreganın bulunduğu bölgeye göre zararlı, potansiyel zararlı veya zararsız olduğu belirlenir [12]. Bu yöntem hızlı reaktiviteye sahip agregaları belirlemede güvenilirdir; ancak, yavaş reaktif agregalarda yanıltıcı sonuç verebilir. Bazı agregalarda yüksek miktarda

çözünür silis bulunurken betonda düşük genleşmeler gösterebilir. Bu sebeple deney metodu her zaman güvenilir sonuçlar vermemektedir [88]. Bu deney agregaların sınıflandırılması için uygun ve hızlıdır, ancak sonuçların diğer deney yöntemleriyle doğrulanması gerekir [40].



Şekil 4.1. Alkalinite azalma (R_c) çözünen silis (S_c) grafiği (ASTM C289)

Diğer kimyasal metotlar ise kullandıkları (veya geliştirildikleri) ülkelerle birlikte aşağıda sıralanmıştır;

1. Ağırlık kaybı metodu (Almanya),
2. Jel pat metodu (İngiltere),
3. Ozmotik hücre deneyi (Amerika),
4. Kimyasal büzülme metodu (Danimarka).

4.3. Çalışma Kapsamında Harç Çubuğu Üzerinde Yapılan Deneyler

Çalışma kapsamında harç çubuğu üzerinde yapılan deneyler alt bölümlerde detaylandırılmıştır.

4.3.1. Harç çubuğu deneyi (ASTM C227)

Amerikan standartlarında, ASTM C227 “Çimento-Agrega Kombinasyonlarının Potansiyel Alkali Reaktivitesi için Deney Metodu (Harç Çubuğu Metodu)” olarak

isimlendirilmiştir. Deney yöntemi, söz konusu agrega ile üretilen harç çubukları genleşmelerinin ölçülmesi esasına dayanır. Agregalar standartta (ASTM C227) belirtilen gradasyona getirilir (Tablo 4.1).

Tablo 4.1. Harç çubuğu deneyleri için agrega elek analizi oranları

Elek göz açıklığı, mm		Ağırlıkça, %
Elek üzerinden geçen	Elek üzerinden kalan	
4.75 (No.4)	2.36 (No.8)	10
2.36 (No.8)	1.18 (No.16)	25
1.18 (No.16)	0.60 (No.30)	25
0.60 (No.30)	0.30 (No.50)	25
0.30 (No.50)	0.15 (No.100)	15

Uygun karışım için gerekirse kırma işlemi de uygulanır. Sahada kullanılacak olan çimento veya eşdeğer alkali içeriği %0.6 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$ olan ve daha düşük alkali içeriğine sahip referans çimento kullanılır. Bu deneyde, belirtilen gradasyonda agrega elenerek agrega/çimento oranı 2.25 ve yayılma değeri 105-120mm arasında olacak bir harç karışımı hazırlanarak 25×25×285 mm boyutundaki prizmatik kalıplara dökülür (Tablo 4.2).

Tablo 4.2. Harç çubukları malzeme karışım oran ve miktarları

Malzeme Türü	Elek Çapları					S/Ç	Su(ml)	Çimento(gr.)
	No:8	No:16	No:30	No:50	No:100			
	0-8 mm ince agrega							
% Oranı	% 10	%25	%25	%25	% 15			
Miktarı(gr)	100	250	250	250	150	0,45	199.8	444

En az dört adet harç numunesi hazırlanır. Harç çubukları su üzerinde, %100 bağıl nemde, 37.8°C'de kürlenir. 14 günden başlayarak belirli periyotlarda 12 ay veya daha uzun süre boy ölçümleri 0.002 mm hassasiyetle kaydedilir. ASTM C33 standardına göre, reaktif olmayan agrega için genleşmeler altı ayda %0.1 ve üç ayda %0.05'in altında olmalıdır. Agreganın reaktivitesindeki farklılıkların anlaşılabilmesi için daha uzun süreli genleşmeler de kaydedilmelidir [12]. 6 aylık sonuçların bulunmaması halinde 3 aylık genleşme limitleri esas alınabilmektedir. 6 aylık

genleşmelerin limit değeri aşması halinde, oluşan genleşmenin ASR sebebiyle olduğunun kesin değerlendirilmesinin yapılabilmesi için, ek deneyler uygulanması önerilmektedir. Grattan-Bellew'e göre, 12 ve 6 aylık sonuçlar rapor edilmelidir [117].

Pek çok araştırma kurumu, 12 aylık genleşme sonuçlarına göre değerlendirme yapmaktadır. Hatta Oberholster ve Davies, 12 aylık genleşme limitini %0.05 gibi çok koruyucu bir değerle sınırlandırmaktadır [105]. Bu metot çimento agrega kombinasyonlarının potansiyel alkali reaktivitesini ölçmede kullanılmaktadır. Agregaların karbonat reaktivitesini ölçmede etkili olmadığı belirtilmiştir. Reaktivitesi çok yüksek agrega deneye tabi tutulmadığı sürece anlamlı deney sonuçları elde etmek bir yıl veya daha fazla sürer. Dolayısıyla deneyin uzun süreli olması dezavantajdır. Uzun süreli ölçümlerin sonucunda bile zararlı agregaların bazıları genleşme göstermeyebilir. Bazı hallerde de bu deney metodu yavaş genleşen agrega ile zararsız agrega arasında ayırım yapmaya elverişli değildir. Çünkü deney yönteminin koşulları yeterince şiddetli değildir veya bu ayırımın yapılabilmesi için uzun seneler ölçüm yapılması gerekebilir [88].

Deney sonucunda belirtilen limit değerinin üzerinde genleşmeler elde edilmesi halinde genleşmelerin alkali reaktivitesi sonucu oluştuğunun tespiti için deney numuneleri veya agregalar üzerinde petrografik analiz uygulanması veya kimyasal metot ile inceleme yapılması önerilmektedir. Bu metot, aynı zamanda mineral ve kimyasal katkıların ASR genleşmesindeki azalmaları ölçmede kullanılmaktadır. Deney yönteminin uygulanışı ile ilgili bazı farklılıklar vardır. Deney metodu, yüksek bağıl nemin sağlanabilmesi için numunelerin saklandığı kapların içinin fitille kaplanması gerektiğini belirtir. Bu fitiller, nemin numunenin üzerinde yoğunlaşarak alkalilerin harçtan dışarı süzülmesini kolaylaştırır. Fital kullanılan kaplarda genleşmelerde azalmalar görülmüştür [12, 7]. Deneye tabi tutulan harç örneklerinin boyutu da ölçülen genleşmeleri değiştirmektedir. Harç çubuğunun en kesiti büyüdükçe ölçülen genleşmeler de artmaktadır. Deney sonuçları, kullanılan kabın tipi, fitillerin bulunup bulunmayışı, çimentonun alkali içeriği, su/çimento oranı gibi faktörlerden hayli etkilenmektedir. Bu deneylerin uygulanışında, fital kullanılmaması, karışım suyuna NaOH eklemek suretiyle alkali içeriğinin çimentonun kütlece %1.25 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$

seviyesine çıkarılması, su/çimento oranının kırılmış agrega için 0.50, doğal agrega için 0.44 seviyesinde tutulması önerilmektedir [7, 32, 118].

4.3.2. Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi (HHÇD) (ASTM C1260)

Amerikan standartlarında, ASTM C1260 “Agregaların Potansiyel Alkali Reaktivitesi için Deney Metodu (Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi)” olarak geçen bu deney, diğer genleşme deneylerine kıyasla kısa sürmesi sebebiyle avantajlıdır. Deney metodu, yüksek alkalın çözelti içerisinde yüksek sıcaklıkta bekletilen harç örneklerinin boy değişiminin ölçülmesi prensibine dayanır [12]. Bu deney, belirli çimento-agrega kombinasyonlarının davranışını değil, agreganın potansiyel reaktivitesini ölçmektedir. Bu metot, kür şartlarını ağırlaştırarak reaksiyonu hızlandırmakta ve agregaların reaktivitesinin 16 gün içinde belirlenmesine olanak vermektedir. Diğer metotlarda da belirtildiği gibi, uygulamadan önce agregaların petrografik analizinin yapılması ve limitlerin üzerinde genleşme görüldüğü takdirde reaktivitenin ASR sebebiyle oluşup oluşmadığının incelenmesi önerilmektedir.

Standartta belirtilen gradasyondaki agrega, kütlece çimentonun 2.25 katı kadar kullanılarak, su/çimento oranı 0.47 olan harç karışımı hazırlanır. 25×25×285 mm boyutlarındaki kalıplara dökülen harç numuneleri 24 saat sonra kalıplardan alınarak ilk boyları ölçülür. Harç çubukları ASTM C-227’de belirtilen esaslara uygun olarak hazırlanır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, kalıplarda numune üzerine yapışarak suyun difüzyonunu önleyebilen standart kalıp yağları yerine teflon sprej gibi artık bırakmayan tipte kayganlaştırıcı materyal kullanılmasıdır. Kalıp sökümünden itibaren 1 gün süreyle 80°C suda bekletilerek boy ölçümleri alınan numuneler, takip eden 14 gün boyunca 80°C 1 N NaOH çözeltisinde bekletilir ve periyodik ölçümleri alınır. Standart, çimentonun alkali miktarı hakkında bir değer vermemektedir. Bunun sebebi ise kür koşullarından dolayı numunelerin boşluk çözeltisi alkalinitesinin artmasıdır. Toplam 16 gün süren deney sonucunda, genleşme yüzdeleri aşağıdaki şekilde değerlendirilir:

1. 16 gün sonundaki genleşmeler, %0.10 değerinin altındaysa agregalar zararsız davranış göstermektedir.

2. 16 gün sonundaki genleşmeler, %0.20 değerinin üstündeyse agregalar potansiyel olarak zararlı genleşme gösterir.
3. 16 gün sonundaki genleşmeler, %0.10 ile %0.20 değerinin arasındaysa agregalar, şantiye koşullarında hem zararlı hem de zararsız davranış gösterebilir.

Bu sebeple, agregalar hakkında karara varmadan önce ek deneyler yardımıyla genleşmelerin sebebinin araştırılması ve ölçümlerin 28 güne kadar uzatılması önerilmektedir. Farklı organizasyonlar, lokal deneyimlerine göre farklı genleşme kriterleri belirleyebilir. Agreganın genleşme seviyesine göre betonda kullanılacak olan malzemelere karar verilebilir [12].

HHÇD, diğer deneylerle birlikte, agreganın potansiyel reaktivitesinin belirlenmesi için tarama amaçlı kullanılabilir. Şiddetli deney koşulları sebebiyle, bazen iyi bir saha performansı gösteren agregalar deney sonucunda reaktif çıkabilir. Bunun sebebi, normalde betonların bu deney koşullarındaki gibi yüksek alkali seviyeleri ve yüksek sıcaklıklarla karşılaşmamalarıdır. Bu deneyin şiddeti sebebiyle, geleneksel harç çubuğu yönteminde reaktif olduğu belirlenemeyen yavaş genleşen agregaların reaktivitesinin belirlenmesi mümkündür [12]. Bu deney yönteminin kür koşulları oldukça ağır olduğundan tatmin edici saha performansı gösteren bazı agregaların da reaktif olarak tanımlanabilmesi gibi bir probleme yol açabilmektedir. Bu sebeple agregaların reddine karar verirken bu olasılığın göz önünde tutulmasında fayda vardır. Yine de, deney süresinin oldukça kısa olması ve pratikliği sebebiyle araştırmalarda kullanılması tercih sebebi olmaktadır [117].

Diğer metotlarda olduğu gibi HHÇ Deneyinde farklı ülkelerin standartlarında bazı değişikliklerle uygulanmaktadır. Örneğin, ASTM C1260'ın eşdeğeri AASHTO T303, su/çimento oranını 0.50 olarak vermekte, sınır değer olarak ASTM'nin %0.1 değerini korumaktadır. Kanada Standardı (CAN/CSA A23.2-25A) ise su/çimento oranını doğal kumlar için 0.44, kırmataş için ise 0.50 vermektedir [11]. Bu standartta limit değeri 16 günlük periyot sonunda silisli kireçtaşı, granit, gnays ve bazı kumtaşları için %0.1, diğerleri için ise %0.15'tir. RILEM komitesinin hazırladığı benzer standart (TC 106-2) ise su/çimento oranını, sabit akma değerine göre ayarlamakta ve pesimum genleşme gösteren agregalar için reaktif olmayan agregalar

ile kombinasyonlar hazırlanmasını önermektedir. RILEM'in standart genişleme limitleri, ASTM'nin limitleri ile benzerdir. RILEM komitesi aynı zamanda 40x40x160 mm'lik çubuklarla ölçülen genişlemelerin 25x25x285'le ölçülenlerin 0.54 katı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca bu deneyin geç genişleyen agregaların performanslarını belirlemede etkisiz olduğu konusunda uyarmıştır [120]. Bu yorum, Farny ve Kosmatka'nın yavaş genişleyen agregalar hakkındaki yorumuyla çelişkilidir. Bu metotla geliştirilen ilk standart olan NBRI metodu ise 12 günlük genişleme değerlerini baz alarak (toplam deney süresi 14 gündür) agregaları, %0.10 değerinin altında ise zararsız, %0.10-%0.25 değerleri arasında ise yavaş genişleyen, %0.25 değerinden büyük ise potansiyel reaktif olarak adlandırmaktadır [12].

4.3.3. Otoklav metodu

Berube vd. harçlar için bir kaç gün içerisinde sonuç veren hızlı bir otoklav deneyi geliştirmiştir [119]. Bu deney, su/çimento oranı 0.5 olan ve alkali içeriği karışım suyuna NaOH eklenerek %3.5 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{esd}}$ değerine yükseltilen ASTM C227'ye uygun harç çubukları üzerinde uygulanmaktadır. Örnekler, otoklava girmeden önce iki gün boyunca %100 bağıl nemde ve 23°C'de kürlenmektedir. Otoklavda örnekler 130°C sıcaklıkta ve 0.17 MPa basınç altında 5 saat bekletilmektedir. Boy ölçümleri otoklava girmeden önce ve otoklavda bekletilen örnekler 23°C'ye soğutulduktan sonra alınmakta ve oluşan genişleme kaydedilmektedir. Bu deney metodu ile ASTM C1260 deneyi arasında iyi bir korelasyon bulunmuştur [32]. Shayan vd, HHÇD ile %3.5 çimento alkali seviyesindeki harçların 127°C'de 4-5 saat kürlendiği otoklav metodu sonuçlarını değerlendirmiştir. Shayan vd, kullandıkları 5 kumun 4'ünde iki deneyin farklı sonuç verdiğini belirlemiştir [124]. Otoklav metodunun buhar kuru uygulanan betonlardaki davranışı belirlemede uygun olacağını, ancak, yavaş genişleyen agregalarda doğru sonuç vermediğini belirtmiştir [32].

Literatür çalışmasında her ne kadar karışım suyuna NaOH eklenmesi söylene de yüksek reaktif agregalar da oluşan reaksiyon boşluk miktarının arttırdığı için genişleme boyutunda yanıltıcı sonuçlar karşımıza çıkmıştır. Bu nedenle yaptığımız deney numunelerinin hazırlanmasında saf su kullanmıştır. Çıkan sonuçların hızlandırılmış harç çubuğu deney sonuçları ile iyi korelasyon içerisinde görülmüştür.

4.4. Beton Üzerine Yapılan Deneyler

Beton üzerine yapılan deneyler alt bölümlerde detaylandırılmıştır.

4.4.1. Beton prizma testi (ASTM C 1293)

Beton prizma testi (ASTM C 1293) agrega kaynaklarının potansiyel ASR reaktivitesini değerlendirmek için tanınan bir test yöntemidir. Bu deneyin amacı, beton prizmaların boy değişimi ile agregaların alkali reaktivitesi hakkında fikir edinmektir. Bu deneyin uygulanmasından önce agregaların petrografisi ile ilgili bilgi edinilmesi önerilir. Deney uygulanacak agrega ince agrega ise reaktif olmayan kaba agrega ile karıştırılarak kullanılır. Kaba agreganın reaktivitesi ölçülecek ise reaktif olmayan ince agrega ile karıştırılıp belli gradasyona getirilen malzeme 75×75×285 mm kalıplara dökülür. Numunelerin çimento içeriği 420 kg/m³ olup su/çimento oranı 0.42 ile 0.45 arasında işlenebilirliği sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Kullanılan çimentonun eşdeğer Na₂O içeriği, karışım suyuna NaOH eklenerek çimentonun kütlece %1.25'ine yükseltilir. 24 saat sonra kalıptan çıkarılan numunelerin ilk boy ölçümleri alındıktan sonra 38 °C sıcaklıkta, su üzerinde (nemli ortamda) standartta belirtilen şekilde saklanır ve periyodik olarak ölçümleri alınır. Saklama kabında fitil kullanımı bu yöntemde de mevcuttur. Genleşme limitleri üç numunenin ortalaması alınarak, 1 yıllık periyot sonunda %0.04 olarak belirlenmiştir.

Genelde diğer test metotlarına ek olarak uygulanan bu metot, beton üzerinde uygulandığından gerçeğe daha yakın sonuçlar vermekte ve bu sebeple diğer deney metotları yetersiz kaldığında kullanılmaktadır. Ancak, deneyin uzun sürmesi dezavantajdır. Bu metot, mineral ve kimyasal katkıların ASR genleşmelerine etkisi hakkında en gerçekçi sonuçları vermektedir. Mineral katkıların etkinliği değerlendirilirken, 2 yıllık genleşme değerinin %0.04 olarak alınması ve karışımın alkali içeriğinin çimentonun kütlece %1.25'i değerine artırılması önerilmektedir [30]. Diğer ülkelerin standartlarının öngördüğü beton prizma deneyleri, ASTM standardından pek çok konuda farklılık gösterebilmektedir. Diğer standartlarda, prizmaların boyutları 75×75×300 mm'den 120×120×450 mm'ye varan boyutlarda değişmektedir. Kür koşulları ise 20 °C veya 38 °C olabildiği gibi, numuneler nemli

ortamda veya suyun içinde saklanabilmektedir. Harç çubuğu yönteminde olduğu gibi, kaplarda fitil kullanılıp kullanılmaması deney sonuçlarını oldukça etkiler. Standartların bir kısmı 3 ve 6 aylık sınır değerler ön görmektedir. RILEM komitesinin bu deney hakkındaki önerisine göre her bir beton örneğinin sarılarak kutulanması deneylerin tekrarlanabilirliğini arttırmaktadır. Ayrıca komite, deney metotlarının güvenilirliğini arttırmak için referans reaktif ve reaktif olmayan agregalar ile referans çimento önermiştir [120]. Bu deneyde ölçülen genleşmeleri etkileyen faktörler, çimento içeriği, su/çimento oranı, sıcaklık ve saklama kaplarının nem durumudur.

Bu metot, beton üzerinde uygulandığından gerçeğe daha yakın sonuçlar vermektedir. Bu sebeple diğer deney metotları yetersiz kaldığında kullanılmaktadır. Ancak, deneyin uzun sürmesi dezavantajdır. Bu deney, mineral ve kimyasal katkıların ASR genleşmelerine etkisi hakkında en gerçekçi sonuçları vermektedir. Mineral katkıların etkinliği değerlendirilirken, 2 yıllık genleşme değerinin %0.04 olarak alınması ve karışımın alkali içeriğinin çimentonun kütlece %1.25'i değerine arttırılması önerilmektedir [83, 121, 122].

4.4.2. Hızlandırılmış beton prizma deneyi (HBPD) (ASTM C1253)

RILEM tarafından araştırılan bu metot belirli bir agregalar kombinasyonu için eşik alkali miktarını veya bir beton karışımının ASR performansını ölçmek üzere geliştirilmektedir. Beton prizma deneyi ile aynı karışımlara sahip örneklerin kür sıcaklıklarını 60°'ye yükselterek 3 ayda sonuç alınmaktadır.

Grosbois ve Fontaine, farklı özelliklere sahip 95 agregalar üzerinde yaptıkları çalışmada BPD ile HBPD'ni kıyaslamıştır [123]. Grosbois ve Fontaine, HBPD için 56 günlük %0.02 limiti ile 90 günlük %0.04 limitlerini önermiştir. Ancak, BPD ile HBPD arasındaki regresyon bağıntısı, BPD'nin 12 aylık sonuçları ile HBPD'nin 90 günlük sonuçları dikkate alındığında daha güçlüdür. Araştırmacılar, bu sebeple önerilen 90 günlük limitin daha uygun olduğunu savunmaktadır.

Tablo 4.3. Alkali silis reaksiyonu deneylerinde kullanılan standartlar ve yorumları

Deney Adı	Amaç	Deney Metodu	Deney Süresi	Örnek çeşidi	Kriter	Yorum
ASTM C289 agregaların potansiyel alkali-silika reaksiyonunu belirleme (kimyasal metot)	Silisi agregaların potansiyel reaktivitesini saptamak	80 C (176F) de alkali çözeltisi ile tepkiyen örnek, Çözümünebilecek silika miktarı ve alkalinite de ki damla	24 saat	Ezilmiş ve elenmiş agregaların 25 gramlık üç örneği	Zararlı ve potansiyel zararlı bölgelerde grafik düşüşlerin deki işaretlenen nokta	Çabuk sonuçlar. Bazı agregalar yüksek silika içeriğine sahip olmasına rağmen düşük genişleme verir. Güvenilmez
ASTM C295 Beton ve harç çubuklarında kullanılan agreganın petrografik deneyi	Daha genel ya da önemli doğal mineralleri için tanımlayıcı terminoloji verme performanslarını saptamada bir yardım	Hazırlanan örneklerin görsel ve mikroskopik testi, elek analizi mikroskop, çizik veya asit testleri	Kısa süre – görsel test uzun test periyotları içermez	0-7 mm aralığın da doğal kum	Şekil, boyut, doku, renk, mineral bileşimi ve fiziksel koşullar gibi partikül karakteristikleri	Genellikle optik mikroskopi içerir. Ayrıca XRD analizi, farklı termal analiz, kızılötesi spektroskopisi içerir
ASTM C 227, Agrega-çimento bileşiminin potansiyel alkali-silika reaksiyonu (harç-bar metodu)	Çimento-agrega bileşiminin alkaliler içeren genişleyici reaksiyonlara duyarlılığı test etmek	Yüksek bağıl nem ve 37.8 C(100F) de suyun üstünde depolanan harç barları üzerinde uzunluk değişimini izlemek	Değişir; ilk ölçüm 14 günde 1,2,3,4,6,9 ve 12 aylarda; gerekirse bundan sonra her 6 ayda	Standart ölçülerde iki en az 4 harç bar 25*25*2 85 mm (1*1*11 ¼ in),	Her ASTM C33,6 ayda %0.10 genişleme, eğer 6 aylık periyot yoksa 3 ayda maksimum %0.05 genişleme	Özellikle karbonat agregası için test önemli gelişme üretmez .uzun test süresi genişlemeler AAR'den olmayabilir.
ASTM C1260 (AASHTO T303) Agregaların potansiyel alkali reaksiyonu	Harç çubuklarındaki agreganın zararlı alkali silika reaksiyonunun potansiyelini test etmek	80C(176F) deki alkali çözeltilerinde iki harç çubuklarının daldırımı	16 gün	Standart ölçülerde iki en az 4 harç bar 25*25*2 85 mm (1*1*11 ¼ in),	Uzunluk Değişimi 0,1 den az ise zararsız, 0,1-0,2 arası ise potansiyel zararlı olabilir. Bu durumda süre 28 gün uzatılmalıdır. Eğer %0.20'den büyükse potansiyel zararlı genişlemenin belirtisi	ASTM-C 227 'e göre kısa süreli deney metodudur.

Tablo 4.3. Alkali silis reaksiyonu deneylerinde kullanılan standartlar ve yorumları (Devamı)

ASTM C1293 alkali silika reaksiyonuna bağlı betonun uzunluk değişimini hesaplama	Agrega-çimento bileşiminin potansiyel ASR genişlemesini saptama	38C(100.4F)) su üstünde depolanan beton prizmaları üzerinde uzunluk değişimi	Değişir, ilk ölçüm 7 günde, sonra 28 ve 56 günde sonra 3,6,9 ve 12 aylarda ve gerekirse bundan sonra her 6 ay	75*75* 285mm (3*3*11 ¼in) standart ölçüleri nde her çimento Agrega karışımı için üç prizma	Her ek X1, eğer genişleme bir yılda %0.04'ü aşar veya ona eşit olursa potansiyel zararlı reaktif	Anlamalı sonuçlar için uzun test süreleri
ASTM C1253 Hızlandırılmış beton prizma testi (modifiye edilmiş)	Agrega-çimento bileşiminin potansiyel ASR genişlemesini saptama	60C(140F) su üstünde depolanan beton prizmaları	3 ay (91 gün)	75*75*2 85 mm (3*3*11 ¼in) standart ölçülerin de her çimento Agrega karışımı için üç prizma	Eğer genişleme 91 günde %0,04'ü aşar veya ona eşit olursa potansiyel zararlı reaktif	C227'e hızlı alternatif karbonat ve tortul kayalar için ASTM C22'e göre iyi korelasyon
ASTM C856 sertleşmiş betonun petrografik testi	Sertleşmiş betonun petrografik test prosedürlerinin taslağını çizmek	Hazırlanan örnekler stereo mikroskopla r ve tarayıcı elektron mikroskop ile test edilir.	Kısa süre, örneğin hazırlanmas ı ve görsel ile mikroskop testini içerir	Cihazda görüntül emeyi sağlayac ak şekilde numune hazırlanı r.	Ölçüye bak. Bu test eğer ASR oluşursa ve betonda etkisini gösterir. Çatlak gözükür.	Kumtaşının reaktif olduğu biliniyor mu? Yön belirtme ve yarıkların geometrisi hiç jel hali hazırda var mı?

BÖLÜM 5. ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER

5.1. Malzemelerin Hazırlığı

Deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin tanımlanması, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi deney sonuçlarının objektif yorumlanması bakımından önem arz etmektedir. Çalışmanın bu bölümünde, kullanılan agrega, bağlayıcı çimento ve mineral katkıları tanıtılmıştır.

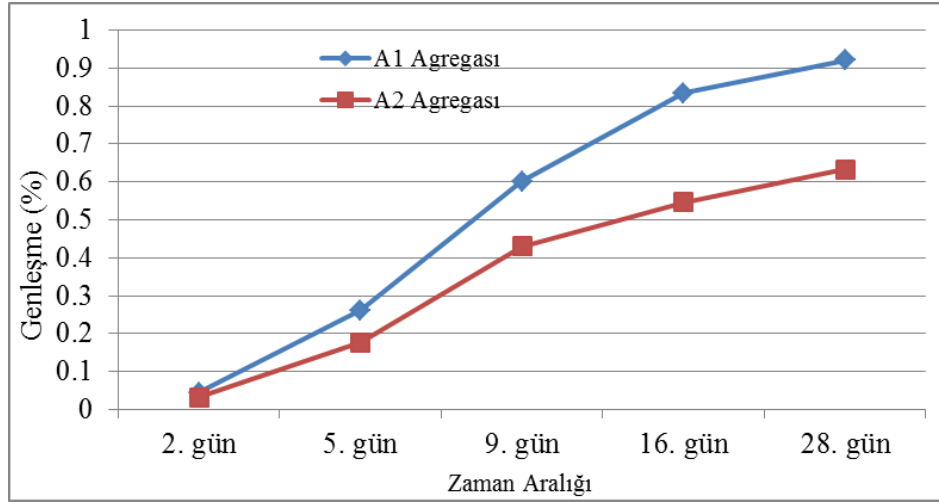
Agregaların reaktivite potansiyellerinin belirlenmesinin yanısıra bu reaktivitenin nedeninde önem taşımaktadır. Bu sebeple agregalar üzerinde yapılan detaylı kimyasal analiz için Üniversitemiz Fen Edebiyat Fakültesi Kimya bölümünden, mineralojik-petrografik analiz için ise Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Maden Analizleri ve Teknolojisi Dairesi Başkanlığından; Çimento, Yüksek Fırın Cürufu ve Kimyasal analizler için Oyak Bolu Çimento Fabrikasından destek alınmıştır.

5.2. Agregalar

Bu çalışma kapsamında Sakarya Nehrinin üst bölgesi Pamukova ilçesi sınırları içerisinde ve Karasu ilçesi Limandere mevkiinden iki grup numune temin edilmiştir.

Agrega A1: Pamukova bölgesinde Sakarya Nehri kenarında faaliyet gösteren kum çakıl ocağından temin edilmiştir. Bu agrega üzerinde kimyasal analiz ve HHÇD 28 gün süreli deney uygulandı. 28 gün sonunda elde edilen HHÇ Deneyi genleşme değeri 0.9206 civarında çıkmıştır.

Agrega A2: Karasu-Limandere bölgesinde Sakarya Nehri kenarında faaliyet gösteren kum çakıl ocağından temin edilmiştir. Bu agregaya üzerinde kimyasal analiz ve HHÇD 28 gün süreli deney uygulanmıştır. 28 gün sonunda elde edilen HHÇ Deneyi genişleme değeri 0.6325 civarında çıkmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde A1 agregasının yüksek alkali seviyesine sahip olduğu görülmüştür (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Hızlandırılmış harç çubuğu deneyinde A1 ve A2 agregalarına ait referans numune ortalama genişleme değerleri

Kimyasal analiz ve Hızlandırılmış Harç Çubuğu deneyi ile agregada mevcut alkali reaktivite tespitinden sonra yüksek reaktivite içeren A1 agregası (Pamukova bölgesinden alınan agregaya) ile deneysel çalışmaya devam kararı alınmıştır.

Touma vd, %0.5 den yüksek genişleme gösteren agregaları reaktivitesi yüksek olarak tanımlamaktadır [125]. Genişleme ortalama değerlerine göre A1 agregası bu sınıfa girmektedir.

A1 Kumuna ait özgül ağırlık değerleri TS 3526''Beton Agregalarında Özgül Ağırlık Tayini''standardına göre belirlenmiştir. Birim hacim ağırlığı ise TS 3529 ''Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini'' metoduyla belirlenmiştir (Tablo 5.1).

Tablo 5.1. A1 Agregasına ait özgül ağırlık, birim hacim ağırlık değerleri

Agrega sınıfı (mm)	Özgül Ağırlık (Kuru) (gr/cm ³)	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	
		Gevşek	Sıkışık
0-8 Kum (A1)	2.63	1.64	1.77
6-16 Mıçır	2.68	1.42	1.65

Elek analizi TS 130 “Agrega karışımlarının elek analizi için metot” standardına göre yapılmıştır. Elek analizi sonuçları Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2. A1 Kumuna ait elek analizi değerleri

Elek Boyutu (mm)	% Geçen Miktarlar
8	100
4	95
2	81
1	64
0.5	39
0.25	15
İncelik Modülü	3,94

5.3. Kimyasal Metot ile Agregada Alkali Reaktivitesinin Belirlenmesi

A1 agregası üzerinde TS 2517 kimyasal metoduna (ASTM C289) göre ASR araştırması yapılmış olup ilgili standarda göre örnek agreganın 3. bölgede zararlı agregada olduğu tespit edilmiştir (Tablo 5.3).

Tablo 5.3. A1 agregası TS-2517/ASTM C-289 ASR kimyasal analiz raporu

Numunede istenen Tayinler	Alkali Agregası Reaktivitesi
Analiz Sonuçları:	
Harcanan NaOH	350 (mmol/L)
Çözünen Silis (SiO ₂)	700 (mmol/L)
Sonuç : TS 2517	III. Bölge Zararlı Agregası

A2 agregası üzerinde TS 2517 kimyasal metoduna (ASTM C289) göre ASR araştırması yapılmış olup ilgili standarda göre örnek agreganın 3. bölgede zararlı agregada olduğu tespit edilmiştir (Tablo 5.4).

Tablo 5.4. A2 Agregası TS-2517/ASTM C-289 ASR kimyasal analiz raporu

Numunede istenen Tayinler	Alkali Agregası Reaktivitesi
Analiz Sonuçları: Sonuçlar aşağıdaki gibidir.	
Harcanan NaOH	350 (mmol/L)
Çözünen Silis (SiO ₂)	460 (mmol/L)
Sonuç : TS 2517	III. Bölge Zararlı Agregası

5.4. Agregaların Petrografik Analizi (ASTM C295)

Agregalara ait mineralojik-petrografik analiz için ise Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Maden Analizleri ve Teknolojisi Dairesi Başkanlığından destek alınmıştır.

5.4.1. A1 agregasına ait mineralojik petrografik analizi

Numunenin 0,007-5,54 mm arasında değişen silt ve çakıl boyutunda kayaç parçalarından ve minerallerden oluştuğu gözlenmiştir. İnce kesit incelemeleri neticesinde, örneğin büyük bir çoğunluğunu oluşturan kayaç parçalarının 0,32-3,56 mm arasında değişen magmatik, sedimanter ve metamorfik kayaç parçalarından oluştuğu dikkati çekmektedir. Söz konusu parçalar incelendiğinde, magmatik kayaç parçaları 0,32-3,56 mm arasında değişen tane boyutunda, tanesiz dokulu plütonik (olasılıkla granitik bileşimdeki) kayaç parçaları ile porfirik dokulu volkanik (olasılıkla andezitik bileşimdeki) kayaç parçalarından ibarettir. Sedimanter kayaç parçaları 0,39-2,37 mm arasında değişen tane boyunda mikritik ve sparitik kireçtaşlarından oluşmaktadır. Metamorfik kayaç parçaları ise, 0,39-5,54 mm arasında, bileşenleri belirgin bir yönde dizilim sunan, yer yer şist dokusuna sahip metabazik ve şist türü kayaçlardan oluşmaktadır. Söz konusu kayaç parçalarının genellikle yuvarlak yer yer de yarı yuvarlak şekilde oldukları gözlenmiştir. Örnek içerisinde diğer önemli bileşenleri mineraller oluşturmaktadır. Söz konusu mineraller ayrıntılı incelendiğinde, başlıca polisentetik ikizlenmeli plajiyoklaz; levhamsı, kahverengi renk tonlarında biyotit; polikristalin ve monokristalin kuvars; yeşil renkli, levhamsı şekilli amfibol minerallerinden ibaret oldukları dikkati çekmektedir.

5.4.2. A2 agregasına ait mineralojik-petrografik analizi

Numunenin 0,24-7,92 mm arasında değişen ince kum ve çakıl boyutunda kayaç parçalarından ve minerallerden oluştuğu gözlenmiştir. İnce kesit incelemeleri neticesinde, örneğin büyük bir çoğunluğunu oluşturan kayaç parçalarının 0,39-7,92 mm arasında değişen magmatik, sedimanter ve metamorfik kayaç parçalarından oluştuğu dikkati çekmektedir. Söz konusu parçalar incelendiğinde, magmatik kayaç parçaları 0,39-7,92 mm arasında değişen tane boyutunda, taneseli dokulu plütonik (olasılıkla granitik ve diyoritik bileşimdeki) kayaç parçaları ile porfirik dokulu volkanik (olasılıkla bazaltik ve andezitik bileşimdeki) kayaç parçalarından ibarettir. Sedimanter kayaç parçaları 2,24-7,03 mm arasında değişen tane boyutunda, mikritik, sparatik kireçtaşları ile fosilli kireç taşlarından oluşmaktadır. Metamorfik kayaç parçaları ise, 0,55-6,34 mm arasında, bileşenleri belirgin bir yönde dizilim sunan, yer yer şist dokusuna sahip şist, kuvarsit türü kayaçlardan oluşmaktadır. Söz konusu kayaç parçalarının genellikle yuvarlak yer yer de yarı yuvarlak şekilde oldukları gözlenmiştir. Örnek içerisinde diğer önemli bileşenleri mineraller oluşturmaktadır. Söz konusu mineraller ayrıntılı incelendiğinde, başlıca polisentetik ikizlenmeli plajiyoklaz; levhamsı, kahverengi renk tonlarında biyotit; monokristalin kuvars; yeşil renkli, levhamsı şekilli amfibol minerallerinden ibaret oldukları dikkati çekmektedir.

5.4.3. A3 agregasına ait mineralojik-petrografik analizi

Numunenin 2-4 cm arasında değişen çakıl boyutunda kayaç parçalarından oluştuğu gözlenmiştir. İnce kesit incelemeleri neticesinde, söz konusu kayaç parçalarının tamamen karbonat minerallerinden (kalsit) ibaret sedimanter ve az bir kısmının da metamorfik kayaç parçaları oldukları saptanmıştır. Detay incelemeler neticesinde, sedimanter kayaç parçalarının rekristalize kireçtaşları, mikritik kireçtaşları ve biyomikritlerden (fosilli kireçtaşı) oluşurken; metamorfik kayaç parçalarının tipik granoblastik dokulu (grift dokulu), tamamen kalsitten ibaret ve sözkonusu kalsit minerallerinde belirgin polisentetik lameller şeklinde kayma ikizlerinin geliştiği mermerlerden ibaret oldukları tespit edilmiştir.

5.5. Bağlayıcılar ve Mineral Katkılar

Deneysel çalışmada kullanılan çimento CEM 1 42.5R ve yüksek fırın cürufu Oyak Bolu çimento fabrikasından temin edilmiştir. Diğer mineral katkılardan, genellikle Sakarya bölgesi inşaatlarında kullanılan beton katkısı F sınıfı uçucu kül Kütahya Çimento'dan gelmiş Sakarya'da faaliyet gösteren hazır beton tesisinden, Silis dumanı İston A.Ş. İstanbul'dan temin edilmiştir. Temin edilen çimento ve mineral katkılara ait kimyasal analiz raporlarının hazırlanmasında Oyak Bolu Çimento Fabrikası kimya laboratuvarından destek alınmıştır.

5.5.1. Çimento özellikleri

Harç çubuklarının üretiminde CEM1 42.5 R türü çimento kullanılmıştır ve kullanılan çimentonun alkali içeriği %0.6 Na₂O eşdeğerinden az olarak kullanılmıştır. Bu eşdeğer, çimento içerisinde bulunan sodyum oksit (Na₂O) yüzdesiyle potasyum oksit (K₂O) yüzdesinin 0.658 ile çarpılıp toplanmasıyla bulunan değerdir (Denklem 5.1).

$$\%Na_2O + 0.658 \%K_2O \quad (5.1)$$

Tablo 5.5'de Çimento ve mineral katkılara ait alkali düzeyleri görülmektedir.

Tablo 5.5. Çimento ve mineral katkılara ait alkali düzeyi çizelgesi

	Alkali düzeyi (%Na ₂ O eşdeğer)	Kullanılan Çimento ve Mineral katkılarda alkali düzeyinin bulunması için gerekli denklem ve alkali düzeyi	
		(%Na ₂ O + 0.658 (%K ₂ O))	(% Na ₂ O Eşdeğer)
Çimento	<%0.6'dan az olmalı	0.22+0.658*0.46	0.52
Uçucu kül	<%3.0'den az olmalı	0.00+0.658*2.53	1.66
Yüksek fırın cürufu	<%1.0'den az olmalı	0.50+0.658*0.87	1.27
Metakaolin		0.00+0.658*0.68	0.45
Silis dumanı	<%1.0'den az olmalı	0.29+0.658*0.87	0.86

Çimento ve mineral katkılara ait kimyasal ve fiziksel analiz değerleri Tablo 5.6'da görülmektedir.

Tablo 5.6. CEM I 42,5, Yüksek fırın cürufu, f sınıfı uçucu kül, metakaolin, silis dumanının kimyasal ve fiziksel analiz değerleri

Ölçülen değerler	CEM I 42,5 R %	Yüksek fırın cürufu %	Uçucu kül %	Silis dumanı %	Metakaolin %
SiO ₂	19.95	35.27	53.69	93.65	53.68
Al ₂ O ₃	5.12	14.81	20.29	0.20	42.44
Fe ₂ O ₃	3.75	2.13	11.83	0.58	1.40
CaO	63.82	28.79	3.4	0.27	0.60
MgO	1.64	8.32	4.09	0.33	0.73
SO ₃	3.36	0.51	0.99	0.21	0.00
Na ₂ O	0.22	0.50	0.00	0.29	0.00
K ₂ O	0.46	1.17	2.53	0.87	0.68
Na ₂ O eşdeğer	0.52	1.27	1.66	0.86	0.45
Kızdırma kaybı	1.11	0.21	2.01	1.84	-
SCaO	1.23	-	-	-	-
45 Mikron	1.90	0.20	27.25	-	5
90 Mikron	-	-	-	-	-
Özgül ağırlık	3.13	2.95	1.98	2.36	2.6
Blaine	3971(cm ² /gr)	5074 (cm ² /gr)	4020(cm ² /gr)	20000(cm ² /gr)	8600(cm ² /gr)

5.5.2. Mineral katkıları

5.5.2.1. Uçucu kül

Doğal kaynakların daha az tüketilmesi, çevre kirliliğinin daha aza indirgenmesi ve enerji maliyetlerinin azaltılması amacıyla endüstriyel atık kullanımı gün geçtikçe daha fazla ilgi çeken bir konu olmaktadır. Endüstriyel atıklardan yapay puzolan sınıfına giren ve termik santral baca külü olan uçucu küller kendisine inşaat sektöründe çok yaygın kullanım alanı bulmuştur. Uçucu kül en yaygın puzolandır. Bu malzeme, termik enerji santralleri içinde öğütülmüş kömürün yanmasıyla ortaya çıkan bir üründür. Baca gazları atmosfere bırakılmadan önce bu gazlar içindeki ince tanelerin toz toplama sistemi tarafından toplanmasıyla elde edilir. Uçucu kül rutubetli ortamlarda kalsiyum iyonları ile reaksiyona girerek silikat hidrate oluşturan yarı kararlı alümin silikatlar içerir. Dünyadaki uçucu kül üretimi yılda yaklaşık 450

milyon tondur ancak toplam uçucu kül miktarının sadece %6'sı çimento ve beton karışımlarında puzolan olarak kullanılmaktadır.

Türkiye' de kömür yakan 16 enerji santrali bulunmaktadır. Ülkemizde yıllık uçucu kül üretimi yaklaşık 15 milyon ton civarındadır. Betonda uçucu kül kullanımının iki ana nedeni vardır;

1. Beton maliyetlerini düşürmek,
2. Taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini iyileştirmek.

Uçucu küllerin ekonomik olarak değerlendirilmesi, kullanılabilir miktarda, gerekli nakliye miktarına ve istenilen tasarıma bağlıdır. Uçucu kül hidratasyon ısısını düşürür ve tanelerin küreselliği sayesinde taze betonun kararlılığını, kolay yerleşmesini ve kolay sıkıştırılmasını sağlamaktadır. Uçucu külün kimyasal bileşimi, tane boyut dağılımı, inceliği, puzolanik aktivitesi ve betonun kür koşulları, uçucu küllü betonun mekanik özelliklerini etkileyen önemli etkenlerdir. ASTM-C 618'e göre uçucu kül iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar F tipi uçucu ve C tipidir. F tipi uçucu kül genellikle %10 dan daha az CaO içerir. Buna karşın C tipi uçucu kül, %15 ten %35' e kadar CaO içerir. Diğer yandan F tipi uçucu kül antrasit ve bitümlü kömürün yanmasından üretilir, bu da düşük kireçli uçucu kül olarak sınıflandırılır.

C tipi uçucu kül ise diğer linyit ve bitümlü olmayan kömürün yanmasından elde edilir. Yüksek kalsiyum içeriğine bağlı olarak C tipi uçucu küller puzolanik özelliklerinin yanında bağlayıcı özelliğe de sahiptir. Betonda uçucu kül kullanımının erken yaşlarda yavaş dayanım kazanmasına yol açtığı iyi bilinmektedir. Beton teknolojisindeki son gelişmelerden, kalsiyum içeriği ve tane boyut dağılımının dayanım kazanma hızını belirleyen en önemli parametreler olduğu anlaşılmaktadır. Çalışmada kullanılan F sınıfı uçucu küle ait kimyasal analiz değerleri Tablo 5.6'da verilmiştir.

5.5.2.2. Yüksek fırın cürufu

Demir cevherinin içinden demirin ayrıştırılabilmesi için cevher “yüksek fırın” adı verilen bir fırında çok yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılıp eritilmektedir. Kok kömürünün karbonu, cevherin demir oksitindeki oksijenle birleşip CO ve CO₂ gazları olarak fırını terk ederken 1400-1600 °C sıcaklıkta eriyik halinde “yüksek fırın cürufu (YFC)” oluşur [126]. Cüruf hızlı bir şekilde soğutulduğunda camsı bir yapıya sahip olur. Kristal taneleri benzeri bir yapı oluşturduğundan, “granüle yüksek fırın cürufu (GYFC)” adını alır. Çimento inceliğinde öğütülmüş GYFC hidrolik bağlayıcı özelliği haizdir. Çimentoya karıştırıldığında bağlayıcılık kazanması için gerekli olan Ca(OH)₂ çimentonun hidratasyon ürünü olan Ca(OH)₂'dan sağlanır [127]. Betonda YFC'nin doğrudan katılması ilk kez Güney Amerika'da uygulanmıştır. Daha sonra yapılmış bazı çalışmalarla cürufun mineral bir katkı maddesi olarak beton özelliklerini olumlu yönde etkilediği rapor edilmiştir [128].

Cürufllu betonun dayanımı; cürufun inceliğine, aktivite endeksine ve karışım içerisindeki cüruf/çimento oranına bağlıdır. İnce öğütülmüş halde betonda kullanıldığında, işlenebilirliğin arttığı, daha az su absorbe ettiği ve terlemeyi azalttığı belirtilmektedir. Cüruf katkılı betonun geçirgenliğinin daha yüksek olduğu, donma-çözülme deneylerinde çok iyi sonuç gösterdiği de rapor edilmiştir [129]. Bileşim bakımından bağlayıcı potansiyeli veya doğrudan bağlayıcı etkinliği olan bazik karakterli yüksek fırın cürufları günümüzde;

1. Çimento katkı maddesi olarak,
2. Cürufllu çimentoların ana maddesi olarak,
3. Beton üretim tesislerinde kuru toz halinde betona katılarak, kullanılmaktadır [130].

Taze beton özellikleri açısından cürufllu betonlara bakıldığında;

1. Cüruf işlenebilirliği arttırmaktadır,
2. Normal sıcaklıklarda priz süresi normal betonlardan farklı değildir,
3. Cürufllu betonların terleme hızları ve miktarları daha yüksek ama hidratasyon ısıları düşüktür [131].

4. Sertleşmiş beton özellikleri açısından bakıldığında, geç dayanımı ve elastisite modülü daha yüksektir [132].

Dayanıklılık (dürabilite) açısından cürufli betonlar;

1. Sülfat ve deniz sularına karşı dayanıklıdır,
2. Dayanımları gün geçtikçe artmaktadır,
3. Alkali-Silis reaksiyonundan kaynaklanan genleşmeler daha az görülmektedir,
4. Klorür iyonları için düşük geçirimsiliğe sahiptir.

Lewis ve Spellman, yapmış oldukları çalışmalarda cürufun kullanılması ile elde edilecek betonların yararını aşağıdaki şekilde sıralamışlardır [130].

1. Dayanımları gün geçtikçe artmaktadır,
2. Sülfat ve deniz sularına karşı dayanıklıdır,
3. Alkali-Silis reaksiyonundan kaynaklanan genleşmeler daha az görülmektedir,
4. Klorür iyonları için daha düşük geçirimsiliğe sahiptir,
5. Yüksek sıcaklıklara daha dayanıklıdır.

Öğütülmüş GYFC, ASTM C-989 standardına göre GYFC 80,100 ve 120 sınıfı olmak üzere üç sınıfa ayrılırlar. Çalışmada kullanılan YFC'ye ait kimyasal analiz değerleri Tablo 5.6'da verilmiştir.

5.5.2.3. Silis dumanı (Mikrosilis)

Silis dumanı, silisyum veya demir silisyum alaşımlarının ergime yöntemi ile üretimi sırasında elde edilen, ana bileşeni 1 µm'den küçük, küresel, amorf, camsı silis (SiO₂) partiküllerinden oluşan, yüksek düzeyde puzolanik aktiviteye sahip bir yan üründür [133]. Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretimi esnasında ortaya çıkan gazın hızlı soğutulması sonucu elde edilen ve %85 - %98 kadar silis içeren amorf yapıya sahip çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemeye "yoğunlaştırılmış silis dumanı" veya kısaca "silis dumanı" adı verilmektedir. Bu malzeme, "mikrosilis", veya "silis tozu", veya "silika füme" gibi isimlerle de

anılmaktadır. Silis dumanı, amorf yapıda ve çok ince taneli malzeme olmasından dolayı ve yüksek miktarda SiO₂ içermesi sebebiyle, mükemmel bir puzolanik malzemedir [134]. Silis dumanı aşırı ince parçalara ve yüksek reaktiviteye sahip olduğu için, çok yüksek dayanıma sahip (≥ 100 MPa) ya da erken yaşta yüksek dayanıma sahip beton üretmek için süper akışkanlaştırıcılar ile birlikte kullanılmaktadır.

Standartlarda, silis dumanının esas bileşeni kristalize olmayan amorf haldeki silistir. Genelde, beton içinde katkı olarak kullanılan silis dumanının SiO₂ içeriği %85'in üzerindedir (Tablo 5.6). İkinci esas bileşeni ise yanmamış karbon kalıntılarıdır. Fe₂O₃ içeriği ise %1 ile %2 civarındadır. Al₂O₃, SO₃, MgO, Na₂O ve K₂O gibi oksitler ise genelde %1'den az miktarda bulunur. Silis dumanında kızdırma kaybının en çok % 5 olması öngörülmektedir.

Tablo 5.7. Silikon oranına göre SiO₂ miktarları

Ferrosilikon alaşım/metal	SiO ₂ 'nin silis dumanı içindeki miktarı
%50 ferrosilikon	%72-77
%75 ferrosilikon	%84-88
Silikon (%98)	%93-98

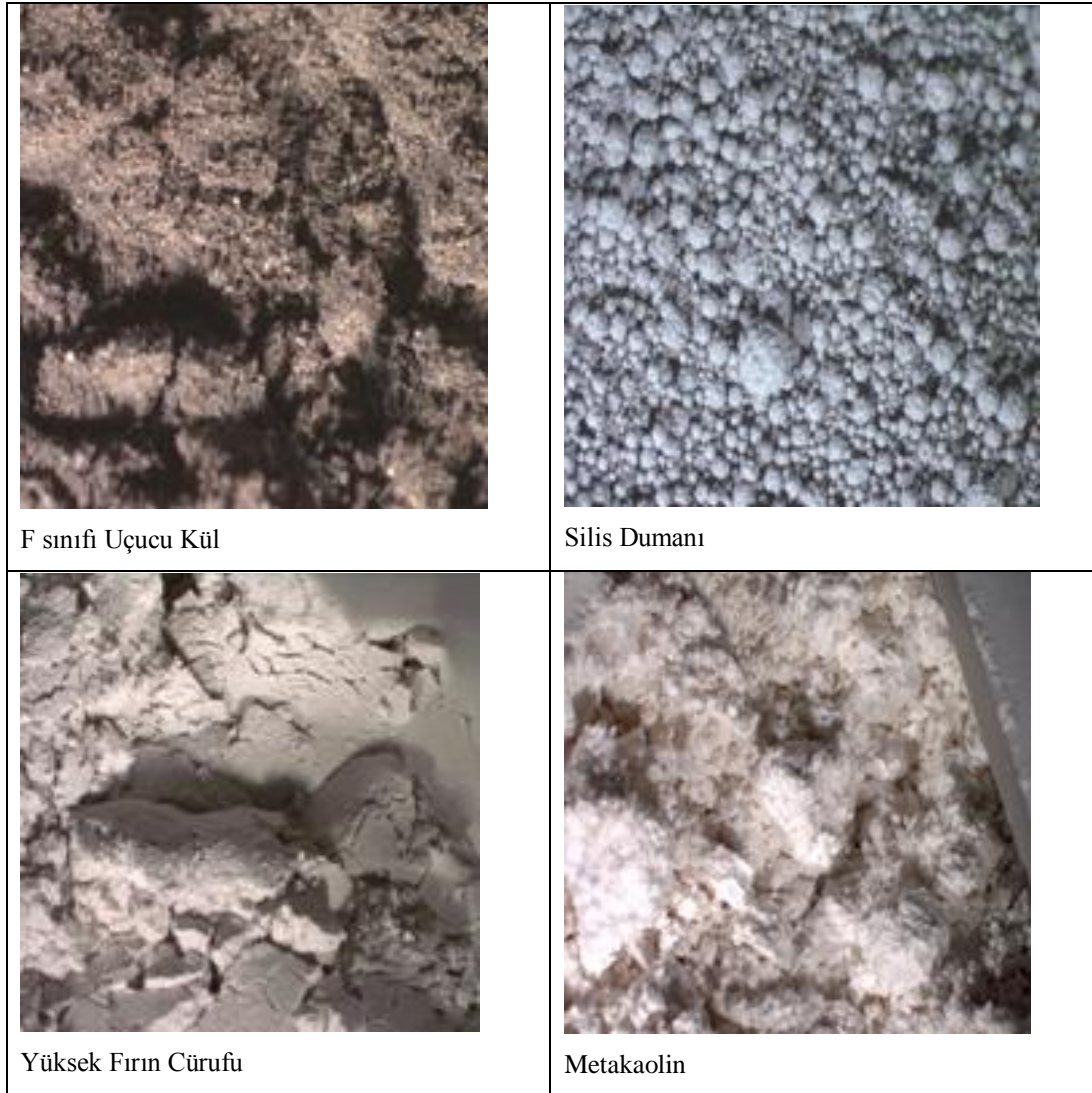
Yüksek silis oranı, silis dumanını etkin bir puzolan haline getirmektedir. Silis dumanı, çok ince olması ve yüksek silis içeriğinden dolayı genel olarak oldukça yüksek puzolanik aktiviteye sahiptir. Çimentolu ortamda bulunduğu en önemli görevi, C₂S ve C₃S hidratasyonları sonucu oluşan Ca(OH)₂'i bağlamak ve yeni bir CSH jeli meydana getirmektir [135]. Çalışmada kullanılan silis dumanına ait kimyasal analiz değerleri Tablo 5.6'da verilmiştir.

5.5.2.4. Metakaolin

Metakaolin (MK), yüksek performanslı çimento bazlı malzemelerin üretiminde son zamanlarda kullanılmaya başlanan bir mineral katkıdır. MK, saf kaolin kilinin yaklaşık 700–800 °C'lerde termal aktivasyonu ile reaktif aluminasilikat yapı elde edilir. Silis dumanıyla (SD) rekabet edebilecek özelliklere sahip olması, MK ile ilgili

araştırmalara hız kazandırmıştır. MK'nin imento esaslı malzemelerin dayanım ve durabilite özellikleri üzerinde üç önemli etki mekanizması vardır. Bu etkiler; filler etkisi, Portland imentosunun hidratasyonunu hızlandırması ve puzolanik reaksiyon yapması olarak sıralanabilir. MK yapısında SiO_2 içeren bir malzeme olup Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrate yapı oluşturur [138]. Çalışmada kullanılan metakaoline ait kimyasal analiz değerleri Tablo 5.6'da verilmiştir.

şekil 5.2'de kullanılan mineral katkılara ait sterio mikroskopta çekilen görüntüleri verilmiştir.



şekil 5.2. Mineral katkıların görüntüleri

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Çalışmada Kullanılan ASR Test Yöntemleri

Tez çalışmasının bu bölümünde alkali silis reaksiyonunu belirlemede kullanılan deney metotları ile mineral katkıların ASR üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışma sürecinde harç çubuğu numuneleri (25×25×285mm) ile beton prizma (40×40×160mm) numuneleri üretilmiştir. Bu numune grupları ile;

1. Harç Çubuğu Deneyi (HÇD)-(ASTM-C 227)
2. Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi (HHÇD)-(ASTM-C 1260)
3. Otoklav Deneyi
4. Beton Prizma Deneyi (BPD)-(ASTM-C 1253) gerçekleştirilmiştir.

Farklı deney metotları ile önce mineral katkıları ayrı ayrı farklı oranlarda kullanarak genleşme sonuçları edilmiştir. Çalışma sonucunda bulunan genleşme sonuçları ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Ayrıca farklı oranlarda mineral katkı ikame edilen harç çubuğu gruplarında en az genleşme değerlerini veren optimum karışım oran ve miktarların bulunması amaçlanmıştır.

6.2. Harç Çubuğu Deneyi Çalışmaları (HÇD) (ASTM-C 227)

Bu metot, belirli şartlarda kürlenmiş 25×25×285 mm boyutlarındaki harç numunelerinin belirtilen süre sonucundaki boy değişimlerinin (genleşme yüzdesi) ölçülerek çimento-agrega kombinasyonlarının reaktivitelerinin belirlenmesi esasına dayanır. Bu deney yönteminde öncelikle referans numune, uçucu kül ikameli, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve metakaolin mineral katkıları belirli oranlarda yer değiştirme yapılarak ve ayrıca muhtelif oranlarda mineral katkı karışımları içeren numuneler hazırlanarak ASR genleşme azalmaları izlenmiştir.

Bu deneyde, belirtilen gradasyonda agrega elenerek agrega/çimento oranı 2.25 ve yayılma değeri 105-120mm arasında olacak şekilde bir harç karışımı hazırlanarak 25×25×285 mm boyutundaki prizmatik kalıplara dökülerek dört adet harç numunesi hazırlanmıştır. Dökülen beton iklimlendirme kabiniinde 24 saat 20 °C’de, %100 bağıl nemde bekletilerek sertleşmesi sağlanmıştır. Çıkarılan numuneler bu halde iken ilk okuma değerleri kayıt altına alınmıştır. İlk okuma ölçümleri yapılan çubuklar harç çubukları su üzerinde, %100 bağıl nemde, 37.8°C’de alkali kazanında kürlenmiştir. Numuneler üzerinde 14günden başlayarak,28 gün, 2.ay, 3.ay, 4.ay ve devam eden 5.,6.,7.,8.,9.,10.,11.,12. aylarda numunelerde oluşan ASR genleşmeleri 0.002 mm hassasiyetle kaydedilmiştir. ASTM C33 standardına göre, reaktif olmayan agrega için genleşmeler altı ayda %0.10 ve üç ayda %0.05’in altında olmalıdır. Harç Çubuğu Deneyi ASTM-C 227 standardı normlarına uygun yürütülmüştür.

6.2.1. Deney numunelerinin hazırlanması

Öncelikle 0~8 mm aralığındaki kum eleme işlemine tabii tutuldu. Elek çapları ve karışıma girecek olan kum miktarları aşağıdaki gibidir. Kum miktarları 4 numune için ayarlanmıştır (Tablo 6.1).

Tablo 6.1. ASR deneyi için elek analizine uygun agrega hazırlama

Elek Analiz Tablosu						
Elek Serisi	No:8	No:16	No:30	No:50	No:100	
Karışıma Giren Kum Yüzdeleri	%10	%25	%25	%25	%15	
Karışıma Giren Kum Miktarları	132gr	330 gr	330 gr	330 gr	198 gr	











Şekil 6.1. Agreg a elek seti

A/C 2.25 ve S/C 0.47 olacak şekilde elenen agrega oran miktarları ile her grupta dörder numune üretilmiştir (Tablo 6.2).

Tablo 6.2. ASR deneyi harç numuneleri için uygun malzeme oran ve miktarları

Malzeme Türü	Elek Serisi					S/Ç Oranı	Su (ml)	Çimento (gr)	A/C Oranı
	İnce Agreg a (0-8mm. Kum)								
	No:8	No:16	No:30	No:50	No:100				
	% 10	%25	%25	%25	%15				
Malzeme Miktarları	132 gr.	330 gr.	330 gr.	330 gr.	198 gr.	0.47	275.9	587.5	2.25

Yukarıda tabloda görüldüğü gibi karışıma girecek malzemeler ile uygun karışım hazırlanmıştır. Harç numuneleri Şekil 6.2’de anlatılan deney süreci çerçevesinde hazırlanmış olup genleşme değerleri elde edilmiştir.

		
<p>a- Malzeme kuru karışım hazırlama</p>	<p>b- Malzemeleri harç mikserinde hazırlama</p>	<p>c- Sarma tablası deneyi ile harç yayılma miktarını bulma</p>
		
<p>d- Teflon sprej ile yağlanan kalıba pim ve harç yerleştirme</p>	<p>e- Harcı masa vibratöründe uygun yerleştirme</p>	<p>f- 20° C derece ve %100 bağıl nem ortamında harcın kür edilmesi</p>
		
<p>g- 24 saat sonra katılaştıran harç çubuklarını kalıptan çıkarma</p>	<p>h- İlk boy okuma değerlerini dijital komparatörle bulma bundan sonra numuneler uygun koşullarda saklanarak diğer okuma tarihleri beklenir</p>	<p>ı- İlk okuma değerleri alınan numunelerin deney türüne uygun saklama kapları</p>

Şekil 6.2. Deney sürecinin fotoğraflarla açıklamaları

6.2.2. Harç çubuklarının üretimi

25×25×285 mm harç kalıpları teflon sprej kalıp yağı ile yağlanmıştır. Kalıp uç kısımlarına harç çubuklarının boy değişimlerini ölçmek için, 7 mm çapında ve 32 mm boyundaki pirinçten üretilmiş pimler kalıplarda açılan deliklere yerleştirilmiştir. Kalıplara yerleşen harç uygun şekilde vibrasyona tabi tutulmuştur. 24 saat sürecek şekilde 20°C sıcaklıkta % 90 bağıl nem olan iklimlendirme kabineye konmuştur. 24 saat sonra kabinden çıkan numuneler kalıplardan çıkartılarak ilk ölçümleri yapılmıştır.

6.2.3. Kalıplara harç yerleştirilişi ve kür edilişi

Kalıplara harç yerleştirilirken şişlenerek sıkıştırılmalıdır. Kalıplar %90 nispi nem bulunan iklimlendirme kabininde $23 \pm 1,7$ °C’ de 24 saat bekletilmiştir.

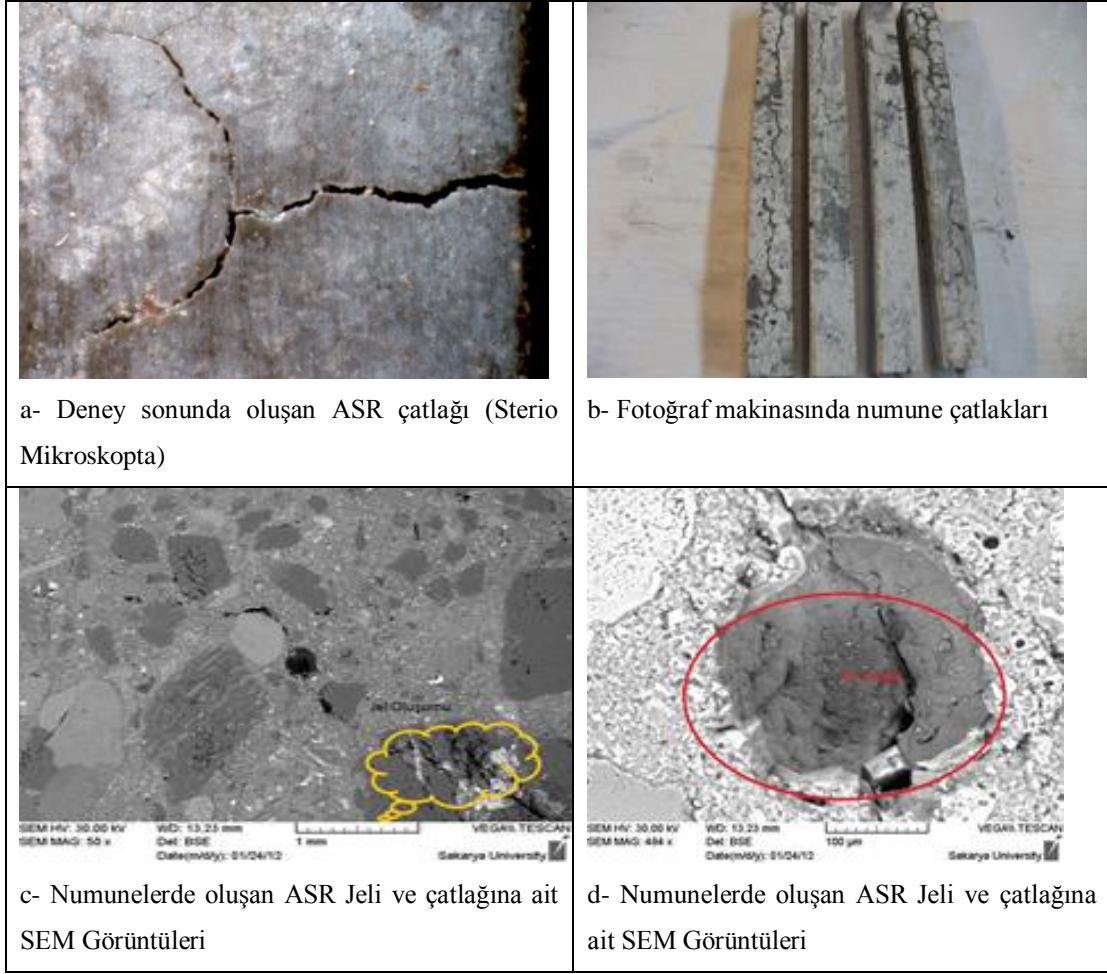
Daha sonra harç çubuklarının boyları ölçülerek, alt bölgesinde su haznesi bulunan ve bu haznesi yarıya kadar su doldurulan bir kap içerisine konmuştur. Bu kap içerisindeki su, örnekler ile temas etmeyecek şekilde yüksek bağıl nemi (%100) sağlamalıdır. Bu şekilde tasarlanmış kap içerisine konulan numuneler $37,8 \pm 1,7$ °C’de sabit ısıdaki tanklara yerleştirilmiştir.

6.2.4. Harç çubuklarının boylarının ölçüm zamanları

Harç çubukları üzerindeki ölçümler ilk olarak 14. gün, sonra 1., 2., 3., 4., 6., 9., 12. aylar ve daha sonra gerekirse her 6 ayda bir uzunluk değişimi ölçülmektedir. Örneklerin boy ölçümleri alınmadan 16 saat önce saklama kapları kapalı bir şekilde $23 \pm 1,7$ °C de kür odasına konarak soğumaya bırakılmalıdır. Bu işlemin ardından dijital komparatörle harç çubukları üzerinde boy ölçümleri yapılmıştır

6.2.5. Sonuçların değerlendirilmesi

Birim boy değişim yüzdelerini belirlemede aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır; ASTM C 227’ye göre boy değişimindeki verilerin 12. ay sonunda %0,1 genleşme sınırını aşması durumunda agrega, alkali silika reaktivitesi açısından “zararlıdır” sınıflandırması yapılmaktadır. Bu test metodunun dezavantajı test sürenin uzun ve zahmetli olmasıdır. Sonuçların değerlendirilmesinde kullanılan çatlak oluşumları Şekil 6.3’de.görülmektedir.



şekil 6.3. Numunelerde oluşan çatlak ve jel görüntüleri

6.3. Harç ubuğu Deneyleri

Referans ve mineral katkılar ile yer değiştirme ile hazırlanan deneysel çalışmaların sonuçları alt bölümlerde detaylandırılmıştır.

6.3.1. Referans numunede harç çubuğu deneyi sonuçları

A1 agregası ile aşağıda verilen oran ve miktarlarda malzeme kullanılarak 3 adet numune üretilmiştir (Tablo 6.3). Harç ubuğu deneyinde referans numune 12. ay genleşme değerleri Tablo 6.4'de, genleşme sonuçları şekil 6.4'de görülmektedir.

Tablo 6.3. Harç çubuğu deneyinde referans numune karışım oran ve miktarları

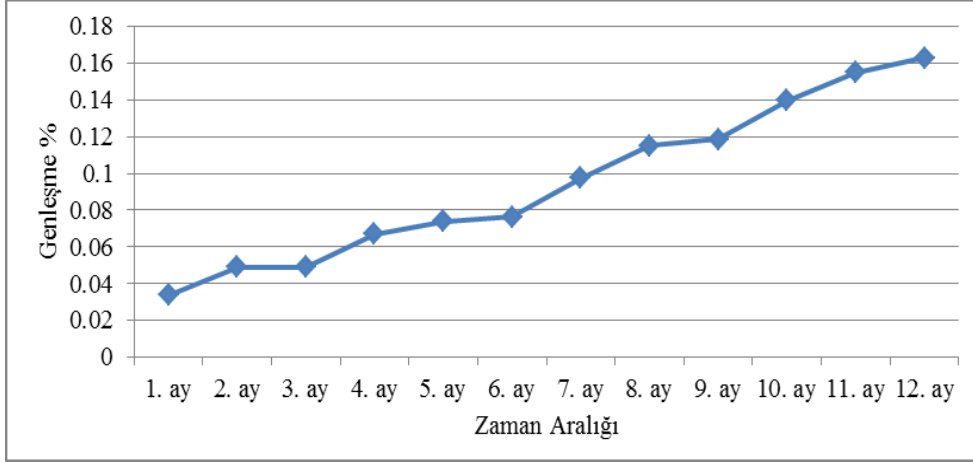
Malzeme Türü	Elek Çapları					S/Ç	Su(ml)	Çimento(gr.)
	No:8	No:16	No:30	No:50	No:100			
	0-8 mm ince agrega							
% Oranı	% 10	% 25	% 25	% 25	% 15			
Miktarı(gr)	132	330	330	330	198	0.47	276	587

Tablo 6.4. Harç çubuğu deneyinde referans numune 12. ay genişleme değerleri, Duncan çoklu karşılaştırma sonuçları

Zaman aralığı (Ay)	N	Farklı zamanlarda genişleme okuma ortalamaları $p \leq 0.05$					
		1	2	3	4	5	6
1.ay	3	0.0338	-	-	-	-	-
2.ay	3	0.0489	-	-	-	-	-
3.ay	3	0.0489	-	-	-	-	-
4.ay	3	-	0.0670	-	-	-	-
5.ay	3	-	0.0738	-	-	-	-
6.ay	3	-	0.0763	-	-	-	--
7.ay	3	-	-	0.0973	-	-	-
8.ay	3	-	-	-	0.1151	-	-
9.ay	3	-	-	-	0.1184	-	-
10.ay	3	-	-	-	-	0.1397	-
11.ay	3	-	-	-	-	-	0.1549
12.ay	3	-	-	-	-	-	0.1628

Referans numune harç çubuğu ASR deneyi genişleme değerleri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre;

1. Referans numunede zamana bağlı olarak ASR genişleme değerlerinde yükselme meydana geldiği,
2. Genişleme değerleri bakımından 12.ay sonunda oluşan genişlemenin 6.ay değerine göre %53 oranında arttığı,
3. 12 aylık toplam genişleme miktarının yaklaşık %47 sinin 6 ayda gerçekleştiği görüldü.



Şekil 6.4. Referans numune harç çubuğu deneyi 12 aylık genleşme sonuçları

6.3.2. Uçucu kül ikameli numunelerde harç çubuğu deneyi sonuçları

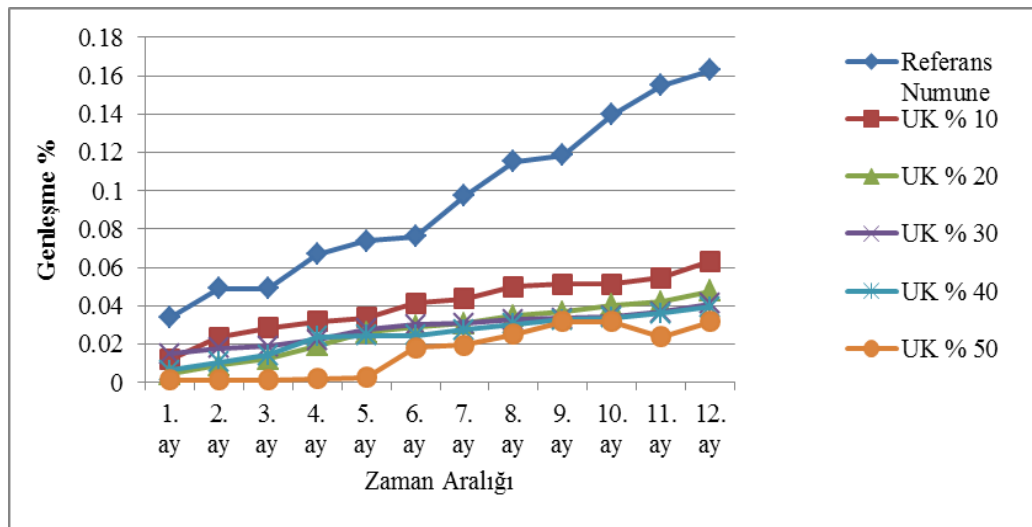
A1 agregası ve Uçucu kül ikamesinde Tablo.6.5’de verilen oran ve miktarlarda malzeme kullanılarak %10~%50 aralığında olmak üzere her grup için dörder adet numune üretilmiştir. Tablo.6.6’da genleşme değerleri ve Şekil 6.5’de genleşme sonuçları görülmektedir.

Tablo 6.5. Harç çubuğu deneyinde uçucu kül ikameli numune karışım oranları

Katkı Oranları	Agrega (gr)	Çimento (gr)	Uçucu Kül	Su (gr)	S/Ç	A/Ç
Referans Karışım	1320	587	-	276	0.47	2.25
10% UK	1320	528.3	58.7	276	0.47	2.25
20% UK	1320	469.6	117.4	276	0.47	2.25
30% UK	1320	410.9	176.1	276	0.47	2.25
40% UK	1320	352.2	234.8	276	0.47	2.25
50% UK	1320	293.5	293.5	276	0.47	2.25

Tablo 6.6. Uçucu kül ikameli numunelerde 12 aylık genleşme değerleri

Gruplar Zaman	Referans Numune	UK % 10	UK % 20	UK % 30	UK % 40	UK % 50
1. ay	0.0338	0.012	0.004	0.0149	0.006	0.001
2. ay	0.0489	0.0234	0.009	0.018	0.011	0.001
3. ay	0.0489	0.0284	0.012	0.0188	0.014	0.001
4. ay	0.067	0.0316	0.019	0.0223	0.024	0.002
5. ay	0.0738	0.0337	0.026	0.0279	0.025	0.003
6. ay	0.0763	0.0412	0.029	0.0303	0.025	0.018
7. ay	0.0973	0.0438	0.031	0.0307	0.027	0.019
8. ay	0.1151	0.0501	0.035	0.0329	0.031	0.025
9. ay	0.1184	0.0513	0.037	0.0336	0.033	0.032
10. ay	0.1397	0.0513	0.04	0.0346	0.034	0.032
11. ay	0.1549	0.0547	0.042	0.0367	0.036	0.024
12. ay	0.1628	0.0634	0.048	0.041	0.04	0.032



Şekil 6.5. Referans ve uçucu kül ikameli numunelere ait harç çubuğu deneyi genleşme sonuçları

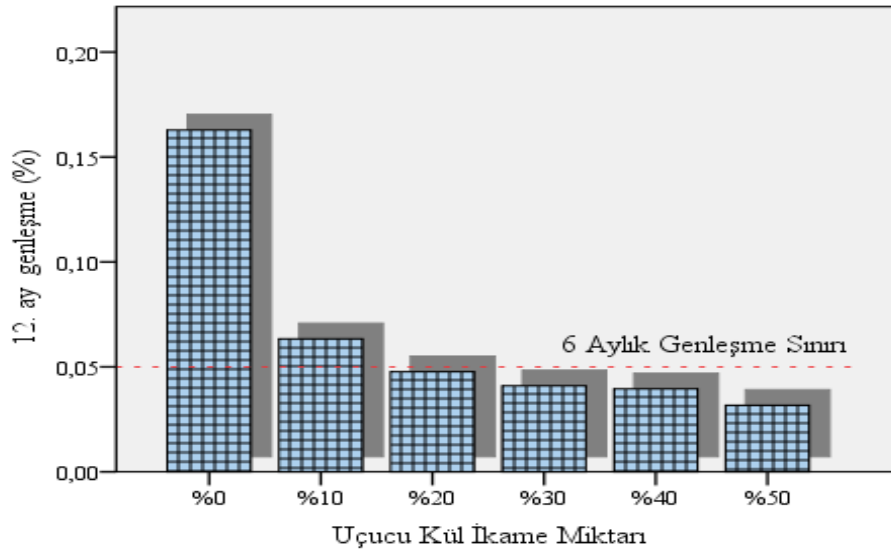
6.3.2.1. Uçucu kül ikameli numunelere ait varyans analizi sonuçları

Uçucu kül ikame edilmiş harç çubukları üzerinde gerçekleştirilen harç çubuğu ASR deneyi genleşme sonuçları varyasyon analizine tabi tutulmuş olup, genleşme değerlerine ait açıklayıcı istatistikler Tablo 6.7’de verilmiştir. Ayrıca elde edilen deney sonuçlarına ait ortalama genleşme miktarlarını gösteren grafik Şekil 6.6’da görülmektedir. Gerçekleştirilen deney sonuçları üzerinde uçucu kül ikamesinin ASR

üzerine etkilerini değerlendirebilmek amacıyla varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizine ait sonuçlar Tablo 6.8’de verilmiştir.

Tablo 6.7. Uçucu kül ikameli numunelerde harç çubuğu ASR deneyi 12. ay sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler

Uçucu Kül İkame Miktarı	N	Ortalama Genleşme Değeri	Standart Sapma	Standart Hata	95% güven aralığında ortalamannın		Minimum	Maksimum
					Alt sınırı	Üst sınırı		
0	3	0.1628	0.0016	0.00090	0.1589	0.1667	0.16	0.16
%10	3	0.0634	0.0056	0.00320	0.0496	0.0772	0.06	0.07
%20	3	0.0477	0.0108	0.00621	0.0209	0.0744	0.04	0.05
%30	3	0.0410	0.0065	0.00375	0.0249	0.0571	0.04	0.05
%40	3	0.0395	0.0033	0.00190	0.0314	0.0477	0.04	0.04
%50	3	0.0318	0.0014	0.00079	0.0283	0.0352	0.03	0.03



Şekil 6.6. Referans ve uçucu kül ikameli numunelerin 12. ay genişleme sonuçları

Tablo 6.8. Uçucu kül ikameli numunelere ait varyans analizi sonucu

Varyansın kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-testi	Anlamlılık Düzeyi $p \leq 0,05$
Gruplar arası	0.037	5	0.007	215.253	0.000
Gruplar içi	-	12	-	-	-

Gerçekleştirilen varyans analizine göre gruplar arasında istatistiksel anlamda önemli farklılıkların olduğu ($p \leq 0,05$) görülmüştür. Diğer bir ifadeyle uçucu kül ikame miktarına bağlı olarak ASR genişleme miktarlarının önemli derecede değiştiği söylenebilir. Gruplar arasındaki farklılığın hangi düzeylerde (gruplardan kaynakladığı) olduğunu tespit edebilmek amacıyla Duncan çoklu karşılaştırma testi gerçekleştirilmiştir (Tablo 6.9).

Tablo 6.9. Uçucu kül ikameli numunelerde duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları

Uçucu Kül İkame Miktarı (%)	Numune Adedi	Farklı olan gruplar ($p \leq 0.05$)			
		1	2	3	4
%50	3	0.0318	-	-	-
%40	3	0.0395	0.0395	-	-
%30	3	0.0410	0.0410	-	-
%20	3	-	0.0477	-	-
%10	3	-	-	0.0634	-
0 Referans	3	-	-	-	0.1628

Uçucu kül ikameli numunelerde harç çubuğu ASR deneyi 12. ay sonundaki genişleme sonuçları üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre;

1. Uçucu kül ikameli tüm numunelerde referans numuneye göre ASR genişleme değerlerinde azalmanın meydana geldiği,
2. %20~%50 uçucu kül ikame edilen numunelerde genişleme değerleri bakımından kendi içlerinde önemli bir değişikliğin olmadığı,
3. %20 ve üzeri uçucu kül ikame edildiğinde, numunelerdeki genişleme miktarı, referans numuneye göre %71 oranında azaldığı,
4. %10 oranında yüksek fırın cürufu ikame edildiğinde, numunelerdeki genişleme miktarı, referans numuneye göre %61 oranında azaldığı görülmüştür.
5. Literatür araştırmalarında görüldüğü üzere %20-%25 üzeri uçucu kül kullanıldığında ASR genişlemelerinin son derece azaldığı çalışmamızda da görülmüştür

6.3.3. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde harç çubuğu deneyi sonuçları

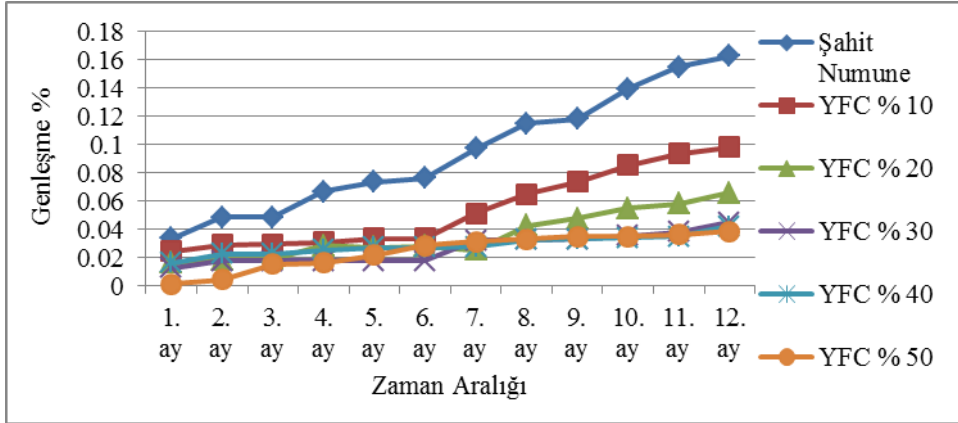
Harç çubuğu deneyi için Tablo 6.10 de yer alan oran ve miktarlarda çimento ile YFC kısmi yer değiştirme yapılarak her bir gruba ait dörder adet numune hazırlanmıştır. Tablo.6.11’de genleşme değerleri ve Şekil 6.7’de genleşme grafiği görülmektedir.

Tablo 6.10. Yüksek fırın cürufu ikameli numune karışım oranları

Katkı Oranları	Agrega (gr)	Çimento (gr)	YFC	Su (gr)	S/C	A/C
Referans Karışım	1320	587	-	276	0.47	2.25
10% YFC	1320	528.3	58.7	276	0.47	2.25
20% YFC	1320	469.6	117.4	276	0.47	2.25
30% YFC	1320	410.9	176.1	276	0.47	2.25
40% YFC	1320	352.2	234.8	276	0.47	2.25
50% YFC	1320	293.5	293.5	276	0.47	2.25

Tablo 6.11. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelere ait 12 aylık genleşme değerleri

Gruplar Zaman	Referans Numune	YFC % 10	YFC % 20	YFC % 30	YFC % 40	YFC % 50
1. ay	0.0338	0.025	0.016	0.013	0.016	0.002
2. ay	0.0489	0.029	0.019	0.018	0.023	0.005
3. ay	0.0489	0.03	0.019	0.018	0.023	0.015
4. ay	0.067	0.031	0.029	0.018	0.025	0.016
5. ay	0.0738	0.034	0.027	0.018	0.027	0.022
6. ay	0.0763	0.034	0.028	0.018	0.027	0.029
7. ay	0.0973	0.051	0.025	0.032	0.028	0.032
8. ay	0.1151	0.065	0.043	0.033	0.033	0.033
9. ay	0.1184	0.074	0.048	0.033	0.033	0.035
10. ay	0.1397	0.086	0.055	0.036	0.034	0.035
11. ay	0.1549	0.094	0.058	0.038	0.035	0.036
12. ay	0.1628	0.098	0.066	0.045	0.042	0.039



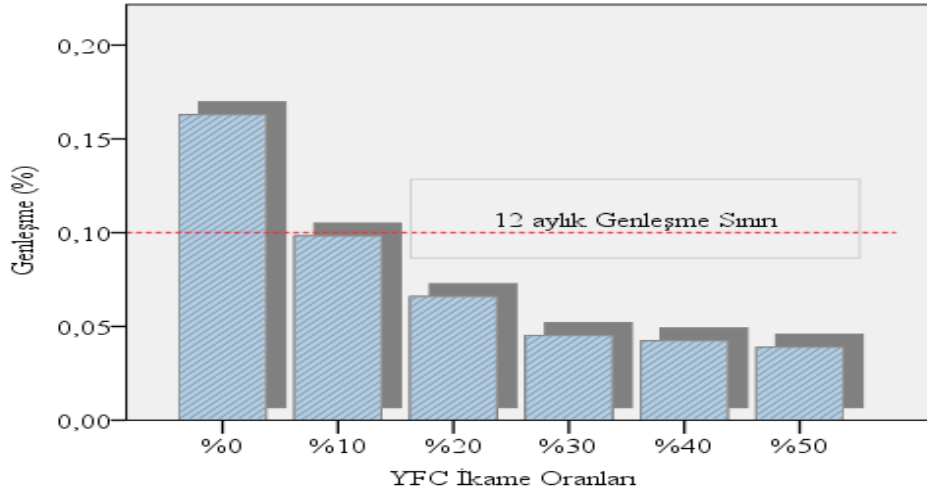
Şekil 6.7. Referans ve YFC ikameli numunelere ait harç çubuğu deneyi genleşme sonuçları

6.3.3.1. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelere ait varyans analizi sonuçları

YFC ikame edilmiş harç çubukları üzerinde gerçekleştirilen harç çubuğu ASR deneyi genleşme sonuçları varyasyon analizine tabi tutulmuş olup, genleşme değerlerine ait açıklayıcı istatistikler Tablo 6.12’de verilmiştir. Ayrıca elde edilen deney sonuçlarına ait ortalama genleşme miktarlarını gösteren grafik Şekil 6.8’de görülmektedir. Gerçekleştirilen deney sonuçları üzerinde YFC ikamesinin ASR üzerine etkilerini değerlendirebilmek amacıyla varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizine ait sonuçlar Tablo 6.13’de verilmiştir.

Tablo 6.12. Referans ve YFC ikameli numunelerde ASR deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler

YFC İkame Miktarı	N	Ortalama Genleşme (%)	Standart Sapma	Standart Hata	95% güven aralığında ortalamanın		Minimum	Maksimum
					Alt sınırı	Üst sınırı		
0	3	0.1628	0.00157	0.00090	0.1589	0.1667	0.16	0.16
%10	3	0.0982	0.01999	0.01154	0.0485	0.1478	0.08	0.11
%20	3	0.0659	0.01406	0.00812	0.0309	0.1008	0.05	0.08
%30	3	0.0451	0.00977	0.00564	0.0208	0.0694	0.03	0.05
%40	3	0.0423	0.00665	0.00384	0.0257	0.0588	0.03	0.05
%50	3	0.0389	0.00276	0.00159	0.0320	0.0457	0.04	0.04



Şekil 6.8. Yüksek firm cürufu ikameli numunelerin 12. ay ortalama genişleme sonuçları

Tablo 6.13. Yüksek firm cürufu ikameli numunelere ait Varyans analizi sonucu

Varyansın kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-testi	Anlamlılık Düzeyi $p \leq 0,05$
Gruplar arası	0.035	5	0.007	55.920	0.000
Gruplar içi	0.001	12	-	-	-

Gerçekleştirilen varyans analizine göre gruplar arasında istatistiksel anlamda önemli farklılıkların olduğu ($p \leq 0,05$) görülmüştür. Diğer bir ifadeyle YFC ikame miktarına bağlı olarak ASR genişleme miktarlarının önemli derecede değiştiği söylenebilir. Gruplar arasındaki farklılığın hangi düzeylerde (gruplardan kaynakladığı) olduğunu tespit edebilmek amacıyla Duncan çoklu karşılaştırma testi gerçekleştirilmiştir (Tablo 6.14).

Tablo 6.14. Yüksek firm cürufu ikameli numunelerde duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları

Yüksek firm cürufu ikame miktarı (%)	Numune Adedi	Farklı olan gruplar ($p \leq 0.05$)			
		1	2	3	4
%50	3	0.0389	-	-	-
%40	3	0.0423	-	-	-
%30	3	0.0451	-	-	-
%20	3	-	0.0659	-	-
%10	3	-	-	0.0982	-
0 Referans	3	-	-	-	0.1628

YFC ikameli numunelerde harç çubuğu ASR deneyi 12. ay sonundaki genleşme sonuçları üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre; Yüksek Fırın Cürufu ikameli tüm numunelerde referans numuneye göre ASR genleşme değerlerinde azalmanın meydana geldiği,

1.%30 ~ %50 Yüksek fırın cürufu ikame edilen numunelerde genleşme değerleri bakımından kendi içlerinde önemli bir değişikliğin olmadığı,

2.%20 ~ %25 ve üzeri yüksek fırın cürufu ikame edildiğinde, numunelerdeki genleşme miktarı, referans numuneye göre %59.5 oranında azaldığı,

3.%10 oranında YFC ikame edildiğinde, numunelerdeki genleşme miktarı, referans numuneye göre %40 oranında azaldığı görülmüştür.

6.3.4. Silis dumanı ikameli numunelerde harç çubuğu deneyi

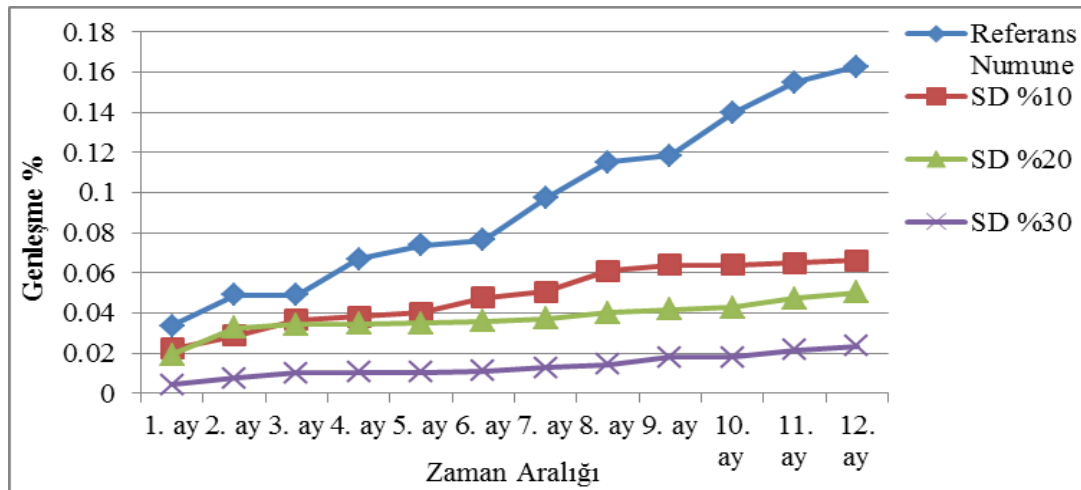
Silis Dumanı %10, %20 ve %30 ikame oranlarında çimento ile kısmi yer değiştirme yapılarak hazırlanan numune gruplarına ait karışım oran ve miktarları Tablo 6.15’de verilmiştir. Ayrıca Tablo 6.16’da genleşme değerleri ve Şekil 6.9’da genleşme grafiği görülmektedir.

Tablo 6.15. Silis dumanı ikameli numune karışım oranları

Katkı Oranları	Agrega (gr)	Çimento (gr)	Silis Dumanı	Su (gr)	S/C	A/C
Referans Karışım	1320	587	-	276	0.47	2.25
10% SD	1320	528.3	58.7	276	0.47	2.25
20% SD	1320	469.6	117.4	276	0.47	2.25
30% SD	1320	410.9	176.1	276	0.47	2.25

Tablo 6.16. Silis dumanı ikameli numunelere ait 12 aylık genişleme değerleri

	Referans Numune	SD %10	SD %20	SD %30
1. ay	0.0338	0.022	0.019	0.004
2. ay	0.0489	0.029	0.033	0.007
3. ay	0.0489	0.037	0.034	0.01
4. ay	0.067	0.038	0.035	0.01
5. ay	0.0738	0.04	0.035	0.01
6. ay	0.0763	0.048	0.036	0.011
7. ay	0.0973	0.051	0.037	0.013
8. ay	0.1151	0.061	0.04	0.014
9. ay	0.1184	0.064	0.042	0.018
10. ay	0.1397	0.064	0.043	0.018
11. ay	0.1549	0.065	0.047	0.022
12. ay	0.1628	0.066	0.05	0.023



Şekil 6.9. Referans ve SD ikameli numunelere ait harç çubuğu deneyi genişleme sonuçları

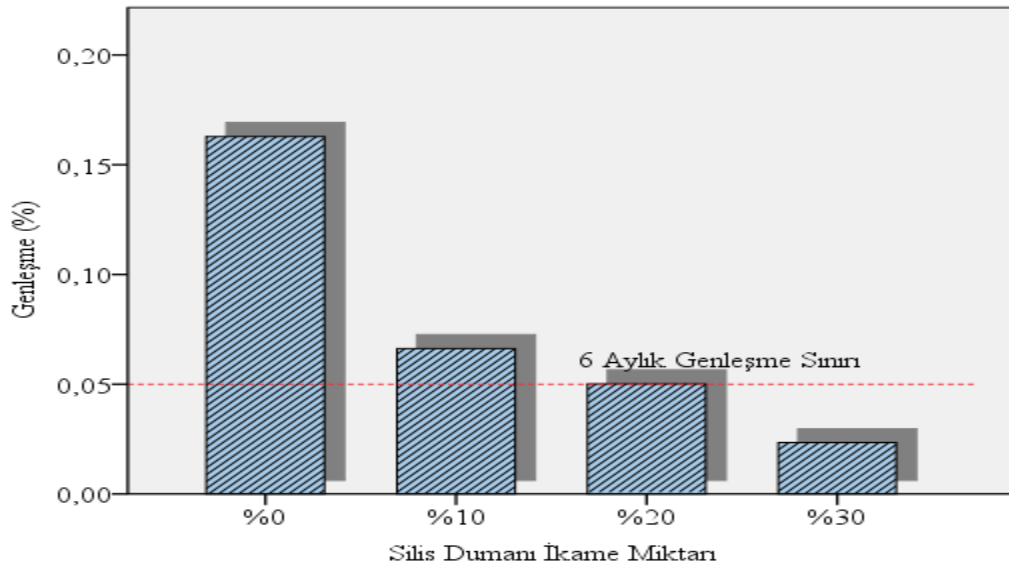
6.3.4.1. Silis dumanı ikameli numunelere ait varyans analizi sonuçları

Silis dumanı ikame edilmiş harç çubukları üzerinde gerçekleştirilen harç çubuğu ASR deneyi genişleme sonuçları varyasyon analizine tabi tutulmuş olup, genişleme değerlerine ait açıklayıcı istatistikler Tablo 6.17’de verilmiştir. Ayrıca elde edilen deney sonuçlarına ait ortalama genişleme miktarlarını gösteren grafik Şekil 6.10’da görülmektedir. Gerçekleştirilen deney sonuçları üzerinde silis dumanı ikamesinin ASR üzerine etkilerini değerlendirebilmek amacıyla varyans analizi

gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizine ait sonuçlar Tablo 6.18’de verilmiştir.

Tablo 6.17. Referans ve SD ikameli numunelerde ASR deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler

Silis Dumanı İkame Miktarı (%)	N	Ortalama Uzama (%)	Standart Sapma	Standart Hata	95% güven aralığında ortalamanın		Minimum	Maksimum
					Alt sınırı	Üst sınırı		
0	3	0.1628	0.00157	0.00090	0.1589	0.1667	0.16	0.16
10	3	0.0662	0.00872	0.00504	0.0445	0.0879	0.06	0.08
20	3	0.0502	-	-	0.0502	0.0502	0.05	0.05
30	3	0.0234	0.00352	0.00203	0.0146	0.0321	0.02	0.03



Şekil 6.10. Silis dumanı ikameli numunelerin ortalama genişleme sonuçları

Tablo 6.18. Silis dumanı ikameli numunelere ait varyans analizi sonucu

Varyansın kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-testi	Anlamlılık Düzeyi $p \leq 0,05$
Gruplar arası	0.033	3	0.011	486.7704	-
Gruplar içi	-	8	0.000	-	-

Gerçekleştirilen varyans analizine göre gruplar arasında istatistiksel anlamda önemli farklılıkların olduğu ($p \leq 0,05$) görülmüştür. Diğer bir ifadeyle Silis Dumanı ikame miktarına bağlı olarak ASR genişleme miktarlarının önemli derecede değiştiği söylenebilir. Gruplar arasındaki farklılığın hangi düzeylerde (gruplardan kaynaklandığı) olduğunu tespit edebilmek amacıyla Duncan çoklu karşılaştırma testi gerçekleştirilmiştir (Tablo 6.19).

Tablo 6.19. Silis dumanı ikameli numunelerde duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları

Silis Dumanı İkame Miktarı (%)	N	Farklı olan gruplar ($p \leq 0.05$)			
		1	2	3	4
%30	3	0.0234			
%20	3		0.0502		
%10	3			0.0662	
0 Referans Numune	3				0.1628

Silis dumanı ikameli numunelerde hızlandırılmış harç çubuğu ASR deneyi sonuçları üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre;

1. Silis Dumanı ikameli tüm numunelerde referans numuneye göre ASR genişleme değerlerinde azalmanın meydana geldiği,
2. %10 ~ %30 silis dumanı ikame edilen numunelerde genişleme değerleri bakımından kendi içlerinde önemli bir değişikliğin olduğu,
3. %30 ve üzeri silis dumanı ikame edilen numunelerde, referans numuneye göre %86 oranında genişleme değerlerini azalttığı,
4. %20 ve üzeri silis dumanı ikame edilen numunelerde, referans numuneye göre %69 oranında genişleme değerlerini azalttığı,
5. %10 ve üzeri silis dumanı ikame edilen numunelerde, referans numuneye göre %59 oranında genişleme değerlerini azalttığı, görülmüştür.

Silis dumanının ASR genişmelerini engellediği hususunda kanaatlerimiz hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonuçlarında açıklanmıştır. Deneysel çalışmamız sonuçlarına bakarak reaktif alkali içeren agrega ile silis parçacıklarının reaksiyona girmesi sonucu harç çubuklarında çatlaklar oluştuğu görülmüştür.

6.4. Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyleri (ASTM–C 1260)

Bu deney metodu, alkali reaktivitesi belirlenecek agregalar ile üretilen harç çubuklarının alkalitesi yüksek çözelti içerisinde, yüksek sıcaklıkta saklanması ve uzunluk değişimlerinin ölçülmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bütün harç çubuğu yöntemlerinde numuneler ASTM-C227 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Öncelikle 0-7 mm aralığındaki kum eleme işlemine tabii tutulmuştur. Elek çapları ve karışıma girecek olan kum miktarları aşağıdaki gibidir (Tablo 6.20). Kum miktarları 4 numune için ayarlanmıştır (Tablo 6.21).

Tablo 6.20. ASR deneyi için elek analizine uygun agrega hazırlama

Elek Analiz Tablosu					
Elek Serisi	No:8	No:16	No:30	No:50	No:100
Karışıma Giren Kum Yüzdeleri	%10	%25	%25	%25	%15
Karışıma Giren Kum Miktarları(gr)	132	330	330	330	198

Tablo 6.21. ASR deneyi harç numuneleri için uygun malzeme oran ve miktarları

Malzeme Türü	Elek Serisi					S/Ç	Su (ml)	Çiment o (gr)	A/Ç
	İnce Agregası (0-7mm. Kum)								
	No:8	No:16	No:30	No:50	No:100				
	%10	%25	%25	%25	%15				
Malzeme Miktarları (gr)	132	330	330	330	198	0.47	275.9	587.5	2.25

Yukarıda tabloda görüldüğü gibi karışıma girecek malzemeler harç mikserinde uygun karışım hazırlanmıştır. 25×25×285 mm harç kalıpları teflon spreylenmiş kalıp yağı ile yağlanmıştır. Kalıp uç kısımlarına harç çubuklarının boy değişimlerini ölçmek için, 7 mm çapında ve 32 mm boyundaki pirinçten üretilmiş pimler kalıplarda açılan deliklere yerleştirilmiştir. Kalıplara yerleşen harç uygun şekilde vibrasyona tabii tutulmuştur. 24 saat sürecek şekilde 20°C sıcaklıkta % 90 bağıl nem olan iklimlendirme kabineye konmuştur. 24 saat sonra kabinden çıkan numuneler

kalıplardan çıkartılarak ilk ölçümleri yapılmıştır. Bu ilk okuma L_0 olarak adlandırılmıştır.

Okuması yapılan numuneler yine 24 saat sürecek şekilde 80°C sıcaklıkta % 100 bağıl nem olan sıcak saf su kabine konmuştur. 24 saat sonra kabinden çıkan numuneler kalıplardan çıkartılarak ikinci ölçümleri yapılmıştır. Buna ikinci gün okuması dedik. 1 litre suya 40 gr sodyum hidroksit gelecek şekilde hazırlanan solüsyon içerisinde ölçümleri alınan numuneleri yerleştirilmiştir. 3.,7.,14. ve 28. gün ölçümleri yapılacak şekilde numuneler 80°C sıcaklıkta % 100 bağıl nem olan sıcak sodyum hidroksitli su kabine konulmuştur. Genellikle tüm deney sürecimiz 28 günü kapsayacak şekilde gerçekleşmiştir. İkinci okumanın ardından yapılan 3. gün, 5. gün, 7. gün, 9. gün, 14. gün, 16. gün ve 28. gün okuma değerleri alınmıştır. Alınan boy değişim değerleri analiz ve grafiklerle değerlendirilip, sonuçlar tespit edilmiştir.

6.4.1. Referans numunede hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonuçları

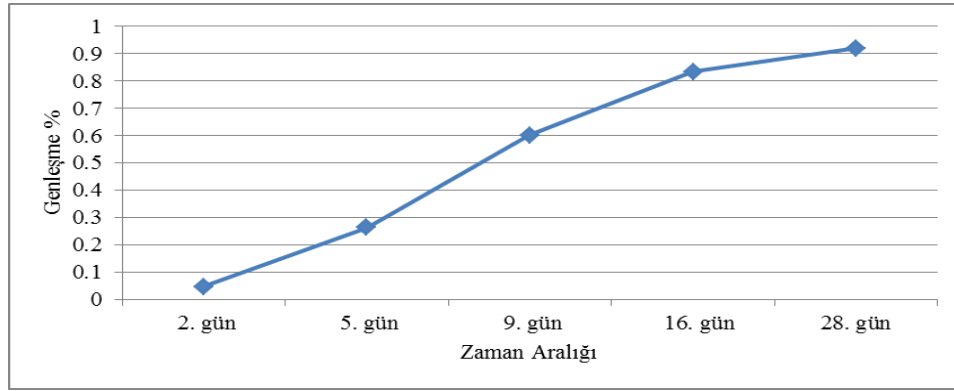
A1 agregasını alkali reaktivite yönünden incelediğimiz bu deney numunelerine ait karışım oran ve miktarları Tablo 6.22’de verilmiştir. Ayrıca Tablo.6.23’de genleşme değerleri ve Şekil 6.11’de genleşme grafiği görülmektedir.

Tablo 6.22. Referans numune malzeme karışım oran ve miktarları

Malzeme Türü	Elek Çapları					S/Ç	Su (ml)	Çimento (gr.)
	No:8	No:16	No:30	No:50	No:100			
	0-8 mm ince agrega							
% Oranı	10	25	25	25	5			
Miktarı(gr)	132	330	330	330	198	0.47	276	587

Tablo 6.23. Referans numune hızlandırılmış harç çubuğu deneyi genleşme değerleri


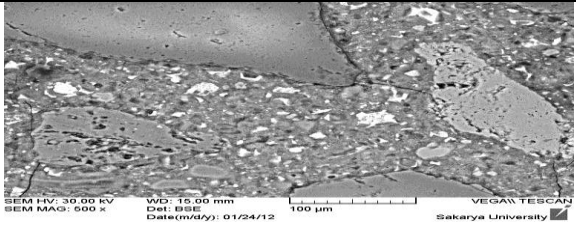
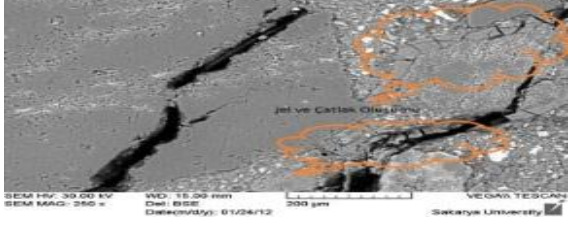
Numune Yaşı	Referans Numune Genleşme Değeri
2. gün	0.044972
5. gün	0.26226
9. gün	0.601921
16. gün	0.834689
28. gün	0.920565



Şekil 6.11. Referans numune hızlandırılmış harç çubuğu deneyi genleşme sonuçları

Yapılan deney sonuç grafiğine göre;

1. İlk günden başlayarak deney sonuna kadar genleşme değerlerinde yükselme görülmüştür.
2. 14. gün değerlerine bakarak deneyin 28 gün devamına karar verilmiştir.
3. 28. gün sonunda genleşme değerinin 0.92 seviyesine çıktığı tespit edilmiştir.
4. Bu sonuca göre deneylerimizde kullandığımız agreganın yüksek reaktif olduğu gözlenmiştir.(Şekil.6.12)

Referans Numune Sterio Mikroskopta Çatlak Oluşumu ve SEM Görüntüsü		
Referans Mikroskopta Görüntüsü	Numune Çatlak	
Referans Görüntüsü 1	Numune SEM	
Referans Görüntüsü 2	Numune SEM	

Şekil 6.12. Referans numuneye ait stereo mikroskopta çatlak ve SEM görüntüleri

6.4.2. Uçucu kül katkı ikameli numunelerde hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonuçları

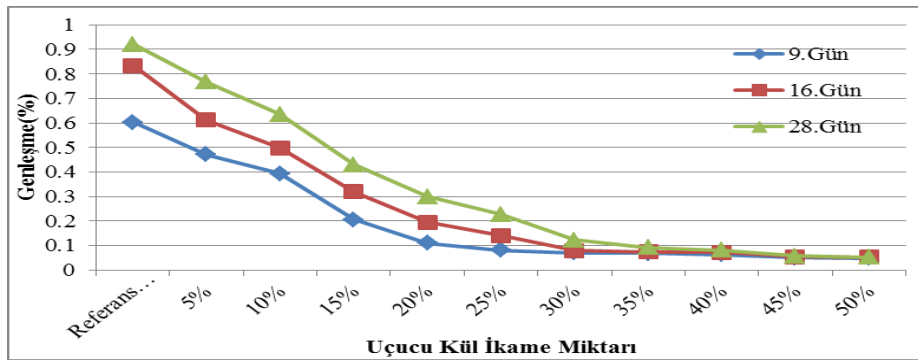
Uçucu kül ikameli olarak Tablo 6.24’de verilen oran ve miktarlarda numune grupları hazırlanmıştır. Bunlara ait 28 gün süreli belirli periyotlarla genleşme değerleri tespit edilmiştir. Tablo 6.25’de genleşme değerlerine ait değişim grafiği Şekil 6.13’de görülmektedir.

Tablo 6.24. UK ikameli numunelerde malzeme karışım oran ve miktarları

Katkı Oranları	Agrega (gr)	Çimento (gr)	Uçucu Kül	Su (ml)	S/Ç	A/Ç
Referans Karışım	1320	587	-	276	0.47	2.25
%5 UK	1320	557.65	29.35	276	0.47	2.25
%10 UK	1320	528.3	58.7	276	0.47	2.25
%15 UK	1320	528.3	88.05	276	0.47	2.25
%20 UK	1320	469.6	117.4	276	0.47	2.25
%25 UK	1320	528.3	146.75	276	0.47	2.25
%30 UK	1320	410.9	176.1	276	0.47	2.25
%35 UK	1320	528.3	205.45	276	0.47	2.25
%40 UK	1320	352.2	234.8	276	0.47	2.25
%45 UK	1320	528.3	264.15	276	0.47	2.25
%50 UK	1320	293.5	293.5	276	0.47	2.25

Tablo 6.25. Referans ve UK ikameli numunelerde 28 gün genleşme değerleri

Numune Yaşı	Referans Numune	%5 UK	%10 UK	%15 UK	%20 UK	%25 UK	%30 UK	%35 UK	%40 UK	%45 UK	%50 UK
9.Gün	0,602	0,47	0,39	0,206	0,11	0,08	0,07	0,07	0,06	0,05	0,048
16.Gün	0,835	0,61	0,5	0,319	0,19	0,14	0,08	0,07	0,07	0,05	0,051
28.Gün	0,921	0,77	0,63	0,429	0,3	0,23	0,12	0,09	0,08	0,06	0,052



Şekil 6.13. Referans ve uçucu kül ikameli numunelerde genleşme sonuçları

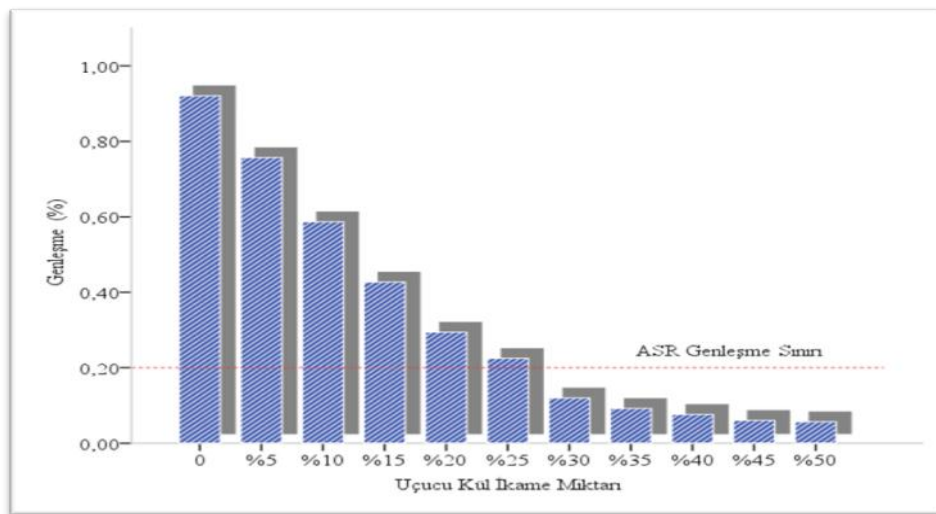
6.4.2.1. Uçucu kül ikameli numunelere ait varyans analizi sonuçları

Uçucu kül ikame edilmiş harç çubukları üzerinde gerçekleştirilen harç çubuğu ASR deneyi genleşme sonuçları varyans analizine tabi tutulmuş olup, genleşme değerlerine ait açıklayıcı istatistikler Tablo 6.26'da verilmiştir. Ayrıca elde edilen

deney sonuçlarına ait 28 günlük ortalama genişleme miktarlarını gösteren grafik Şekil 6.14’de görülmektedir. Gerçekleştirilen deney sonuçları üzerinde uçucu kül ikamesinin ASR üzerine etkilerini değerlendirebilmek amacıyla varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizine ait sonuçlar Tablo 6.27’de verilmiştir.

Tablo 6.26. Uçucu kül ikameli numunelerde ASR deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler

UK İkame Miktarı (%)	N	Ortalama Uzama (%)	Standart Sapma	Standart Hata	95% güven aralığında ortalamanın		Minimu m	Maksimu m
					Alt sınırı	Üst sınırı		
0	3	0.921	0.02212	0.01277	0.866	0.976	0.91	0.95
%5	3	0.757	0.01977	0.01142	0.708	0.806	0.73	0.77
%10	3	0.587	0.00607	0.00350	0.572	0.602	0.58	0.59
%15	3	0.427	0.00595	0.00344	0.412	0.442	0.42	0.43
%20	3	0.292	0.01073	0.00620	0.268	0.321	0.28	0.30
%25	3	0.225	0.00288	0.00166	0.218	0.232	0.22	0.23
%30	3	0.120	0.00778	0.00449	0.101	0.140	0.11	0.13
%35	3	0.092	0.00448	0.00258	0.081	0.103	0.09	0.10
%40	3	0.077	0.01445	0.00834	0.041	0.112	0.06	0.09
%45	3	0.061	0.00636	0.00367	0.045	0.076	0.05	0.06
%50	3	0.057	0.00427	0.00246	0.046	0.067	0.05	0.06



Şekil 6.14. Referans ve uçucu kül ikameli numunelerin 28.gün genişleme sonuçları

Tablo 6.27. Uçucu kül ikameli numunelere ait varyans analizi sonucu

Varyansın kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-testi	Anlamlılık Düzeyi $p \leq 0,05$
Gruplar arası	2.793	10	0.279	2157.938	0.000
Gruplar içi	0.003	22	-	-	-

Gerçekleştirilen varyans analizine göre gruplar arasında istatistiksel anlamda önemli farklılıkların olduğu ($p \leq 0,05$) görülmüştür. Diğer bir ifadeyle UK ikame miktarına bağlı olarak ASR genişleme miktarlarının önemli derecede değiştiği söylenebilir. Gruplar arasındaki farklılığın hangi düzeylerde (gruplardan kaynakladığı) olduğunu tespit edebilmek amacıyla Duncan çoklu karşılaştırma testi gerçekleştirilmiştir (Tablo 6.28).

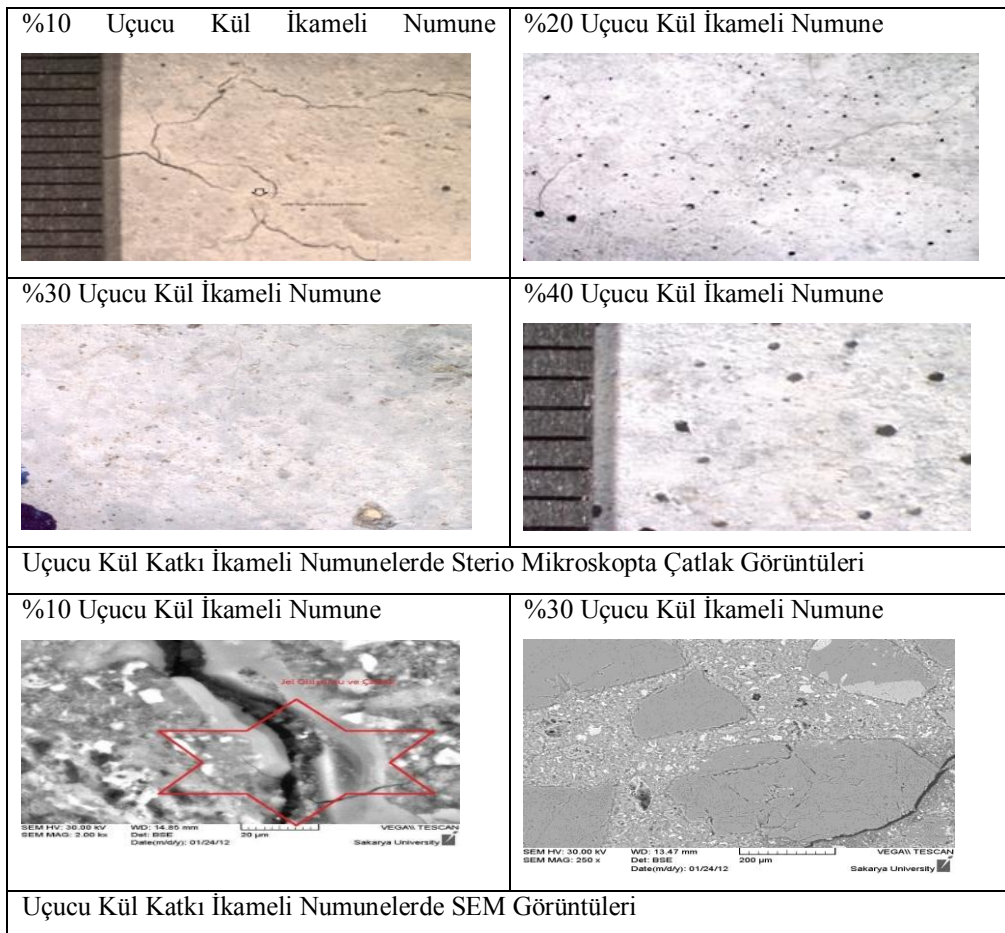
Tablo 6.28 Uçucu kül ikameli numunelerde duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları

Uçucu Kül Miktarı	N	Farklı olan gruplar ($p \leq 0.05$)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
%50	3	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-
%45	3	0.06	-	-	-	-	-	-	-	-
%40	3	0.07	0.07	-	-	-	-	-	-	-
%35	3	-	0.09	-	-	-	-	-	-	-
%30	3	-	-	0.120	-	-	-	-	-	-
%25	3	-	-	-	0.224	-	-	-	-	-
%20	3	-	-	-	-	0.294	-	-	-	-
%15	3	-	-	-	-	-	0.427	-	-	-
%10	3	-	-	-	-	-	-	0.586	-	-
%5	3	-	-	-	-	-	-	-	0.757	-
(Referans)	3	-	-	--	-	-	-	-	-	0.92

Uçucu kül ikameli numunelerde hızlandırılmış harç çubuğu ASR deneyi genişleme sonuçları üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre;

1. Uçucu kül ikameli tüm numunelerde referans numuneye göre ASR genişleme değerlerinde azalmanın meydana geldiği,
2. %5~ %30 oranlarında uçucu kül ikame edilen numunelerde genişleme miktarlarında önemli azalmaların meydana geldiği,

3. %35 ~ %50 UK ikame edilen numunelerde genleşme değerleri bakımından kendi içlerinde önemli bir değişikliğin olmadığı,
4. %25 ve üzeri uçucu kül ikame edildiğinde standartta belirtilen sınır değer civarında kaldığı, referans numuneye göre %76 oranında azalttığı,
5. %30 oranında uçucu kül ikame edildiğinde, numunelerdeki genleşme miktarı referans numuneye göre %87 oranında azaldığı,
6. %35 oranında uçucu kül ikame edildiğinde, numunelerdeki genleşme miktarı referans numuneye göre %90 oranında azaldığı,
7. %40 oranında uçucu kül ikame edildiğinde, numunelerdeki genleşme miktarı referans numuneye göre %92 oranında azaldığı,
8. %45 oranında uçucu kül ikame edildiğinde, numunelerdeki genleşme miktarı referans numuneye göre %93.4 oranında azaldığı görülmüştür.
9. %50 oranında uçucu kül ikame edildiğinde, numunelerdeki genleşme miktarı referans numuneye göre %93.8 oranında azaldığı görülmüştür.



Şekil 6.15. Uçucu kül ikameli numunelerde sterio mikroskopta çatlak ve SEM görüntüleri

6.4.3. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonuçları

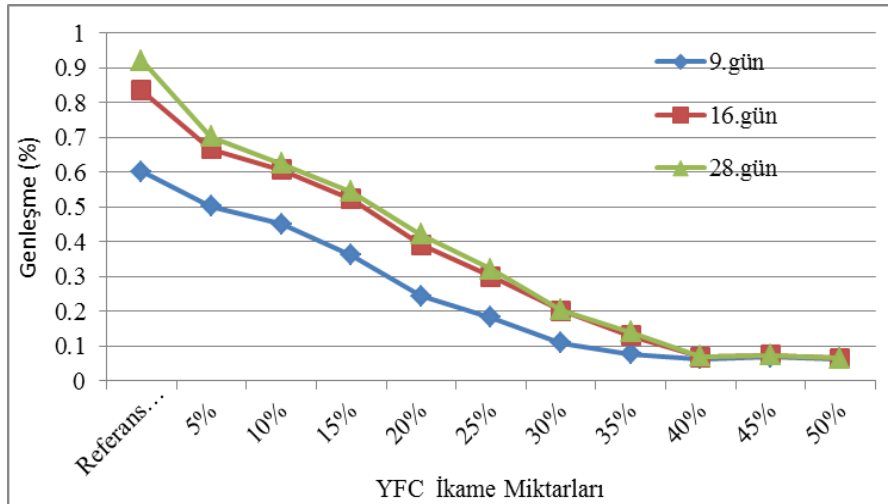
Yüksek fırın cürufu ikameli olarak Tablo 6.29’da verilen oran ve miktarlarda numune grupları hazırlanmıştır. Bunlara ait 28 gün süreli belirli periyotlarla genişleme değerleri tespit edilmiştir (Tablo 6.30). Genleşme değerlerine ait değişim grafiği Şekil 6.16’da görülmektedir.

Tablo 6.29. Referans ve YFC ikameli numunelerde malzeme karışım oran ve miktarları

Katkı Oranları	Agrega	Çimento	YFC	Su (ml)	S/Ç	A/Ç
	(gr)	(gr)				
Referans Karışım	1320	587	-	276	0.47	2.25
5 % YFC	1320	557.65	29.35	276	0.47	2.25
10% YFC	1320	528.3	58.7	276	0.47	2.25
15% YFC	1320	528.3	88.05	276	0.47	2.25
20% YFC	1320	469.6	117.4	276	0.47	2.25
25% YFC	1320	528.3	146.75	276	0.47	2.25
30% YFC	1320	410.9	176.1	276	0.47	2.25
35% YFC	1320	528.3	205.45	276	0.47	2.25
40% YFC	1320	352.2	234.8	276	0.47	2.25
45% YFC	1320	528.3	264.15	276	0.47	2.25
50% YFC	1320	293.5	293.5	276	0.47	2.25

Tablo 6.30. Referans ve YFC ikameli numunelerde 28 günlük genişleme değerleri

Numune Yaşı	Referans Numune	% 5	% 10	% 15	% 20	% 25	% 30	% 35	% 40	% 45	% 50
2.gün	0.045	0.055	0.055	0.053	0.055	0.052	0.056	0.058	0.044	0.059	0.060
5.gün	0.2623	0.286	0.251	0.191	0.124	0.078	0.071	0.067	0.056	0.062	0.060
9.gün	0.6019	0.503	0.452	0.362	0.244	0.182	0.110	0.078	0.064	0.069	0.062
16.gün	0.8347	0.668	0.607	0.522	0.392	0.301	0.203	0.131	0.069	0.074	0.065
28.gün	0.9206	0.702	0.625	0.543	0.422	0.321	0.205	0.141	0.070	0.074	0.066



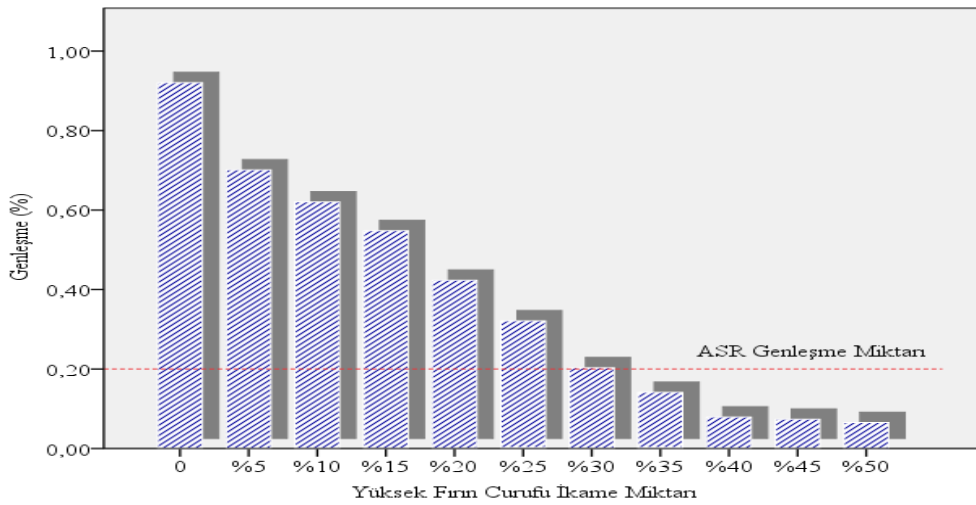
Şekil 6.16. Referans ve Yüksek fırın cürufu ikameli numunelere ait genleşme sonuçları

6.4.3.1. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelere ait varyans analizi sonuçları

YFC ikame edilmiş harç çubukları üzerinde gerçekleştirilen harç çubuğu ASR deneyi genleşme sonuçları varyans analizine tabii tutulmuş olup, genleşme değerlerine ait açıklayıcı istatistikler Tablo 6.31’de verilmiştir. Ayrıca elde edilen deney sonuçlarına ait ortalama genleşme miktarlarını gösteren grafik Şekil 6.17’de görülmektedir. Gerçekleştirilen deney sonuçları üzerinde YFC ikamesinin ASR üzerine etkilerini değerlendirebilmek amacıyla varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizine ait sonuçlar Tablo 6.32’de verilmiştir.

Tablo 6.31. YFC ikameli numunelerde ASR deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler

YFC İkame Miktarı (%)	N	Ortalama Uzama (%)	Standart Sapma	Standart Hata	95% güven aralığında ortalamanın		Minimum	Maksimum
					Alt sınırı	Üst sınırı		
0	3	0.9206	0.02212	0.01277	0.8656	0.9755	0.91	0.95
%5	3	0.7013	0.02072	0.01196	0.6498	0.7527	0.68	0.72
%10	3	0.6205	0.00986	0.00570	0.5960	0.6450	0.61	0.63
%15	3	0.5480	0.02260	0.01305	0.4919	0.6042	0.52	0.57
%20	3	0.4235	0.00331	0.00191	0.4152	0.4317	0.42	0.43
%25	3	0.3214	0.01481	0.00855	0.2846	0.3582	0.31	0.34
%30	3	0.2033	0.01571	0.00907	0.1643	0.2423	0.19	0.22
%35	3	0.1413	0.01580	0.00912	0.1021	0.1805	0.13	0.16
%40	3	0.0791	0.00300	0.00173	0.0717	0.0866	0.08	0.08
%45	3	0.0737	0.00883	0.00510	0.0518	0.0957	0.06	0.08
%50	3	0.0656	0.00564	0.00326	0.0515	0.0796	0.06	0.07



Şekil 6.17. Referans ve YFC ikameli numunelerin 28.gün genleşme sonuçları

Tablo 6.32. YFC ikameli numunelere ait varyans analizi sonucu

Varyansın kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-testi	Anlamlılık Düzeyi $p \leq 0,05$
Gruplar arası	2.573	10	0.257	1193.210	-
Gruplar içi	0.005	22	-	-	-

Gerçekleştirilen varyans analizine göre gruplar arasında istatistiksel anlamda önemli farklılıkların olduğu ($p \leq 0,05$) görülmüştür. Diğer bir ifadeyle yüksek fırın cürufü ikame miktarına bağlı olarak ASR genişleme miktarlarının önemli derecede değiştiği söylenebilir.

Gruplar arasındaki farklılığın hangi düzeylerde (gruplardan kaynakladığını) olduğunu tespit edebilmek amacıyla Duncan çoklu karşılaştırma testi gerçekleştirilmiştir (Tablo 6.33).

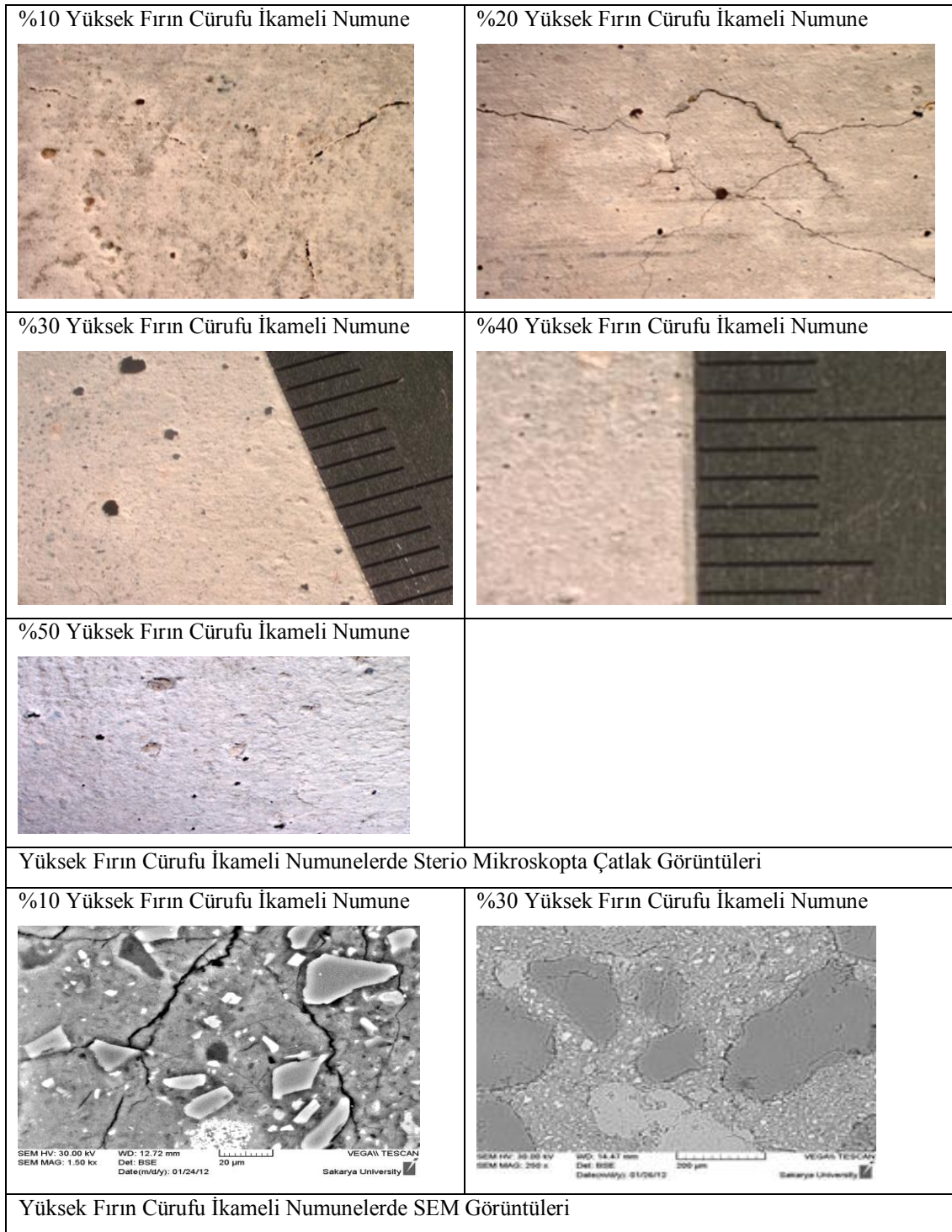
Tablo 6.33. YFC ikameli numunelerde duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları

Yüksek fırın cürufü ikame miktarı	N	Farklı olan gruplar ($p \leq 0,05$)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
%50	3	0.06	-	-	-	-	-	-	-	-
%45	3	0.07	-	-	-	-	-	-	-	-
%40	3	0.07	-	-	-	-	-	-	-	-
%35	3	-	0.14	-	-	-	-	-	-	-
%30	3	-	-	0.20	-	-	-	-	-	-
%25	3	-	-	-	0.32	-	-	-	-	-
%20	3	-	-	-	-	0.42	-	-	-	-
%15	3	-	-	-	-	-	0.54	-	-	-
%10	3	-	-	-	-	-	-	0.62	-	-
%5	3	-	-	-	-	-	-	-	0.71	-
(Referans)	3	-	-	-	-	-	-	-	-	0.92

YFC ikameli numunelerde hızlandırılmış harç çubuğu ASR deneyi genişleme sonuçları üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre;

1. YFC ikameli tüm numunelerde referans numuneye göre ASR genişleme değerlerinde azalmanın meydana geldiği,
2. %5~%35 oranlarında YFC ikame edilen numunelerde genişleme miktarlarında önemli azalmaların meydana geldiği,
3. %40 ~ %50 YFC ikame edilen numunelerde genişleme değerleri bakımından kendi içlerinde önemli bir değişikliğin olmadığı,

4. %30 ve üzeri YFC ikamesinde standartta belirtilen sınır değer civarında kaldığı, referans numuneye göre %78 oranında azalttığı,
5. %35 oranında YFC ikame edildiğinde, numunelerdeki genişleme miktarı referans numuneye göre %85 oranında azaldığı,
6. %40 oranında YFC ikame edildiğinde, numunelerdeki genişleme miktarı referans numuneye göre %91 oranında azaldığı görülmüştür.



Şekil 6.18. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde Sterio mikroskopta çatlak ve SEM görüntüleri

6.4.4. Silis dumanı ikameli numunelerde hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonuçları

Silis dumanı (SD) ikameli olarak Tablo 6.34’de verilen oran ve miktarlarda numune grupları hazırlanmıştır. Bunlara ait 28 gün süreli belirli periyotlar la genişleme

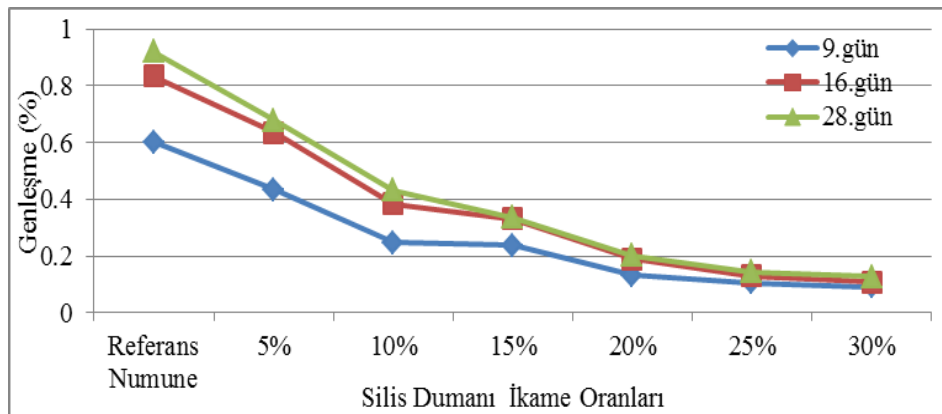
değerleri tespit edilmiştir (Tablo 6.35). Genleşme değerlerine ait değişim grafiği Şekil 6.19'da görülmektedir.

Tablo 6.34. Referans ve SD ikameli numunelerde malzeme karışım oran ve miktarları

Katkı Oranları	Agraga	Çimento	Silis	Su (ml)	S/Ç	A/Ç
	(gr)	(gr)	Dumanı(gr)			
Referans Karışım	1320	587	-	276	0.47	2.25
5 % SD	1320	557.65	29.35	276	0.47	2.25
10% SD	1320	528.3	58.7	276	0.47	2.25
15% SD	1320	528.3	88.05	276	0.47	2.25
20% SD	1320	469.6	117.4	276	0.47	2.25
25% SD	1320	528.3	146.75	276	0.47	2.25
30% SD	1320	410.9	176.1	276	0.47	2.25

Tablo 6.35. SD ikameli numunelerde 28 günlük genleşme değerleri

Numune Yaşı	Referans	5% SD	10%SD	15%SD	20%SD	25%SD	30%SD
2.gün	0.045	0.046	0.042	0.044	0.042	0.042	0.04
5.gün	0.2623	0.255	0.118	0.12	0.078	0.077	0.069
9.gün	0.6019	0.433	0.247	0.237	0.131	0.104	0.092
16.gün	0.8347	0.635	0.385	0.331	0.188	0.13	0.106
28.gün	0.9206	0.678	0.432	0.336	0.201	0.143	0.128



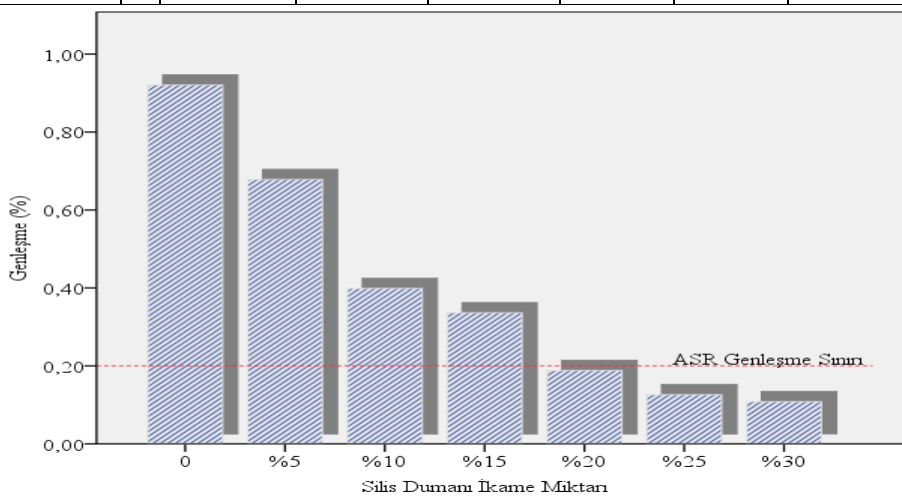
Şekil 6.19. Referans ve SD ikameli numunelerde deney sonuçları

6.4.4.1. Silis dumanı ikameli numunelere ait varyans analizi sonuçları

Silis dumanı ikame edilmiş harç çubukları üzerinde gerçekleştirilen harç çubuğu ASR deneyi genişleme sonuçları varyans analizine tabi tutulmuş olup, genişleme değerlerine ait açıklayıcı istatistikler Tablo 6.36’da verilmiştir. Ayrıca elde edilen deney sonuçlarına ait ortalama genişleme miktarlarını gösteren grafik Şekil 6.20’de görülmektedir. Gerçekleştirilen deney sonuçları üzerinde SD ikamesinin ASR üzerine etkilerini değerlendirebilmek amacıyla varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizine ait sonuçlar Tablo 6.37’de verilmiştir.

Tablo 6.36. Silis dumanı ikameli numunelerde ASR deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler

Silis Dumanı İkame Miktarı (%)	N	Ortalama Uzama (%)	Standart Sapma	Standart Hata	95% güven aralığında ortalamanın		Minimum	Maksimum
					Alt sınırı	Üst sınırı		
0	3	0.9206	0.02212	0.01277	0.8656	0.9755	0.91	0.95
%5	3	0.6782	0.01915	0.01106	0.6307	0.7258	0.66	0.70
%10	3	0.3987	0.04023	0.02323	0.2988	0.4987	0.35	0.43
%15	3	0.3363	0.02181	0.01259	0.2821	0.3904	0.31	0.36
%20	3	0.1883	0.02264	0.01307	0.1321	0.2446	0.16	0.20
%25	3	0.1263	0.01665	0.00961	0.0850	0.1677	0.11	0.14
%30	3	0.1083	0.01679	0.00969	0.0666	0.1500	0.10	0.13



Şekil 6.20. Silis dumanı ikameli numunelerin 28.gün genişleme sonuçları

Tablo 6.37. Silis dumanı ikameli numunelere ait varyans analizi sonucu

Varyansın kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-testi	Anlamlılık Düzeyi $p \leq 0,05$
Gruplar arası	1.671	6	0.278	484.736	0.000
Gruplar içi	0.008	14	0.001	-	-

Gerçekleştirilen varyans analizine göre gruplar arasında istatistiksel anlamda önemli farklılıkların olduğu ($p \leq 0,05$) görülmüştür. Diğer bir ifadeyle silis dumanı ikame miktarına bağlı olarak ASR genişleme miktarlarının önemli derecede değiştiği söylenebilir. Gruplar arasındaki farklılığın hangi düzeylerde (gruplardan kaynaklandığını) olduğunu tespit edebilmek amacıyla Duncan çoklu karşılaştırma testi gerçekleştirilmiştir (Tablo 6.38).

Tablo 6.38. Silis dumanı ikameli numunelerde duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları

Silis Dumanı İkame Miktarı (%)	Numune Adedi	Farklı olan gruplar ($p \leq 0,05$)					
		1	2	3	4	5	6
%30	3	0.108	-	-	-	-	-
%25	3	0.126	-	-	-	-	-
%20	3	-	0.1883	-	-	-	-
%15	3	-	-	0.3363	-	-	-
%10	3	-	-	-	0.3987	-	-
%5	3	-	-	-	-	0.6782	-
0	3	-	-	-	-	-	0.9206

Silis dumanı ikameli numunelerde hızlandırılmış harç çubuğu ASR deneyi sonuçları üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre;

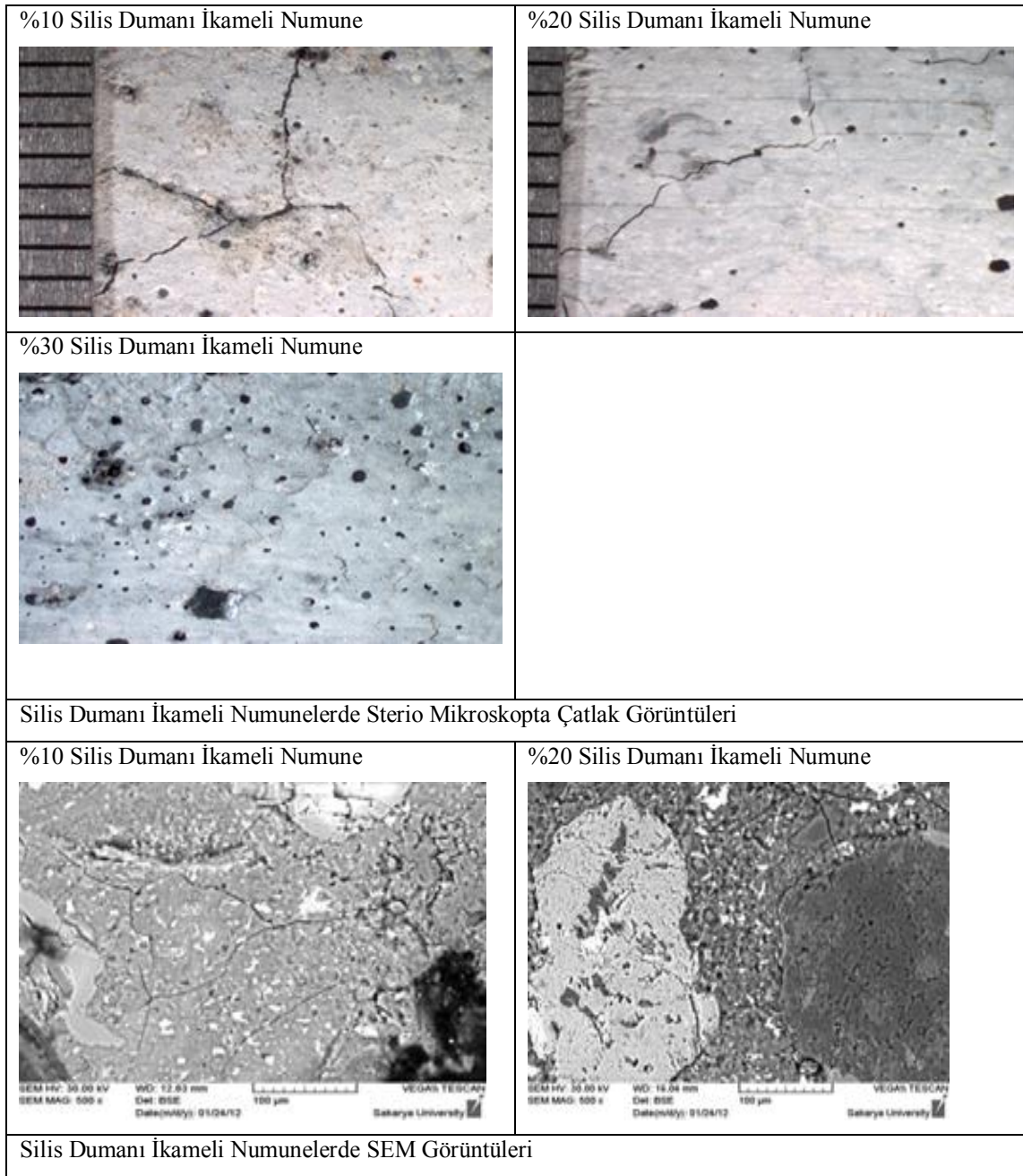
1. SD ikameli tüm numunelerde referans numuneye göre ASR genişleme değerlerinde azalmanın meydana geldiği,
2. %20~ %30 Silis dumanı ikame edilen numunelerde genişleme değerleri bakımından kendi içlerinde önemli bir değişikliğin olmadığı,

3. %25 oranında SD ikame edilen numunelerde, referans numuneye göre %86 oranında genleşme değerlerini azalttığı,
4. %20 ve üzeri SD ikame edilen numunelerde, referans numuneye göre %79.5 oranında genleşme değerlerini azalttığı,
5. %15 ve üzeri SD ikame edilen numunelerde, referans numuneye göre %63 oranında genleşme değerlerini azalttığı,
6. %10 ve üzeri SD ikame edilen numunelerde, referans numuneye göre %57 oranında genleşme değerlerini azalttığı görülmüştür.

Silis dumanının ASR genleşmelerini engellediği hususunda farklı görüşler mevcuttur. Bu görüşler çerçevesinde deneysel çalışmamız sonuçlarına bakarak reaktif alkali içeren agrega ile silis parçacıklarının reaksiyona girmesi sonucu harç çubuklarında çatlaklar oluşmuştur.

Aynı çalışma çerçevesinde üç farklı silis dumanı katkılı deney yapılmış olup hepsinde de çatlaklar görülmüştür. Literatür taramalarında %10-%15 silis dumanı ikamesinin olumlu sonuçlar verdiği bilinmekle birlikte, bu çalışma kapsamında da bu oran % 20 lerin üzerinde olduğunda başarılı olmuştur. Bu durumu çalışmada daha çok reaktif alkali içeren agrega ve silis dumanı katkısıyla yaptığımız deneyde silis katkısının karışım içerisinde topraklar halinde kalarak sonradan reaksiyona girmesi olarak yorumlanmıştır. Buda harç ve beton numunelerde çatlak oluşmasını kaçınılmaz kılmıştır.

Beton katkısı olarak silis dumanının %10 ikame edilerek kullanıldığında dayanım açısından iyi sonuçlar verdiği bilinmektedir. Silis dumanının beton katkısı olarak fazla miktarda kullanılmaması nedeniyle ASR genleşmelerini azaltma doğrultusunda başarılı sonuçlar vermemiştir.



Şekil 6.21. Silis dumanı ikameli numunelerde sterio mikroskopta çatlak ve SEM görüntüleri

6.4.5. Metakaolin ikameli numunelerde hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonuçları

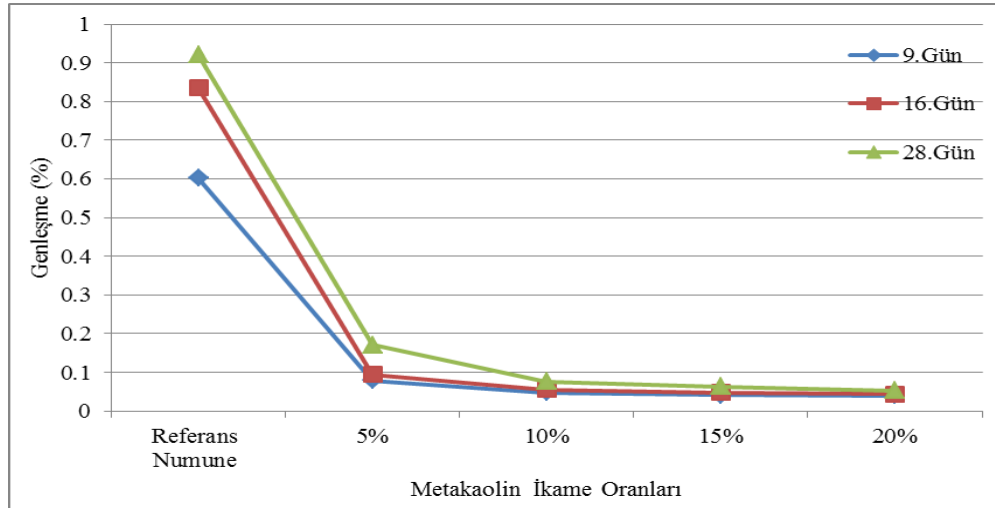
Metakaolin ikameli olarak Tablo 6.39’da verilen oran ve miktarlarda numune grupları hazırlanmıştır. Bunlara ait 28 gün süreli belirli periyotlarla genleşme değerleri tespit edilmiştir (Tablo 6.40). Genleşme değerlerine ait değişim grafiği Şekil 6.22’de görülmektedir.

Tablo 6.39. Metakaolin ikameli numunelerde malzeme karışım oran ve miktarları

Katkı Oranları	Agrega (gr)	Çimento (gr)	Metakaolin (gr)	Su (ml)	S/C	A/C
Referans Karışım	1320	587	-	276	0.47	2.25
5 % MK	1320	557.65	29.35	276	0.47	2.25
10% MK	1320	528.3	58.7	276	0.47	2.25
15% MK	1320	528.3	88.05	276	0.47	2.25
20% MK	1320	469.6	117.4	276	0.47	2.25

Tablo 6.40. Metakaolin ikameli numunelerde 28 günlük genleşme değerleri

Numune Yaşı	Referans Numune	MK %5	MK %10	MK %15	MK %20
2.Gün	0.045	0.044	0.035	0.033	0.034
5.Gün	0.262	0.064	0.041	0.037	0.037
9.Gün	0.602	0.079	0.048	0.041	0.041
16.Gün	0.835	0.095	0.055	0.047	0.044
28.Gün	0.921	0.171	0.076	0.064	0.053



Şekil 6.22. Metakaolin ikameli numunelerde deney sonuçları

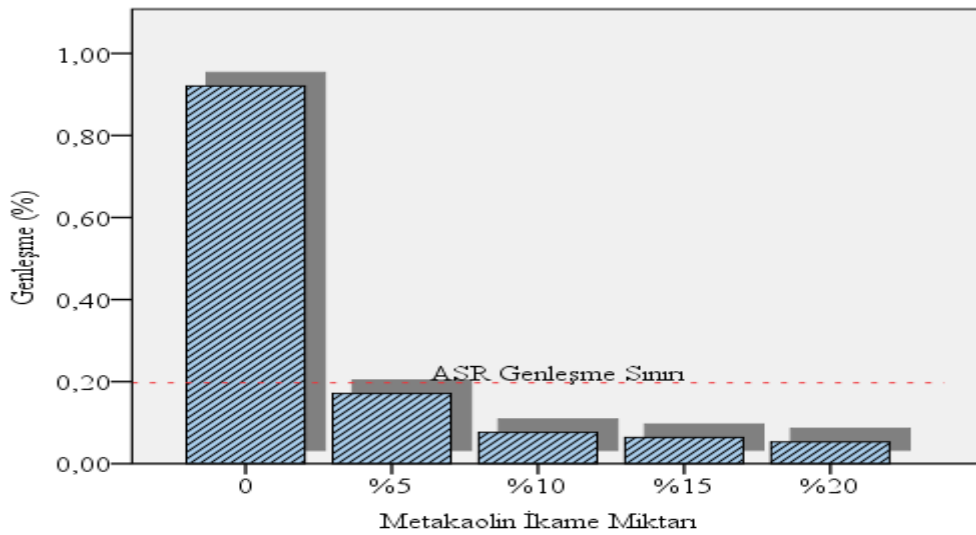
6.4.5.1. Metakaolin ikameli numunelere ait varyans analizi sonuçları

Metakaolin ikame edilmiş harç çubukları üzerinde gerçekleştirilen harç çubuğu ASR deneyi genleşme sonuçları varyans analizine tabi tutulmuş olup, genleşme değerlerine ait açıklayıcı istatistikler Tablo 6.41'de verilmiştir. Ayrıca elde edilen

deney sonuçlarına ait ortalama genleşme miktarlarını gösteren grafik Şekil 6.23’de görülmektedir. Gerçekleştirilen deney sonuçları üzerinde metakaolin ikamesinin ASR üzerine etkilerini değerlendirebilmek amacıyla varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizine ait sonuçlar Tablo 6.42’de verilmiştir.

Tablo 6.41. Metakaolin ikameli numunelerde ASR deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler

Silis Dumanı İkame Miktarı (%)	N	Ortalama Uzama (%)	Standart Sapma	Standart Hata	95% güven aralığında ortalamanın		Minimu m	Maksimum
					Alt sınırı	Üst sınırı		
0	3	0.9206	0.0221	0.01277	0.86	0.975	0.91	0.95
%5	3	0.1708	0.0146	0.00847	0.13	0.207	0.15	0.18
%10	3	0.0759	0.0036	0.00212	0.06	0.085	0.07	0.08
%15	3	0.0637	0.0041	0.00237	0.05	0.073	0.06	0.07
%20	3	0.0530	0.0034	0.00196	0.04	0.061	0.05	0.06



Şekil 6.23. Metakaolin ikameli numunelerin 28.gün genleşme sonuçları

Tablo 6.42. Metakaolin ikameli numunelere ait varyans analizi sonucu

Varyansın kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-testi	Anlamlılık Düzeyi $p \leq 0,05$
Gruplar arası	1.678	4	0.420	28110.808	0.000
Gruplar içi	0.001	10	0.000	-	-

Gerçekleştirilen varyans analizine göre gruplar arasında istatistiksel anlamda önemli farklılıkların olduğu ($p \leq 0,05$) görülmüştür. Diğer bir ifadeyle metakaolin ikame miktarına bağlı olarak ASR genişleme miktarlarının önemli derecede değiştiği söylenebilir. Gruplar arasındaki farklılığın hangi düzeylerde (gruplardan kaynaklandığı) olduğunu tespit edebilmek amacıyla Duncan çoklu karşılaştırma testi gerçekleştirilmiştir (Tablo 6.43).

Tablo 6.43. Metakaolin ikameli numunelerde duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları

Metakaolin İkame Miktarı (%)	Numune Adedi	Farklı olan gruplar ($p \leq 0.05$)		
		1	2	3
%20	3	0.0530	-	-
%15	3	0.0637	-	-
%10	3	0.0759	-	-
%5	3	-	0.1708	-
Referans Numune	3	-		0.9206

Metakaolin ikameli numunelerde hızlandırılmış harç çubuğu ASR deneyi genişleme sonuçları üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre;

1. Metakaolin ikameli tüm numunelerde referans numuneye göre ASR genişleme değerlerinde azalmanın meydana geldiği,
2. %10 ~ %20 metakaolin ikame edilen numunelerde genişleme değerleri bakımından kendi içlerinde önemli bir değişikliğin olmadığı,
3. %5 ve üzeri metakaolin ikame edildiğinde standartta belirtilen sınır değerinin altında kaldığı, referans numuneye göre %81.4 oranında genişleme değerlerinde azalmanın meydana geldiği görülmüştür. Dünyada yeni bir beton katkısı olarak kullanılmakta olan metakaolin katkısının %10 ikame edilerek kullanıldığında dayanım açısından iyi sonuçlar verdiği araştırmalarla bilinmektedir. Metakaolin katkısı ile ikame ettiğimiz numunelerde yapılan ASR deney sonuçlarında olumlu sonuçlar görülmüştür.

6.5. Otoklav Deneyleri

Günümüzde özellikle büyük yapıların gereksiniminde ekonomik ömürlerinin uzun olması, kısa sürede inşa edilmesi amacına uygunluğunu sağlamak için hızlı, güvenilir



imalat süreci ile test yöntemlerine ihtiyaç artmıştır. 1946' da ki test yöntemlerinin kullanımı bugün daha da geliştirilmiştir. Bunlar ASTM gibi standardize hale getirilen harç çubuğu testi dâhil C 227, jel pat testi, otoklav testi, kimyasal yöntem, çözünme kilo kaybı yöntemi ve kullanımı petrografik teknikleri ile potansiyel reaktif agrega tespit edilmesi gibi sıralanır. Otoklav test metodu kısa sürede sonuç vermesi açısından birçok ülkede farklı yöntemlerle uygulanmaktadır.

Çalışma kapsamında; Berube vd. harçlar için bir kaç gün içerisinde sonuç veren hızlı bir otoklav deney yöntemi tercih edilmiştir. Deney içeriğine uygun otoklav cihazı deneyimizde kullanılmıştır. Bütün Harç Çubuğu Yöntemlerinde olduğu gibi numuneler ASTM-C227 standartına uygun olarak hazırlanmıştır. Bu deney, su/çimento oranı 0.5 olan ve alkali içeriği karışım suyuna NaOH eklenerek %3.5 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$ değerine yükseltilen ASTM C227'ye uygun harç çubukları üzerinde uygulanmaktadır [119].

Literatür taramalarına uygun olarak karışım suyuna NaOH eklenerek %3.5 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$ değerine yükselterek hazırlanan numunelerde sıcaklıkla paralel olarak oluşan boşluk miktarı genişleme değerlerinde sakıncalı sonuçlar vermiştir. Sıcaklıkla birlikte yüksek reaktiflik içeren agrega kullanmamız ve ayrıca mineral katkıların da sonuçları etkilediği bilinmektedir.

Agreganın yüksek alkali içermesi yüzünden birde karışım suyu saf halde numuneler hazırlanmıştır. Yeni üretilen numunelerden elde edilen genişleme değerleri ile HHÇ deneyi genişleme sonuçları arasında iyi bir korelasyon içinde olduğunu gözlenmiştir.

Bu karışım suyu saf hazırlanan numuneler otoklava girmeden önce iki gün boyunca %100 bağıl nemde ve 23°C'de kürlenmiştir. Çıkarılan numunelerin ikinci okumaları alınmıştır. Otoklavda numuneler 130°C sıcaklıkta ve 0.17 MPa basınç altında 5 saat bekletilmiştir. Otoklav deneyi sonrasında numuneler 80°C~23°C arası soğutulduğunda oluşan üç farklı genişleme değerleri kaydedilmiştir. Bu deney metodu ile elde edilen sonuçlar ile ASTM C1260 deneyi sonuçları arasında iyi bir korelasyon bulunmuştur. Bu durum üç farklı deney karşılaştırma grafiklerinde görülmektedir.

 <p>a- Malzeme kuru karışım hazırlanması,</p>	 <p>b- Malzemeleri harç mikserinde hazırlanması,</p>	 <p>c- Sarma tablası deneyi ile harç yayılma miktarını bulma,</p>
 <p>d- Teflon spreylenmiş kalıba pim ve harç yerleştirilmesi,</p>	 <p>e- Harcı masa vibratöründe uygun yerleştirilmesi,</p>	 <p>f- 20° C derece ve %100 bağıl nem ortamında harcın kür edilmesi,</p>
 <p>g- 24 saat sonra katılaştıran harç çubuklarını kalıptan çıkarılması,</p>	 <p>h- İlk boy okuma değerlerini dijital komparatörle bulma bundan sonra numuneler uygun koşullarda saklanarak diğer okuma tarihleri beklenme,</p>	 <p>ı- İlk okuma değerleri alınan numuneler iki gün boyunca %100 bağıl nemde ve 23°C'de kürlenmiştir,</p>
 <p>j- İlk okuma değerleri alınan numuneler iki gün boyunca %100 bağıl nemde ve 23°C'de kürlenmiştir,</p>	 <p>k - Otoklav Cihazı içinden görüntü,</p>	 <p>l- Otoklav Cihazı dışından görüntü.</p>

Şekil 6.24. Deney sürecinin fotoğraflarla açıklamaları

6.5.1. Referans numunede otoklav deneyi sonuçları

Referans numune olarak Tablo 6.44’de verilen oran ve miktarlarda numune grupları hazırlanmıştır. Tablo 6.45’de genleşme değerleri görülmektedir.

Tablo 6.44. Referans numuneye ait malzeme karışım oran ve miktarları

Malzeme Türü	Elek Çapları					S/Ç	Su(ml)	Çimento(gr.)
	No:8	No:16	No:30	No:50	No:100			
	0-8 mm ince agregası (gr)							
% Oranı	10	25	25	25	15			
Miktarı(gr)	132	330	330	330	198	0.47	276	587

Tablo 6.45. Referans numune Otoklav deneyi genleşme değeri

Numune Grubu	Deney Sonrası Oluşan Genleşme Değeri
Şahit Numune	0.073

6.5.2. Uçucu kül ikameli numunelerde otoklav deneyi sonuçları

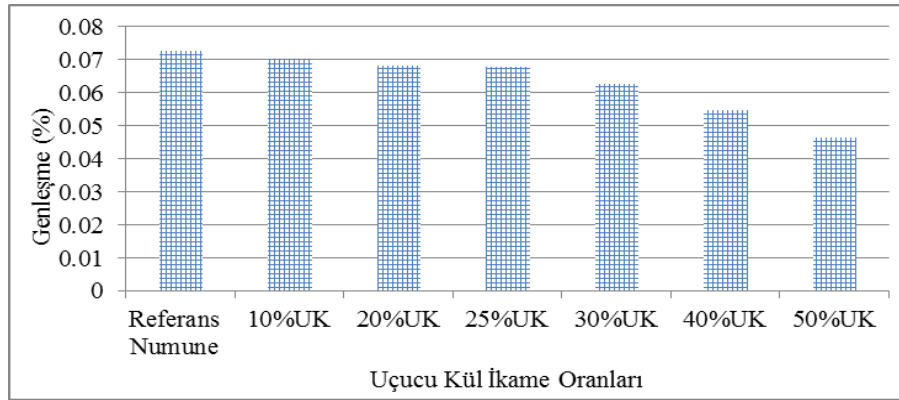
Uçucu kül ikameli olarak Tablo 6.46’de verilen oran ve miktarlarda numune grupları hazırlanmıştır. Tablo 6.47’de genleşme değerleri ve genleşme değerlerine ait değişim grafiği Şekil 6.25’de görülmektedir.

Tablo 6.46. Uçucu kül ikameli numunelerde otoklav deneyi malzeme karışım oranları ve miktarları

Katkı Oranları	Agrega (gr)	Çimento(gr)	Uçucu Kül	Su (ml)	S/Ç	A/Ç
Referans Karışım	1320	587	-	276	0.47	2.25
10% UK	1320	528.3	58.7	276	0.47	2.25
20% UK	1320	469.6	117.4	276	0.47	2.25
30% UK	1320	410.9	176.1	276	0.47	2.25
40% UK	1320	352.2	234.8	276	0.47	2.25
50% UK	1320	293.5	293.5	276	0.47	2.25

Tablo 6.47. Uçucu kül ikameli numunelerde otoklav deneyi genleşme değerleri

Numune Grubu	Deney Sonrası Oluşan Genleşme Değerleri (%)
Referans Numune	0.073
UK % 10	0.07
UK % 20	0.068
UK % 25	0.068
UK % 30	0.063
UK % 40	0.055
UK % 50	0.047



Şekil 6.25. Referans ve uçucu kül ikameli numunelerde otoklav deney sonuçları

6.5.3. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde otoklav deneyi sonuçları

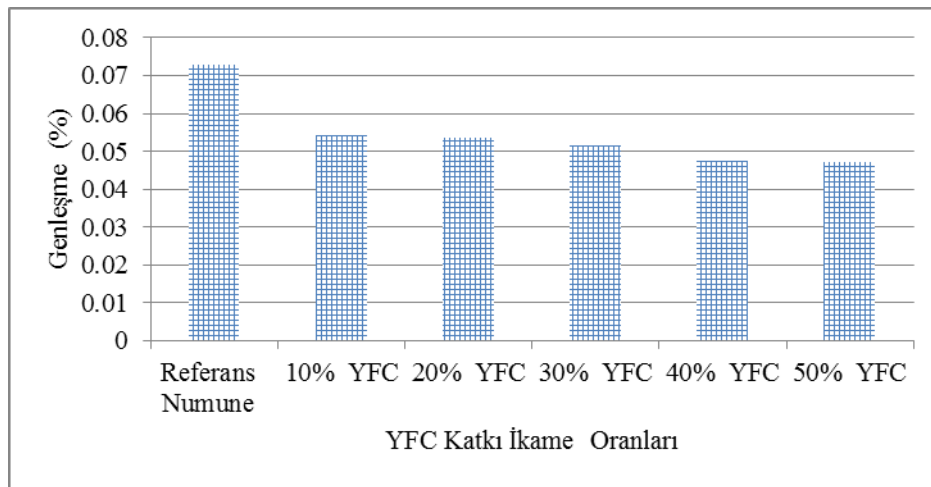
Yüksek fırın cürufu ikameli olarak Tablo 6.48’de verilen oran ve miktarlarda numune grupları hazırlanmıştır. Tablo 6.49’de genleşme değerleri ve genleşme değerlerine ait değişim grafiği Şekil 6.26’da görülmektedir.

Tablo 6.48. YFC ikameli numunelerde otoklav deneyi malzeme karışım oranları ve miktarları

Katkı Oranları	Agrega (gr)	Çimento (gr)	Yüksek Fırın Cürufu	Su (ml)	S/C	A/C
Kontrol Karışım	1320	587	-	276	0.47	2.25
10% YFC	1320	528.3	58.7	276	0.47	2.25
20% YFC	1320	469.6	117.4	276	0.47	2.25
30% YFC	1320	410.9	176.1	276	0.47	2.25
40% YFC	1320	352.2	234.8	276	0.47	2.25
50% YFC	1320	293.5	293.5	276	0.47	2.25

Tablo 6.49. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde otoklav deneyi genişleme değerleri

Numune Grubu	Deney Sonrası Oluşan Genleşme Değerleri (%)
Referans Numune	0.073
10% YFC	0.054
20% YFC	0.053
30% YFC	0.052
40% YFC	0.047
50% YFC	0.047



Şekil 6.26. Referans ve yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde otoklav deney sonuçları

6.5.4. Silis dumanı ikameli numunelerde otoklav deneyi sonuçları

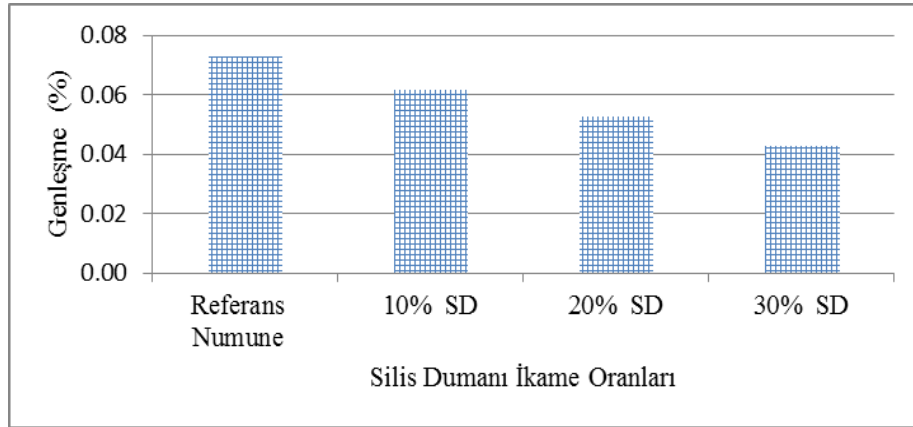
Silis dumanı ikameli olarak Tablo 6.50’de verilen oran ve miktarlarda numune grupları hazırlanmıştır. Tablo 6.51’de genişleme değerleri ve genişleme değerlerine ait değişim grafiği Şekil 6.27’de görülmektedir.

Tablo 6.50. SD ikameli numunelerde otoklav deneyi malzeme karışım oranları ve miktarları

Katkı Oranları	Agrega (gr)	Çimento (gr)	Silis Dumanı	Su (ml)	S/Ç	A/Ç
Kontrol Karışım	1320	587	-	276	0.47	2.25
10% SD	1320	528.3	58.7	276	0.47	2.25
20% SD	1320	469.6	117.4	276	0.47	2.25
30% SD	1320	410.9	176.1	276	0.47	2.25

Tablo 6.51. Silis dumanı ikameli numunelerde otoklav deneyi genişleme değerleri

Numune Grubu	Deney Sonrası Oluşan Genleşme Değerleri
Referans Numune	0.073
10% SD	0.062
20% SD	0.052
30% SD	0.042



Şekil 6.27. Silis dumanı ikameli numunelerde otoklav deney sonuçları

6.5.5. Metakaolin ikameli numunelerde otoklav deneyi sonuçları

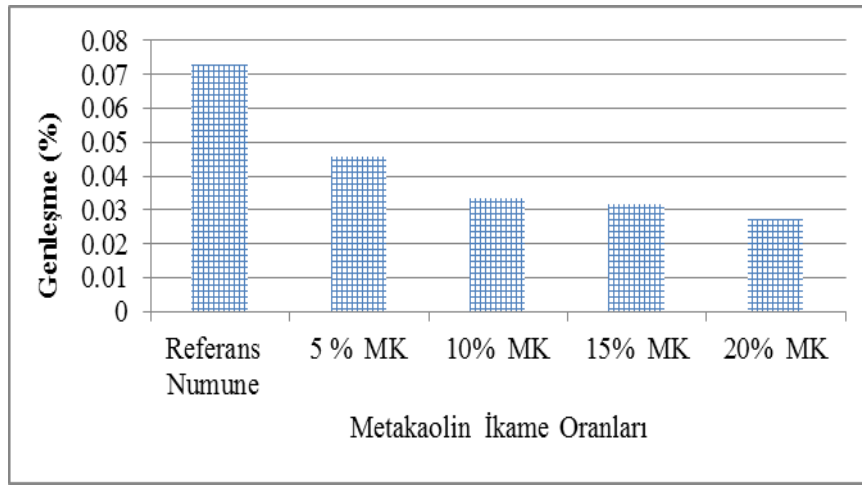
Metakaolin ikameli olarak Tablo 6.52’de verilen oran ve miktarlarda numune grupları hazırlanmıştır. Tablo 6.53’de genişleme değerleri ve genişleme değerlerine ait değişim grafiği Şekil 6.28’de görülmektedir.

Tablo 6.52. Metakaolin ikameli numunelerde otoklav deneyi malzeme karışım oranları ve miktarları

Katkı Oranları	Agraga (gr)	Çimento (gr)	Metakaolin	Su (ml)	S/C	A/C
Kontrol Karışım	1320	587	-	276	0.47	2.25
5 % MK	1320	557.65	29.35	276	0.47	2.25
10% MK	1320	528.3	58.7	276	0.47	2.25
15% MK	1320	528.3	88.05	276	0.47	2.25
20% MK	1320	469.6	117.4	276	0.47	2.25

Tablo 6.53. Metakaolin ikameli numunelerde otoklav deneyi genleşme değerleri

Numune Grubu	Deney Sonrası Oluşan Genleşme Değerleri
Referans Numune	0.073
MK %5	0.046
MK %10	0.033
MK %15	0.032
MK %20	0.027



Şekil 6.28. Silis dumani ikameli numunelerde otoklav deney sonuçları

6.6. Harç Çubuğu, Hızlandırılmış Harç Çubuğu ve Otoklav Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

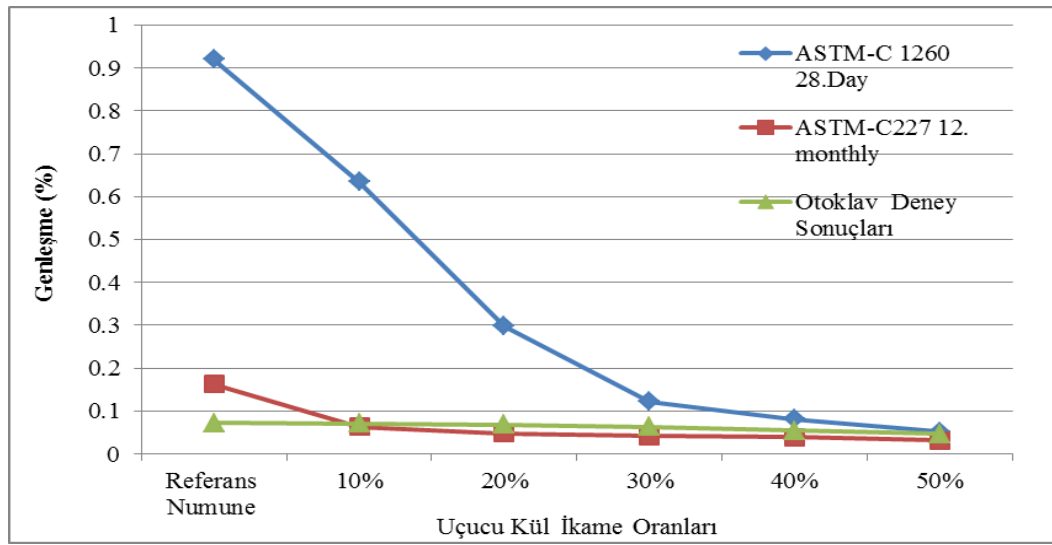
Üç gruba ait genleşme değerlerini kendi içlerinde karşılaştırma yaparak deney sonuçları arasında korelasyon olup olmadığı kontrol edilmiştir. Deney sonuçları değerlendirildiğinde ASR'den oluşan genleşmelerin mineral katkıların ikamesi ile azaltılabileceği görülmüştür.

6.6.1. Uçucu kül ikameli numunelerde harç çubuğu deneyi, hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ve otoklav deneyi sonuçlarının karşılaştırılması

Muhtelif oranlarda UK ikameli üç deney metoduna ait genleşme değerlerini Tablo 6.54'de karşılaştırma grafiği ise Şekil 6.29'da görülmektedir.

Tablo 6.54. UK ikameli numunelerde harç çubuğu deneyi, hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ve otoklav deneyi genleşme değerleri

	ASTM-C 1260 28. gün	ASTM-C227 12. ay	Otoklav
Referans Karışım	0.921	0.163	0.0728
Uçucu Kül İkamesi % 10	0.635	0.063	0.0704
Uçucu Kül İkamesi % 20	0.298	0.048	0.0682
Uçucu Kül İkamesi % 30	0.122	0.041	0.0627
Uçucu Kül İkamesi % 40	0.081	0.04	0.0549
Uçucu Kül İkamesi % 50	0.052	0.032	0.0467



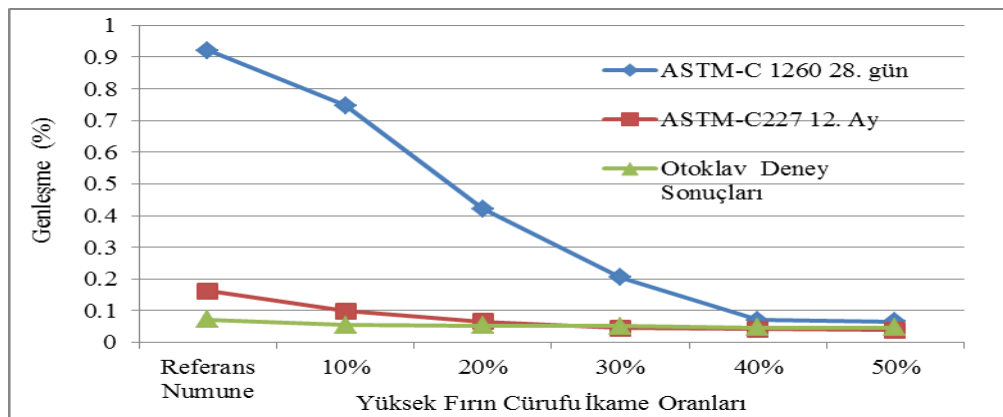
Şekil 6.29. Referans ve UK ikameli numunelerde harç çubuğu deneyi, hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ve otoklav deneyi genleşme sonuçları

6.6.2. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde harç çubuğu deneyi, hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ve otoklav deney sonuçlarının karşılaştırılması

Muhtelif oranlarda YFC ikameli üç deney metoduna ait genleşme değerlerini Tablo 6.55’de karşılaştırma grafiği ise Şekil 6.30’da görülmektedir.

Tablo 6.55. YFC ikameli numunelerde hızlandırılmış harç çubuğu deneyi, harç çubuğu deneyi ve otoklav deneyi genişleme değerleri

	ASTM-C 1260 28. gün	ASTM-C227 12. Ay	Otoklav Deney Sonuçları
Referans Numune	0.921	0.163	0,0728
YFC % 10	0.747	0.098	0,0542
YFC % 20	0.422	0.066	0,0534
YFC % 30	0.205	0.045	0,0516
YFC % 40	0.07	0.042	0,0475
YFC % 50	0.066	0.039	0,0473



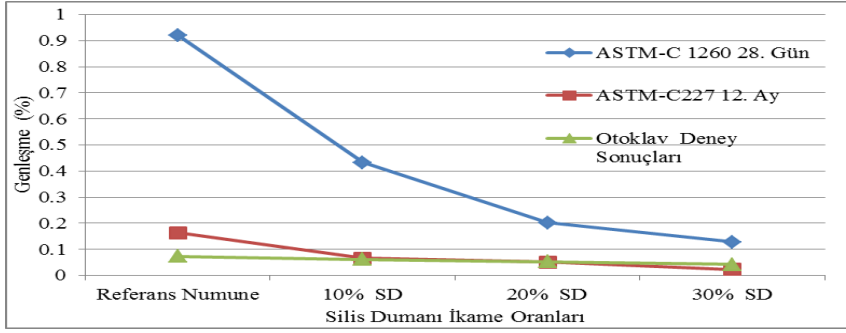
Şekil 6.30. Referans ve YFC ikameli numunelerde harç çubuğu deneyi, hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ve otoklav deneyi genişleme sonuçları

6.6.3. Silis dumanı ikameli numunelerde harç çubuğu deneyi, hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ve otoklav deneyi sonuçlarının karşılaştırılması

Muhtelif oranlarda SD ikameli üç deney metoduna ait genişleme değerlerini Tablo 6.56'da karşılaştırma grafiği ise Şekil 6.31'de görülmektedir.

Tablo 6.56. SD ikameli numunelerde hızlandırılmış harç çubuğu deneyi, harç çubuğu deneyi ve otoklav deneyi genişleme değerleri

	ASTM-C 1260 28. gün	ASTM- C227 12. Ay	Otoklav Deney Sonuçları
Referans Numune	0.921	0.163	0.073
10% SD	0.432	0.066	0.062
20% SD	0.201	0.05	0.052
30% SD	0.128	0.023	0.042



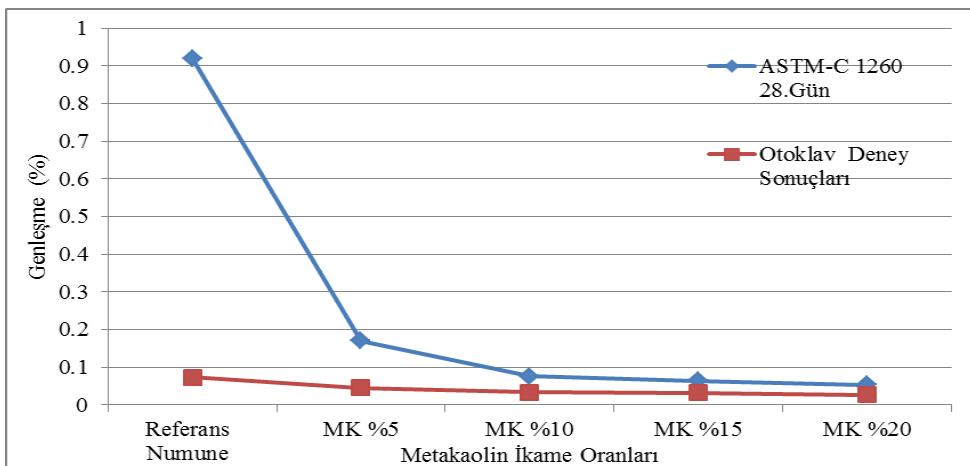
Şekil 6.31. Referans ve SD ikameli numunelerde harç çubuğu deneyi, hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ve otoklav deneyi genişleme sonuçları

6.6.4. Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ve otoklav deneyi sonuçlarının metakaolin ikameli numunelerde karşılaştırılması

Muhtelif oranlarda metakaolin ikameli üç deney metoduna ait genişleme değerlerini Tablo 6.57’de karşılaştırma grafiği ise Şekil 6.32’de görülmektedir.

Tablo 6.57. Metakaolin ikameli numunelerde hızlandırılmış çubuğu deneyi, harç çubuğu deneyi ve otoklav deneyi genişleme değerleri

	ASTM-C 1260 28. Gün	Otoklav Deneysel Sonuçları
Referans Numune	0.920565	0.072768
MK %5	0.170847	0.045763
MK %10	0.075932	0.03339
MK %15	0.063729	0.031525
MK %20	0.052994	0.027288



Şekil 6.32. Metakaolin ikameli numunelerde harç çubuğu deneyi, hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ve otoklav deneyi genişleme sonuçları

6.7. Beton Prizma Metodu Deneyi (ASTM-C 1293)

Günümüzde beton ve beton ürünlerinin yoğun şekilde kullanılması, onarılamayacak ölçüde zararlar vermeden önlemlerin alınması adına laboratuvarlarda betonla ilgili deneysel çalışmalar hızla devam etmektedir.

Beton prizma testi, 75×75×285 mm boyutlarında hazırlanan harç çubuklarının zamana bağlı olarak genleşme miktarının ölçülmesi ile çimento agrega bileşimlerinin alkali kaynaklı genleşmelere açık olup olmadığını belirler. Bu deney metodunu uzun süreli harç çubuğu metodundan ayıran en önemli özellik, harç çubuk boyutları ve harç çubuklarının hazırlanması sırasında karışım suyuna NaOH eklenerek karışımın alkali miktarının artırılmasıdır.



Şekil 6.33. 75×75×285 mm boyutlarında harç kalıpları

Bu deney metodunda, hem ince agrega hem de kaba agreganın reaktif olup olmadığı test edilebilir. Birinin reaktif olmaması gereklidir. Beton hazırlanmasında %40 mıcır ve %60 yüksek alkali içeren kum kullanılmıştır. Her ne kadar deney sürecinde karışım suyuna alkali artıran (NaOH) sodyum hidroksit ilavesi isteniyor ise de bu şekilde hazırlanan numune genleşme değerlerinde çok büyük dalgalanmalar görülmüştür. Bunun sebebi olarak çalışma kapsamında kullanılan agreganın yüksek oran da reaktif olması şeklinde söylenebilir. Ayrıca karışım suyu saf olarak üretilen numune gruplarında gerçek genleşme değerlerini yakalanmıştır.

Harç çubuklarındaki genleşme bir yıl sonra % 0,04 veya daha fazla ise agrega potansiyel olarak zararlıdır sonucuna varılır. Bu deney metodu ince agregalar için iyi

sonuçlar vermeyebilir. Bundan dolayı deney sonucu reaktif çıkmayan ince agregalar özellikle saha betonlarında reaktiflik gösterebilir.

6.7.1. Hızlandırılmış beton prizma metodu deney sonuçları (ASTM-C1253)

Beton prizma testi agrega kaynaklarının potansiyel ASR reaktivitesini değerlendirmek için uygulanan bir test yöntemidir. Çalışma kapsamında farklı mineral katkı oranlarında hazırlanan numuneler üzerinde ASR etkinliği ASTM-C1253 hızlandırılmış beton prizma deneyi gerçekleştirilmiştir. Numuneler 60°C sıcaklıkta %100 bağıl nem ortamında 90 gün deneye tabi tutulmuş olup, 90 gün sonunda oluşan genleşmenin %0,04 aşmaması durumunda mineral katkıların ASR'yi engellediği söylenir.

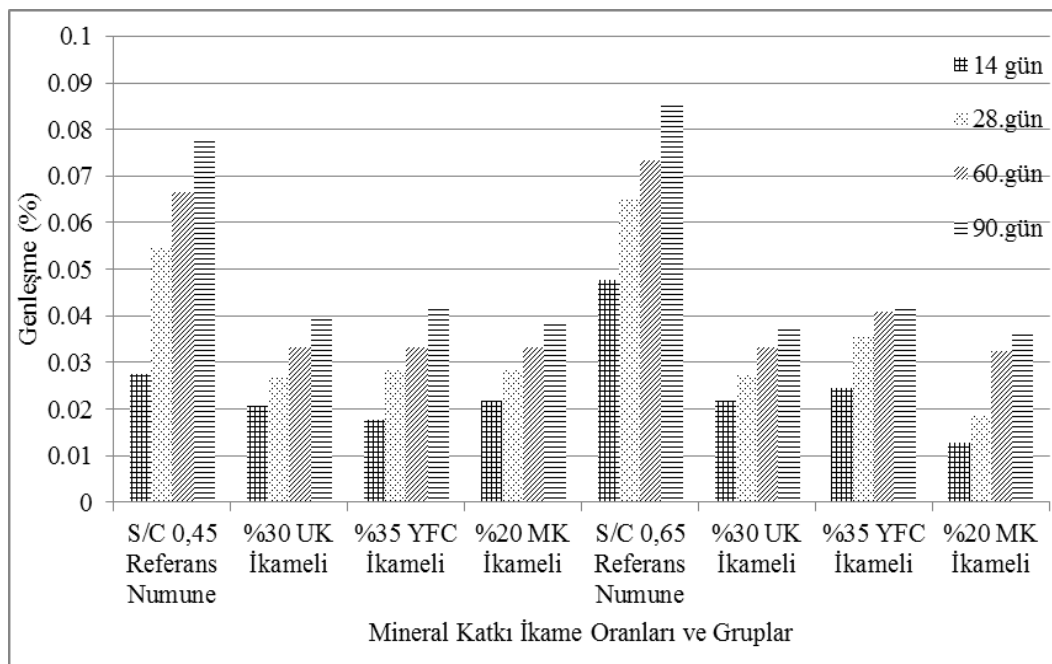
Beton prizmalar, 40×40×160 mm kalıplara, 420 kg/m³ çimento, yüksek alkali içeren agrega (kum) %60 ve alkali içermeyen 1 no mıcır %40 ve S/Ç oranı 0,45 ve 0,65 saf karışım suyu olan bir beton karışımı kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleşmiştir. Tablo 6.58'de malzeme karışım oranları, Tablo 6.59'da ise genleşme değerleri ve genleşme sonuçları Şekil 6.34'de görülmektedir. Test yönteminde anlatıldığı üzere agregaya ve suya alkali içeriğini arttıran malzeme ilave edilmemiştir.

Tablo 6.58. Beton prizma deneyi için hazırlanan numune karışım oran ve miktarları

Beton Prizma Numune Grupları	KUM	MICIR	Çimento(Kg)	Katkı Türü	Katkı miktarı(kg)	Su (kg)	S/Ç
BP 1	1047.39	708.89	420	-	-	189	0.45
BP 2	1047.39	708.89	294	UK %30	126kg	189	0.45
BP 3	1047.39	708.89	273	YFC%35	147kg	189	0.45
BP 4	1047.39	708.89	336	MK %20	84 kg	189	0.45
BP 5	1047.39	708.89	420	-	-	273	0.65
BP 6	1047.39	708.89	294	UK %30	126kg	273	0.65
BP 7	1047.39	708.89	273	YFC%35	147kg	273	0.65
BP 8	1047.39	708.89	336	MK %20	84 kg	273	0.65

Tablo 6.59. Beton prizma deneyi için hazırlanan numune gruplarına ait genişleme değerleri

	BP1	BP2	BP3	BP4	BP5	BP6	BP7	BP8
	S/C 0,45	%30	%35	%20	S/C 0,65	%30	%35	%20
	Referans	UK	YFC	MK	Referans	UK	YFC	MK
	Numune	İkameli	İkameli	İkameli	Numune	İkameli	İkameli	İkameli
14 gün	0.027	0.021	0.018	0.022	0.048	0.022	0.024	0.013
28.gün	0.055	0.027	0.028	0.028	0.065	0.027	0.035	0.019
60.gün	0.067	0.033	0.033	0.033	0.073	0.033	0.041	0.032
90.gün	0.078	0.04	0.042	0.039	0.086	0.037	0.042	0.037



Şekil 6.34. Beton prizma deneyi için hazırlanan numune gruplarına ait genişleme sonuçları

BÖLÜM 7. ASR'DE MİNERAL KATKI KOMBİNASYONLARI İLE OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI

7.1. Çalışma Amacı

Mineral katkıları belirli oranlarda kullanıldığında ASR genişleme değerlerini önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Çalışma amacı doğrultusunda mineral katkı kombinasyonları ile ASR deneylerine devam edilmiştir. Bu kapsamda harç çubuğu ve hızlandırılmış harç çubuğu deney metodlarını kullanarak farklı oranlarda mineral katkı kombine edilen karışımlar hazırlanarak deneye tabi tutulmuştur.

Sonra elde edilen genişleme değerleri SPSS paket programında kullanarak önce lineer regresyon sonuçlarına ulaşılmıştır. Regresyon sonuçları yardımıyla optimum genişlemeyi veren model optimizasyon çalışması yapılmıştır. Optimizasyon model genişleme değerlerinin % 90 üzerinde doğruluğu tespit edilmiştir.

7.2. Mineral Katkı Kombinasyonları ile Hazırlanan Numunelerde Harç Çubuğu Deneyi Sonuçları

Mineral katkı kombinasyonlarında, mineral katkıları ile çimento kısmi yer değiştirme yöntemiyle hazırlanan numune grupları Tablo 7.1'de, karışım oran ve miktarları Tablo 7.2'de görülmektedir. Hazırlanan bu karışım gruplarına ait harç çubuğu deney standardı kuralına uygun olarak 12 ay boyunca genişleme değerleri Tablo 7.3'te genişleme grafiği de Şekil 7.1'de görülmektedir.

Tablo 7.1. Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numune grupları

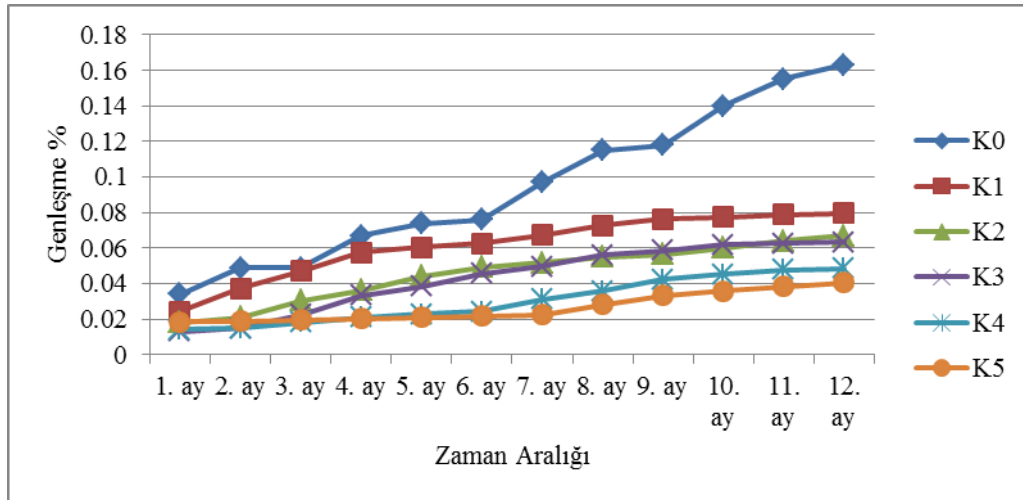
Numune Grubu	Katkı Oranları
K0	Referans Karışım
K1	(Ç %85) + (UK%5+YFC%5+SD%5) %15Katkı
K2	(Ç %70) + (UK%10+YFC%10+SD% 10) %30 Katkı
K3	(Ç %55) + (UK%15+YFC%15+SD%15) %45 Katkı
K4	(Ç %60) + (UK%30+SD %10) %40 Katkı
K5	(Ç %60) + (YFC%30+SD%10) %40 Katkı

Tablo 7.2. Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numune gruplarında malzeme karışım oran ve miktarları

Numune Grubu	Agrega (gr)	Çimento (gr)	Uçucu Kül (gr)	Yüksek Fırın Cürufu (gr)	Silis Dumanı (gr)	Su(gr)	S/Ç	A/Ç
K0	1320	587	-	-	-	276	0.47	2.25
K1	1320	498.95	29.35	29.35	29.35	276	0.47	2.25
K2	1320	410.9	58.7	58.7	58.7	276	0.47	2.25
K3	1320	322.85	88.05	88.05	88.05	276	0.47	2.25
K4	1320	352.2	176.1	-	58.7	276	0.47	2.25
K5	1320	352.2	-	176.1	58.7	276	0.47	2.25

Tablo 7.3. Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numunelere ait 12 aylık genişleme değerleri

	K0	K1	K2	K3	K4	K5
1. ay	0.034	0.024413	0.018135	0.013078	0.014068	0.018475
2. ay	0.049	0.037317	0.0211	0.014822	0.014915	0.018983
3. ay	0.049	0.046907	0.030342	0.022495	0.018136	0.019661
4. ay	0.067	0.057719	0.03627	0.033306	0.021017	0.020339
5. ay	0.074	0.060334	0.044292	0.038537	0.022881	0.021186
6. ay	0.076	0.062601	0.049349	0.045512	0.024407	0.021864
7. ay	0.097	0.067484	0.05179	0.049697	0.031186	0.022542
8. ay	0.115	0.072715	0.055103	0.055975	0.035763	0.028305
9. ay	0.118	0.076203	0.056324	0.058765	0.042542	0.03339
10. ay	0.14	0.077423	0.059986	0.061729	0.045085	0.035932
11. ay	0.155	0.078993	0.063996	0.062601	0.047797	0.038305
12. ay	0.163	0.07969	0.066786	0.063299	0.048475	0.040508



Şekil 7.1. Referans ve Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numunelere ait deney sonuçları

7.3. Mineral Katkı Kombinasyonları ile Hazırlanan Numunelerde Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi Sonuçları

Mineral katkı kombinasyonlarında, mineral katkıları ile çimento kısmi yer değiştirme yöntemiyle hazırlanan numune grupları Tablo 7.4'de, karışım oran ve miktarları Tablo 7.5'de görülmektedir. Hazırlanan bu karışım gruplarına ait hızlandırılmış harç çubuğu deney standardı kuralarına uygun olarak 28 gün boyunca tespit edilen genleşme değerleri Tablo 7.6'da genleşme grafiği de Şekil 7.2'de görülmektedir.

Tablo 7.4. Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numune grupları

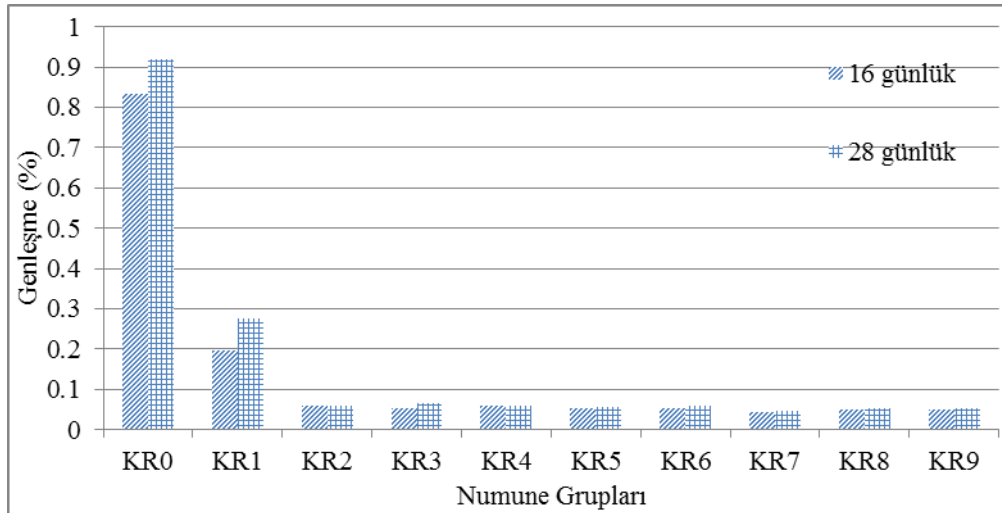
Numune Grubu	Toplam Karışım Miktarları	Katkı Oranları
KR0	Referans Karışım	%0
KR1	(C %85) + (UK%5+YFC%5+SD%5)	%15 Katkı
KR2	(C %70) + (UK%10+YFC%10+SD%10)	%30 Katkı
KR3	(C %55) + (UK%15 +YFC%15 +SD%15)	%45 Katkı
KR4	(C %60) + (UK%30+SD %10)	%40 Katkı
KR5	(C %60) + (YFC%30+SD %10)	%40 Katkı
KR6	(C %60) + (YFC%20+SD %20)	%40 Katkı
KR7	(C %60) + (UK%20+SD %20)	%40 Katkı
KR8	(C %60) + (YFC%25+SD %15)	%40 Katkı
KR9	(C %60) + (UK%25+SD %15)	%40 Katkı
KR10	(C %65)+(UK%20+YFC%15)	%35 Katkı
KR11	(C %65)+(UK%15+YFC%20)	%35 Katkı
KR12	(C %80)+(UK%5+ YFC%15)	%20 Katkı
KR13	(C %75)+(UK%10+ YFC%15)	%25 Katkı
KR14	(C %70)+(UK%15+ YFC%15)	%30 Katkı
KR15	(C %80)+(UK%15+ YFC%5)	%20 Katkı
KR16	(C %75)+(UK%15+ YFC%10)	%25 Katkı
KR17	(C%65)+(UK%20+YFC%0+MK %15)	%35 Katkı
KR18	(C%65)+(UK%0+YFC%20+MK %15)	%35 Katkı
KR19	(C%65)+(UK%12,5+YFC%12,5+MK%10)	%35 Katkı

Tablo 7.5. Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numune gruplarında malzeme karışım oran ve miktarları

Numune Grubu	Agrega (gr)	Çimento (gr)	Uçucu Kül (gr)	Yüksek Fırın Cürufu (gr)	Silis Dumanı (gr)	Su (gr)	S/Ç	A/Ç
KR0	1320	587	-	-	-	276	0.47	2.25
KR1	1320	498.95	29.35	29.35	29.35	276	0.47	2.25
KR2	1320	410.9	58.7	58.7	58.7	276	0.47	2.25
KR3	1320	322.85	88.05	88.05	88.05	276	0.47	2.25
KR4	1320	352.2	176.1	-	58.7	276	0.47	2.25
KR5	1320	352.2	-	176.1	58.7	276	0.47	2.25
KR6	1320	352.2	-	117.4	117.4	276	0.47	2.25
KR7	1320	352.2	117.4	-	117.4	276	0.47	2.25
KR8	1320	352.2	-	146.75	88.05	276	0.47	2.25
KR9	1320	352.2	146.75	-	88.05	276	0.47	2.25

Tablo 7.6. Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numunelerde 28 günlük genişleme değerleri

Mineral Katkı Oranı	0%	15%	30%	45%	40%	40%	40%	40%	40%	40%
Numune Grubu	KR0	KR1	KR2	KR3	KR4	KR5	KR6	KR7	KR8	KR9
2 günlük	0.045	0.051	0.042	0.041	0.043	0.047	0.036	0.035	0.038	0.038
5 günlük	0.262	0.078	0.055	0.045	0.05	0.05	0.04	0.042	0.044	0.044
9 günlük	0.602	0.096	0.056	0.05	0.05	0.052	0.043	0.043	0.046	0.046
16 günlük	0.835	0.199	0.06	0.054	0.06	0.054	0.053	0.046	0.049	0.049
28 günlük	0.921	0.276	0.062	0.066	0.061	0.056	0.059	0.049	0.053	0.053



Şekil 7.2. Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numunelerde deney sonuçları

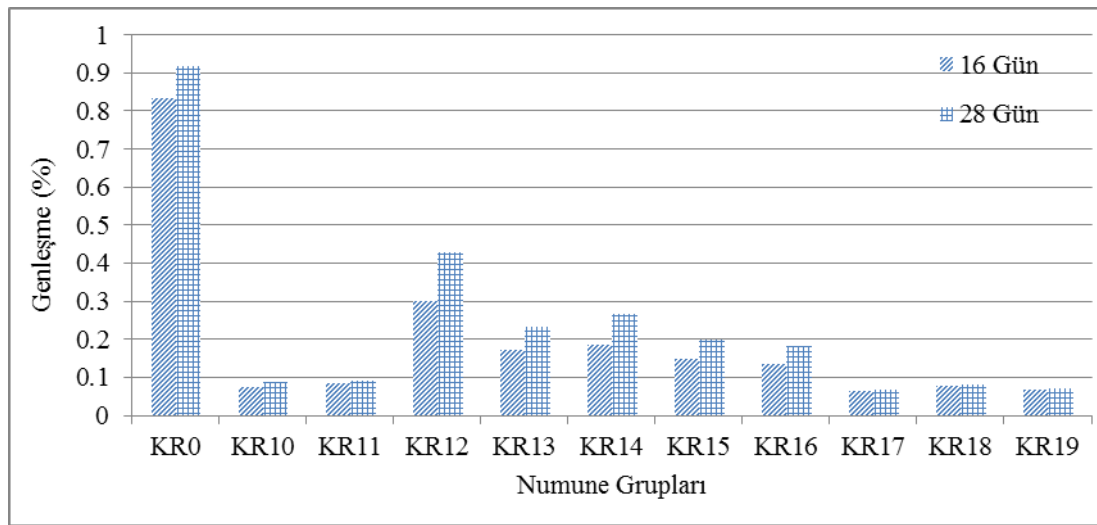
İkinci defa mineral katkıları ile çimento kısmi yer değiştirme yöntemiyle hazırlanan numune karışım oran ve miktarları Tablo 7.7’de görülmektedir. Hazırlanan bu karışım gruplarına ait hızlandırılmış harç çubuğu deney standardı kuralarına uygun olarak 28 günlük genleşme değerleri Tablo 7.8’de genleşme sonuçları grafiği’de Şekil 7.3’te görülmektedir.

Tablo 7.7. Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numunelerde malzeme karışım oranları

Numune Grubu	Agrega (gr)	Çimento (gr)	Uçucu Kül (gr)	Yüksek Fırın Cürufu (gr)	Silis Dumanı (gr)	Su (gr)	S/Ç	A/Ç
KR0	1320	587	-	-	-	276	0.47	2.25
KR10	1320	381.55	117.4	88.05	-	276	0.47	2.25
KR11	1320	381.55	880.5	117.4	-	276	0.47	2.25
KR12	1320	469.6	29.35	88.05	-	276	0.47	2.25
KR13	1320	440.25	58.7	88.05	-	276	0.47	2.25
KR14	1320	410.9	88.05	88.05	-	276	0.47	2.25
KR15	1320	469.6	88.05	29.35	-	276	0.47	2.25
KR16	1320	440.25	88.05	58.70	-	276	0.47	2.25
KR17	1320	381.55	117.4	-	88.05	276	0.47	2.25
KR18	1320	381.55	-	117.4	88.05	276	0.47	2.25
KR19	1320	381.55	73.375	73.375	58.7	276	0.47	2.25

Tablo 7.8. Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numunelerde 28günlük genişleme değerleri

Mineral Katkı Oranı	0%	35%	35%	20%	25%	30%	20%	25%	35%	35%	35%
	KR0	KR10	KR11	KR12	KR13	KR14	KR15	KR16	KR17	KR18	KR19
2 Gün	0.045	0.033	0.064	0.048	0.055	0.05	0.0513	0.051	0.045	0.058	0.034
5 Gün	0.262	0.062	0.07	0.08	0.074	0.072	0.0679	0.072	0.051	0.064	0.051
9 gün	0.602	0.065	0.077	0.207	0.109	0.126	0.0921	0.089	0.063	0.071	0.067
16 Gün	0.835	0.076	0.085	0.3	0.173	0.187	0.1482	0.135	0.066	0.077	0.069
28 Gün	0.921	0.089	0.092	0.431	0.235	0.267	0.2016	0.182	0.070	0.082	0.071



Şekil 7.3. Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numunelerde genişleme sonuçları

Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan karışım grupları deney sonucu genişleme değerleri incelendiğinde çimentonun % 60 ila %65 aralığında toplam mineral katkıların % 30 ila %40 aralığında olması durumunda alkali silika reaksiyon oluşumunu önemli derecede azalttığı tespit edilmiştir.

7.4. Mineral Katkı Kombinasyonları ile Hazırlanan Numune Gruplarında Optimizasyon Çalışmaları

7.4.1. Kullanılan mineral katkılara ait ilişki analizi sonuçları

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen farklı oranlarda silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin ve çimento kullanılarak üretilen harç çubuklarına ait

boy genişleme değerlerinin kullanılan puzolan ve çimento türü ve miktarı arasında ilişki olup olmadığını kontrol etmek amacıyla korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen Pearson korelasyon analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 7.9'da verilmiştir.

Tablo 7.9. Harç çubuklarındaki uzama miktarı ile çimento ve puzolanların ilişkisi

Değişkenler	Genleşme (%)	Silis Dumanı (%)	Uçucu Kül (%)	Yüksek Fırın Curufu (%)	Çimento (%)	Metakaolin (%)
Uzama (%)	1	-0.418**	-0.350**	-0.294*	0.905**	-0.195
SD (%)	-0.418**	1	0.023	0.023	-0.572**	-0.337**
UK (%)	-0.350**	0.023	1	-0.593**	-0.329*	-0.047
YFC (%)	-0.294*	0.023	-0.593**	1	-0.329*	-0.047
Çimento (%)	0.905**	-0.572**	-0.329*	-0.329*	1	-0.144
MK (%)	-0.195	-0.337**	-0.047	-0.047	-0.144	1

Elde edilen korelasyon analizi sonuçlarına göre harç çubuklarındaki genişleme miktarı üzerinde;

1. Puzolan olarak silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun istatistiksel olarak önemli derecede ilişkisi olduğu,
2. Metakaolinin ise genişleme değerleri üzerinde istatistiksel olarak önemli bir ilişkisinin olmadığı,
3. Puzolanların genişleme değerleri ile olan ilişkisinin önemli fakat negatif olduğu, diğer bir ifade ile puzolan miktarındaki artışa bağlı olarak genişleme değerlerinin ters orantılı olarak azaldığı söylenebilir. Buradan puzolan kullanımı ile ASR den kaynaklı genişlemelerin azaltılabileceği anlaşılmaktadır.
4. Çimento miktarı ile genişleme değerleri arasında 0.905 gibi yüksek oranda pozitif ilişkinin olduğu görülmektedir. Buradan çimento miktarı arttıkça genişleme miktarlarında da bir artışın olacağı, azaldıkça genişleme değerlerinin de azalacağı söylenebilir. Korelasyon analizi sonucunda puzolanların tamamının genişleme değerlerini azaltıcı bir etkiye sahip olduğu, çimentonun ise genişleme değerlerini arttırma etkisinin olduğu söylenebilir.

7.4.2. Silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun birlikte kullanımı ile optimizasyon çalışmalarının sonuçları

Bu açıklamalara bakılarak önce karışımlarda mineral katkı olarak silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun bulunduğu 17 farklı deney grubunda elde edilen genişleme değerleri kullanılarak analizler yapılmış, optimum karışım denklemleri bulunmuştur.

17 farklı deney grubunda elde edilen genişleme değerleri SPSS Pasw 18 İstatik Analiz programında çoklu regresyon linear analiz yönteminde değerlendirilmiştir. Programda genişleme değerleri bağımlı olarak, metot enter seçilirken etkileyen faktörler olarak da çimento, silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu karışım oranları ele alınmıştır (Tablo 7.10).

Tablo 7.10. Program girdileri ve metot

Model	Değişken Girdiler	Metot
1	Çimento, Silis Dumanı (SD), Uçucu Kül (UK), Yüksek Fırın Cürufu (YFC)	Enter

Anova istatistik programı alt başlığında, 0.05 ve 0.1 kritik değerler arasında program çalıştırılmıştır. Regresyon katsayısı ve modelin tahmini hatası bulunmuştur (Tablo 7.11).

Tablo 7.11. Model çözümü özeti

Model Özeti				
Model	Korelasyon Katsayısı R	Regresyon Katsayısı R ²	Düzenlenmiş R ²	Modelin Tahmini Hatası
1 Çözüm	0.951	0.904	0.874	0.10005

Regresyon için kökeni (no-kesişim modeli) ile R² regresyon ile açıklanabilir kökeni hakkında bağımlı değişken olarak değişkenlik oranı ölçmektedir. Model Çözümün verdiği sonuçlar da mineral katkı miktarlarına ait amaç fonksiyon katsayıları ve yapılan testin anlamlılık düzeyi elde edilmiştir (Tablo 7.12).

Tablo 7.12. Lineer Regresyon sonuçlarına göre elde edilen amaç fonksiyon katsayıları ve anlamlılık düzeyi

Model Çözümü Sonucu Katsayılar					
Etken Faktörler	Standardize edilmemiş katsayılar		Standardize edilmiş katsayılar	t	Anlamlılık Düzeyi $P \geq 0,05$
	B (Amaç Fonksiyon Katsayıları)	Standart Hata	Beta		
SD	-0.725	0.311	-0.264	-2.328	0.037
UK	-1.171	0.270	-0.612	-4.340	0.01
YFC	-1.082	0.270	-0.566	-4.010	0.01
CEMENT	0.732	0.074	1.802	9.728	0.00

Anlamlılık düzeyine göre sağlıklı deney sonuçlarına ulaşıldığı görülmüştür. Analiz sonuçlarına göre elde edilen amaç fonksiyon katsayılarını excel programında kullanarak model genişleme çalışması yapılmıştır (Tablo 7.13).

Tablo 7.13. Amaç fonksiyon katsayıları ile model genişleme çalışması

	SD	UK	YFC	Çimento	
Amaç fonksiyon katsayıları	-0.725	-1.171	-1.082	0.723	
Kısıtlılık Oranları	≤ 0.10	≤ 0.20	≤ 0.30	≥ 0.65	
İşlem Sonucu Karar Değişken Oranları	%0	%20	%15	%65	= Toplam 1
Model Genişleme Değeri	Z = 0.07345 Optimum genişleme program tarafından bulunmuştur.				

Modelleme formülü hazırlarken mineral katkıları max %35, çimentoyu %65 üzeri olacak şekilde dizayn edilmiştir. Ayrıca formülde mineral katkıları silis dumanı $\leq 0,10$, uçucu kül $\leq 0,20$ ve yüksek fırın cürufu $\leq 0,30$ ve üçüne ait üst sınır (0,35), çimentoda ise $\geq 0,65$ olacak şekilde kısıtlılık uygulanarak en uygun karışımı ve genişleme değerini veren optimum karışım bulunmuştur (Tablo 7.14).

Tablo 7.14. Modelleme çalışması sonucunda bulunan optimum karışım formülü

SD	UK	YFC	Çimento	Model Genişleme Değeri	Deney Sonucu Genişleme Değeri
%0	%20	%15	%65	0.07345	0.079096

Modelleme çalışması sonunda bulunan optimum karışımı veren denklem ise şöyledir.
(Denklem 7.1)

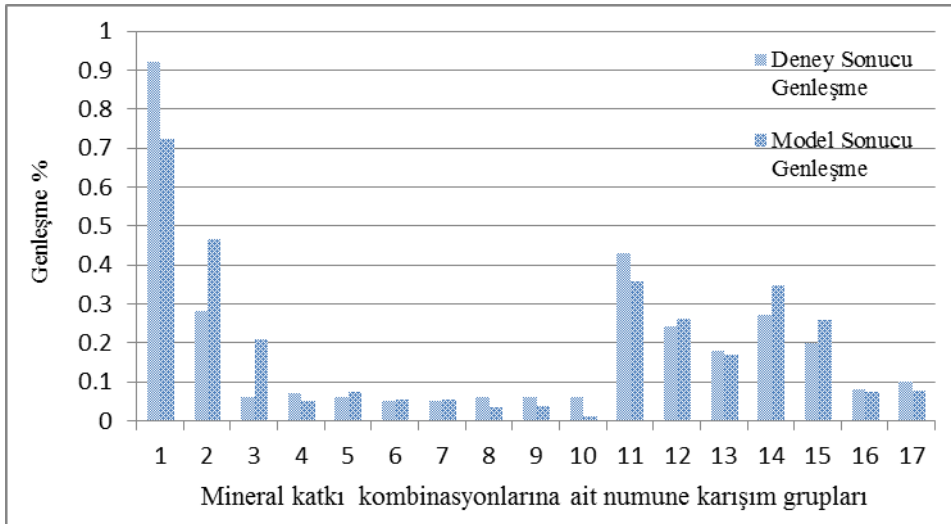
$$MGS = \{ (-0,725 * SD) + (-1,171 * UK) + (1,082 * YFC) + (0,723 * \text{Çimento}) \} \quad (7.1)$$

MGS: Model Genleşme Sonucu

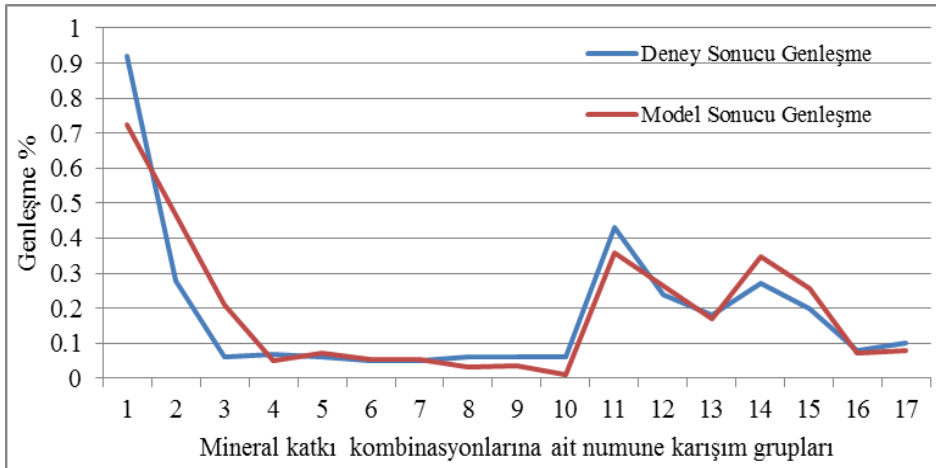
Bu denklem formülü ile elde edilen genleşme değerleri ve deney sonuçları Tablo 7.15’de, bu değerlere ait grafikler ise Şekil 7.4 ve Şekil 7.5’de görülmektedir.

Tablo 7.15. Optimum karışım denklem sonucu bulunan model genleşme değerleri ve deney sonuçları

Deney Grupları	Deney Sonucu Genleşme	Model Sonucu Genleşme	Mineral Katkı Türleri			Çimento
			SD	UK	YFC	
1	0.920565	0.723	0	0	0	1
2	0.275593	0.46565	0.05	0.05	0.05	0.85
3	0.061921	0.2083	0.1	0.1	0.1	0.7
4	0.065989	0.04905	0.15	0.15	0.15	0.55
5	0.059322	0.0724	0.2	0	0.2	0.6
6	0.049152	0.0546	0.2	0.2	0	0.6
7	0.052768	0.05455	0.15	0	0.25	0.6
8	0.05661	0.0323	0.15	0.25	0	0.6
9	0.056045	0.0367	0.1	0	0.3	0.6
10	0.061017	0.01	0.1	0.3	0	0.6
11	0.430847	0.35755	0	0.05	0.15	0.8
12	0.235028	0.26285	0	0.1	0.15	0.75
13	0.181865	0.16815	0	0.15	0.15	0.7
14	0.267458	0.34865	0	0.15	0.05	0.8
15	0.201582	0.2584	0	0.15	0.1	0.75
16	0.079096	0.07345	0	0.2	0.15	0.65
17	0.096723	0.0779	0	0.15	0.2	0.65



Şekil 7.4. Model genleşme değerleri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 7.5. Model genleşme değerleri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması

Bu tablo ve grafik değerlerine bakıldığında mineral katkıların toplamı % 35 çimentonun % 55 ve üzeri olduğunda bulunan deney genleşme sonuçları ile model genleşme değerleri arasında ciddi bir uyumun olduğu söylenebilir.

7.4.3. Silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolinin birlikte kullanımı ile optimizasyon çalışmalarının sonuçları

Programda genleşme değerleri bağımlı olarak, metot enter seçilirken etkileyen faktörler olarak da çimento, metakaolin, silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu karışım oranları ele alınmıştır (Tablo 7.16).

Tablo 7.16. Program girdileri ve metot

Model	Değişken Girdiler	Metot
2. Çözüm	Çimento, Silis Dumanı (SD), Uçucu Kül (UK), Yüksek Fırın Cürufu (YFC), Metakaolin (MK)	Enter

Anova istatistik programı alt başlığında, 0.05 ve 0.1 kritik değerler arasında program çalıştırılmıştır. Regresyon katsayısı ve modelin tahmini hatası bulunmuştur (Tablo 7.17).

Tablo 7.17. Model 2. çözümünün özeti

Model Özeti				
Model	Korelasyon katsayısı R	Regresyon katsayısı R ²	Düzenlenmiş R ²	Modelin Tahmini Hatası
2. Çözüm	0.867	0.752	0.692	0.12994

Regresyon için kökeni (no-kesişim modeli) ile R² regresyon ile açıklanabilir kökeni hakkında bağımlı değişken olarak değişkenlik oranı ölçmektedir. Model Çözümün verdiği sonuçlar da mineral katkı miktarlarına ait amaç fonksiyon katsayıları ve yapılan testin anlamlılık düzeyi elde edilmiştir (Tablo 7.18).

Tablo 7.18. Lineer Regresyon sonuçlarına göre elde edilen amaç fonksiyon katsayıları ve anlamlılık düzeyi

Model Çözümü Sonucu Katsayılar					
Etken Faktörler	Standardize edilmemiş katsayılar		Standardize edilmiş katsayılar	t	Anlamlılık Düzeyi P _≥ ,05
	B (Amaç Fonksiyon Katsayıları)	Standart Hata	Beta		
MK	-1.789	0.471	-0.540	-3.798	0.001
SD	-0.585	0.271	-0.342	-2.154	0.043
UK	-0.504	0.272	-0.294	-1.850	0.078
YFC	-0.752	0.378	-0.267	-1.991	0.060
CEMENT	0.504	0.074	1.555	6.835	0.000

Anlamlılık düzeyine göre sağlıklı deney sonuçlarına ulaşıldığı görülmüştür. Amaç fonksiyon katsayıları kullanılarak genişleme değerlerini olumlu veren denklem

oluşturulmuştur. Analiz sonuçlarına göre elde edilen amaç fonksiyon katsayılarını excel programında kullanarak model genişleme çalışması yapılmıştır (Tablo 7.19).

Tablo 7.19. Amaç fonksiyon katsayıları ile model genişleme çalışması

	MK	SD	UK	YFC	Çimento	
Amaç fonksiyon katsayıları	-1.789	-0.585	-0.504	-0.752	0.504	
Kısıtlılık Oranları	≤ 0.05	≤ 0.20	≤ 0.20	≤ 0.05	≥ 0.65	
İşlem Sonucu Karar Değişken Oranları	%5	%20	%5	%5	%65	= Toplam 1
Model Genleşme Değeri	Z = 0.058349 Optimum genişleme program tarafından bulunmuştur.					

Modelleme formülü hazırlarken mineral katkıları max %35, çimentoyu %50 üzeri olacak şekilde dizayn edilmiştir. Ayrıca formülde mineral katkıları silis dumanı $\leq 0,05$, uçucu kül ≤ 0.20 , yüksek fırın cürufu ≤ 0.20 ve metakaolin ≤ 0.05 dördüne ait üst sınır (0.35), çimentoda ise ≥ 0.65 olacak şekilde kısıtlılık uygulanarak en uygun karışımı ve genişleme değerini veren optimum karışım bulunmuştur (Tablo 7.20).

Tablo 7.20. Modelleme çalışması sonucunda bulunan optimum karışım ve sonucu

MK	UK	YFC	SD	Çimento	Model Genleşme Değeri
%5	%20	%5	%5	%65	0.058349

Modelleme çalışması sonunda bulunan optimum karışımı veren denklem ise şöyledir. (Denklem 7.2)

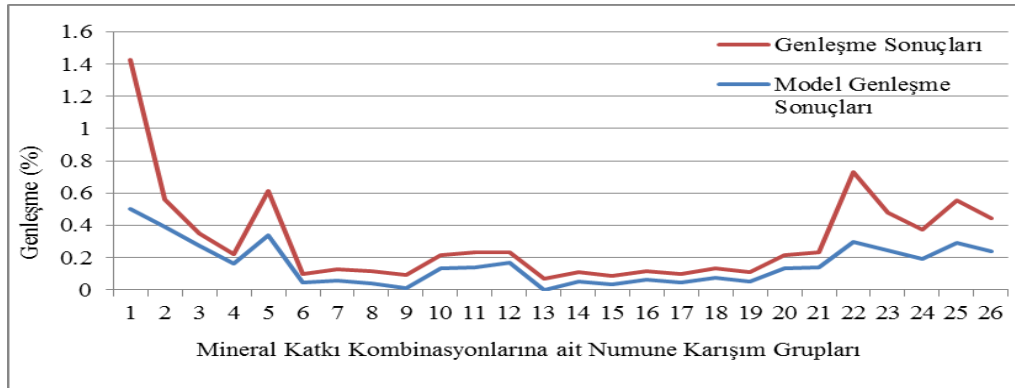
$$MGS = \{(-1.789 * MK) + (-0.585 * UK) + (-0.504 * YFC) + (-0.752 * SD) + (0.504 * \text{Çimento})\} \quad (7.2)$$

MG : Model Genleşme Sonucu

Bu denklem formülü ile elde edilen genişleme değerleri ve deney sonuçları Tablo 7.21'de, bu değerlere ait grafikler ise Şekil 7.4 ve Şekil 7.5'de görülmektedir.

Tablo 7.21. Optimum karışım denklem sonucu bulunan model genişleme sonuçları ve deney sonuçları

Model Genleşme Sonuçları	Genleşme Sonuçları	MK	UK	YFC	SD	Çimento
0.504	0.921	0	0	0	0	1
0.38935	0.171	0.05	0	0	0	0.95
0.2747	0.076	0.1	0	0	0	0.9
0.16005	0.064	0.15	0	0	0	0.85
0.33635	0.275593	0	0.05	0.05	0.05	0.85
0.0454	0,053	0.2	0	0	0	0.8
0.05775	0.068136	0.15	0.2	0	0	0.65
0.04155	0.075819	0.15	0	0.2	0	0.65
0.01217	0.081243	0.1	0.13	0.12	0	0.65
0.135	0.079096	0	0.2	0.15	0	0.65
0.13905	0.096723	0	0.15	0.2	0	0.65
0.1687	0.061921	0	0.1	0.1	0.1	0.7
0.00105	0.065989	0	0.15	0.15	0.15	0.55
0.0512	0.059322	0	0	0.2	0.2	0.6
0.035	0.049152	0	0.2	0	0.2	0.6
0.0636	0.052768	0	0	0.25	0.15	0.6
0.04335	0.05661	0	0.25	0	0.15	0.6
0.076	0.056045	0	0	0.3	0.1	0.6
0.0517	0.061017	0	0.3	0	0.1	0.6
0.135	0.079096	0	0.2	0.15	0	0.65
0.13905	0.096723	0	0.15	0.2	0	0.65
0.29835	0.430847	0	0.05	0.15	0	0.8
0.2439	0.235028	0	0.1	0.15	0	0.75
0.18945	0.181865	0	0.15	0.15	0	0.7
0.29025	0.267458	0	0.15	0.05	0	0.8
0.23985	0.201582	0	0.15	0.1	0	0.75



Şekil 7.6. Model genleşme değerleri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması

Analiz sonuçlarına göre elde edilen amaç fonksiyon katsayılarını excel programında kullanarak optimum sonuçları veren modelleme çalışmalarına devam edilmiştir.

Modelleme formülü hazırlarken mineral katkıları max %35, çimento %65 üzeri olacak şekilde dizayn edilmiştir. Ayrıca formülde mineral katkıları silis dumanı ≤ 0.05 ve 0.10 aralığında, uçucu kül ≤ 0.20 ve 0.25 aralığında, yüksek fırın cürufu ≤ 0.25 ve 0.30 ve metakaolin ≤ 0.05 ve 0.10 aralığında olacak şekilde kısıtlılık uygulanmıştır.

Toplam mineral katkı karışımları üst sınırı %0.35, çimento ise %0,65 \geq olacak şekilde model genleşme değeri ve optimum karışım miktarları elde edilmiştir (Tablo 7.22).

Tablo 7.22. Optimum genleşme değerlerini veren optimum karışım miktarları

Model Çözüm Sayısı	MK	SD	UK	YFC	Çimento	Model Genleşme Değeri	Deney Sonucu Genleşme Değeri
1	-	-	%20	%15	%65	0.07345	0.079096
2	-	%10	%20	0.05	%65	0.08495	-
3	-	%10	%16.3	%8.75	%65	0.070437	-
4	-	%5	0.25	%5	%65	0.086	-
5	-	%5	%20	%10	%65	0.09535	-
6	%5	%5	%20	%5	%65	0.058349	-
7	%5	-	%15	%15	%65	0.101303	-
8	%5	-	%20	%10	%65	0.099101	-

Bu sonuçlar yorumladığında metakaolin katkısının %5 , silis dumanının %5~%10, F sınıfı uçucu külün %15~%25 ve yüksek fırın cürufunun %5~%15 aralığında kullanılması durumunda alkali silika reaksiyonu çatlaklarının oluşum sürecinin geciktirileceği söylenebilir. Dolayısıyla ASR'den kaynaklanan beton hasarlarının uzun yıllar boyunca görülmeyeceği kaçınılmaz olacaktır.

Yapılan bu çalışma sonuçlarına göre mineral katkı kombinasyonları ile ASR oluşumu tamamen engellenmiş olmaktadır. Tabiki kullanılacak agreganın reaktiflik düzeyi bu sonuçları etkilemektedir. Bu nedenle her nerede olursa olsun agreganın önce alkalilik düzeyinin belirlenerek hareket edilmesi önerilmektedir.

BÖLÜM 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Puzolanik veya mineral katkıların kullanılmasının betonun durabilitesini ve ASR etkilerine karşı direncini artırması bakımından avantajlara sahip olduğu bilinmektedir. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı veya metakaolin gibi mineral katkı malzemelerin çimentoya uygun bir ilave ikamesinde kullanıldığında önlenemediği görülmüştür. Uçucu kül, metakaolin ve yüksek fırın cürufunun harç çubuklarındaki genleşmeyi erken yaşlarda (örneğin, 28 günde) azalttığı gözlenmiştir. Çalışma içeriğinde yüksek reaktif olan agregalarda ortalama %30~%35 civarında uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun birlikte kullanıldığında ASR hasarını azaltmada etkili olduğu görülmüştür.

1. Uçucu külün, harçlarda %25 üzeri oranda kullanılması ile A1 agregasında referans numune genleşme değerine göre ASR'yi %76 dolayında,
2. Yüksek fırın cürufunun, harçlarda %30 üzeri oranda kullanılması ile A1 agregasında referans numune genleşme değerine göre ASR'yi %78 dolayında,
3. Metakaolinin, harçlarda %10 oranında kullanılması ile A1 agregasında referans numune genleşme değerine nazaran ASR'yi % 82 dolayında limit değerinin altına düşürmüştür.
4. Silis dumanı ikamesinde ise %20 oranında kullanıldığında ASR'yi %80 dolayında azaltığı tespit edilmiştir.

Fakat silis dumanı ikamesinin % 10 üzerinde kullanımında görülen reolojik özellikler nedeni ile silis dumanının ASR'yi azaltmadığı bilinmektedir. Silis dumanı katkısının beton dayanımlarında önemli rolü bulunmasına rağmen, ASR'yi azaltmada etkili olmadığı silis dumanı katkılı numune genleşme değerlerinde görülmüştür. Bunun sebebi olarak agreganın yüksek alkali reaktivite içermesi ve harç içinde silis dumanı topraklar halinde kaldığı için ASR çatlaklarını oluşturmuştur.

Buna göre silis dumanı, betonda ASR sıkıntısını gidermemektedir. Bu nedenle alkali silika reaksiyonunda kullanılacak silis dumanı ile agreganın önceden birlikte denenmesi ile önceden önlem alınması önerilmektedir.

Deneyel çalışma sürecinde yapılan harç çubuğu, hızlandırılmış harç çubuğu ve otoklav deneyi test sonuçlarına göre elde edilen verilerin değerlendirildiği Tablo 8.1’de ASR genleşmelerini önlemede etkin olan mineral katkı yüzdeleri görülmektedir.

Tablo 8.1. ASR genleşmelerini önlemede etkin olan mineral katkı yüzdeleri

Mineral Katkı Türü	Alkali Düzeyi (% Na ₂ O Eşdeğer)	Mineral Katkı Asgari Seviyesi (%)		
		Düşük Seviye	Orta Seviye	Yüksek Seviye
Çimento	0.52 < 0.60	Katkı ikamesine göre değişmektedir		
Uçucu Kül	1.66 < 3.00	15	20-25	30-35
Yüksek Fırın Cürufu	1.27 < 1.00 olması gerekirdi.	25	30-35	40-45
Silis Dumanı (SiO ₂ > %85)	0.86 < 1.00	15	20-25	30
Metakaolin	0.45	5	10	15-20

Görüldüğü üzere her üç deney metodunda da kullanılan mineral katkıların %25~%30 oranının üzerinde kullanıldığında ASR’nin standart değerlerin altında azalttığı gözlenmiştir.

Her ne kadar uzun dönem genleşme sonuçları 6 aylık standart değerlerin altında kaldığı görüldü isede 12 aylık sonuçların hızlandırılmış harç çubuğu yöntemindeki sonuçlarla uyduğu görülmüştür.

1. Uzun dönem deneyi 12 ay boyunca devam ettirilmiş olup, katkı olarak kullanılan mineral katkıların %25 üzerinde olduğunda ASR’nin 0.05 değeri civarında kaldığı, genel anlamda %25’ten daha az katkılı harç türlerinde 12 ay değerlerinin 0.10 ‘nun altında olması ASR için etkili olduğunu göstermektedir.

2. Hızlandırılmış harç çubuğu 28 gün için kabul edilen standart azalmayı %25 üzerinde kullanılan mineral katkılı numune sonuçlarında tespit edilmiştir.

3. Otoklav deney yönteminde bulunan değerleri yorumladığında 0.065~0.060 ve alt seviyelerinin ASR için yararlı, 0.065 seviyesinin üzerinde ise zararlı olduğu gözlenmiştir.

Ayrıca alkali içeriği karışım suyuna NaOH eklenerek %3.5 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$ değerine yükseltile numunelerde boşluk miktarının artması nedeniyle genleşme sonuçları olumsuz sonuçlar vermiştir. Otoklav deney yönteminin kısa sürede sonuç vermesi açısından beton elemanların dayanıklılığı yönünü ilgilendirdiği için kullanılabilirliğini yorumladığında karışım suyu saf olan numunelerde 12 aylık sonuçlar ve 28 günlük sonuçlar bazında iyi bir korelasyon içerisinde olduğunu görmüştür.

Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numune grupları ile deneyler yapılmıştır.

Buna göre silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin birlikte toplam mineral katkı miktarı %25~%40, çimentonun %55 ve üzeri oranda kullanıldığında ASR'yi önlediği tespit edilmiştir. Mineral katkı kombinasyonları ile hazırlanan numune gruplarının deneylerinden elde edilen genleşme değerleri SPSS Pasw 18 İstatik Analiz programında çoklu regresyon linear analiz yönteminde kullanılmıştır.

Analiz sonuçlarına elde edilen katsayıları excel programında kullanarak model genleşme çalışması yapılmıştır. Model genleşme formülü hazırlarken mineral katkıları max %35, çimento %65 üzeri olacak şekilde dizayn edilmiştir.

Ayrıca formülde mineral katkıları silis dumanı $\leq\%5\sim\%10$ aralığında, uçucu kül $\leq\%20\sim\%25$ aralığında, yüksek fırın cürufu $\leq\%25\sim\%30$, metakaolin $\leq\%5\sim\%10$ ve çimento $\geq\%65$ aralığında olacak şekilde kısıtlılık şartları uygulanmıştır.

Toplam mineral katkı karışımları üst sınırı %35, çimento ise %65 olacak şekilde optimum genleşme değerleri ve optimum karışım miktarları elde edilmiştir. Mineral katkı kombinasyonlarında aşağıda tespit edilen katkı miktarlarının ASR'yi azaltmada yeterli olacağı belirlenmiştir.

1. Silis dumanı katkısının ise ASR'yi azaltmada etkili olabileceği mineral katkı karışımlarında %5 ~ %10 katkı miktarının yeterli olacağı,
2. Metakaolin katkısının ise ASR'yi azaltmada son derece etkili olduğu mineral katkı karışımlarında %5 katkı miktarının yeterli olacağı,
3. Uçucu külde ise F sınıfı külün C sınıfı küle nazaran çok daha etkili olduğu tek başına kullanıldığında %25 üzeri katkı ASR'yi azaltmada etkili olurken, mineral katkı karışımlarında ise %15 ~ %20 katkı miktarının yeterli olacağı,
4. Yüksek fırın cürufunda ise tek kullanıldığında %35 üzeri katkı ASR' yi azaltırken, mineral katkı karışımlarında ise %5 ~ %15 katkı miktarının yeterli olacağı tespit edilmiştir.

Elde edilen verileri kullanarak bulunan model genleşme değerleri aşağıdaki gibidir;

1. %10SD, %16.3UK, %8.75YFC ve %65 çimento karışımında genleşme değeri 0.07,
2. %5SD, %25UK, %5YFC ve %65 çimento karışımında genleşme değeri 0.086,
3. %5SD, %20UK, %10YFC ve %65 çimento karışımında genleşme değeri 0.0953
4. %5MK, %15UK, %15YFC ve %65 çimento karışımında genleşme değeri 0.10.1,
5. %5MK, %20UK, %10YFC ve %65 çimento karışımında genleşme değeri 0.099

Optimum karışımları veren model genleşme değerleri alkali silika değerlerini standartların altında azaltması baz alınarak bulunmuştur.

Uzun süren deney süreci yapılan bu çalışma ile tamamen kısaltılmış bulunmaktadır. Kullanılacak agreganın reaktiflik düzeyi bu sonuçları etkileyeceği göz ardı edilmemelidir. Bu nedenle her nerede olursa olsun agreganın önce alkalilik düzeyinin belirlenerek hareket edilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] MATHER, B., "How to make concrete that will not suffer deleterious alkali-silica reactions," Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 1277-1280, 1999.
- [2] BACK, F., THORSEN, T.S. and NIELSEN, M.P., "Load-carrying capacity of structural members subjected to alkali-silica reactions," Construction and Building Materials, Vol. 7, No. 2, pp. 109-115, 1993.
- [3] LEGER, P., COTE, P., and Tinawi, R., "Finite element analysis of concrete swelling due to alkali-aggregate reactions in dams," Computers and Structures, Vol. 60, No. 4, pp. 601-611, 1996.
- [4] FERNANDES, I., NORONHA, F., and TELES, M., "Microscopic analysis of alkali-aggregate reaction products in 50-year-old concrete," Material Characterization, Vol. 53, pp. 295-306, 2004.
- [5] SWENSON, E.G., and GILLOTT, J.E., "Alkali reactivity of dolomitic limestone aggregate," Magazine of Concrete Research, Cement and Concrete Association, Vol. 19, No. 59, pp. 95-104, 1967.
- [6] SAĞLIK, A., KOCABEYLER, M., ORKUN, Y., HALICI, M., TUNÇ, E., Deriner Barajı ve Hes İnşaatı Kütle Betonunda Kullanılması Planlanan Agregalarda Alkali-Silis Reaksiyonu Riski ve Önlenmesine Yönelik Yürütülen Çalışmalar, Makale 5. Ulusal Beton Kongresi, 2003.
- [7] SWAMY, R.N., The Alkali Silica Reaction in Concrete. Van Nostrand, London, pp.96-12, 1992.
- [8] UĞUR, L., Alkali-Silis Reaksiyonu, T.C. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Ana Bilim Dalı, Ankara, Aralık 2002.
- [9] ŞENSÖZ, B., YALÇIN, S., Çimento Fırınlarında Alkali Klorür Sirkülasyonunun Kemer Oluşumu Üzerine Etkileri, 2001.
- [10] American Society for Testing and Materials, ASTM C 150-05, "Standard Specification for Portland Cement," Annual book of ASTM Standards.
- [11] Canadian Standards Association (CSA) A23.2-25A, "Test method for detection of alkali silica reactive aggregate by accelerated expansion of mortar bars." CSA International, Toronto, Ontario, Canada, 2000.

- [12] FARNY, J. A., KOSMATKA, S. H., Diagnosis and control of alkali aggregate reactions in concrete, Concrete Information, Portland Cement Association, 23 p. 1997.
- [13] SİBBİCK R.G., PAGE C.L., Treshold alkali contents for expansion of concrete containing British aggregates, Cement and Concrete Research, vol. 22: 990-994, 1991.
- [14] DİAMOND, S., Alkali silica reactions- Some paradoxes, Cement and Concrete Composites, 19: 391-401, 1997.
- [15] ARSLAN, M., “Beton (Dökümü, Kalıpları, Kusurları, Dayanıklılığı)”, İstanbul, Atlas yayınevi, 167-216, 2001.
- [16] BAYHAN, B. Deprem Hasarlarının Bir Bileşeni Olarak Alkali Silika Reaksiyonları, T.C. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Ana Bilim Dalı, İstanbul, 2006.
- [17] HOBBS, D. W., Alkali-Silica Reaction in Concrete, Thomas Telford, London 1988.
- [18] DİAMOND, S., PENKO M., “Alkali Silica Reaction Processes: The Conversion of Cement Alkalis to Alkali Hydroxide” ,G. M. Idorn Inter. Symposium, Durability of Concrete ACI SP-131, 1992.
- [19] DİAMOND, S., “Alkali Reactions in Concrete Pore Solutions Effects”, Proc. 6th Int. Conf, Alkalis in Concrete, Idom G.M. and Rostam S. eds. p. 155-166, 1983.
- [20] FİGG J., “An Attempt to Provide an Explanation for Engineers of the Expansive Reaction between Alkalis and Siliceous Aggregates in Concrete”, 6th Int. Conf Alkalis in Concrete Copenhagen 1983.
- [21] HELMUTH, R., STARK, D., Alkali-silica reactivity mechanisms, 131-208, F. Skalny (cd.), Materials Science of Concrete III, The American Ceramic Society, Westerville, 1992.
- [22] STARK, D., “Alkali-Silica Reactions in Concrete”, in Simificance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Makirw Materials, Klieger P. and Lamond J. eds., ASTM STP 169C, 1994.
- [23] IDOM, G.M., JOHANSEN V., THAULOW N., “Assessment of Causes of Cracking in Concrete”, Materials Science in Concrete III, Amer. Ceramic Sot., New York, 1992.
- [24] LESLİE, S., The Influence of Cement Pore Solution on Alkali-silica Reaction NISTIR 87-3632, 1987.

- [25] FERRARIS, C.F., Alkali-Silis Reaksiyonu ve Yüksek Performanslı Beton Ulusal Teknoloji Standartları Enstitüsü Gaithersburg, MD 20899, 1995.
- [26] SCHUMANN, D.C., CARRASQUILLO, R.L., and FARBIARZ, J., State-of-the-art report on the Mechanism of Alkali-Aggregate Reaction in Concrete containing Fly Ash, Research report 450-2, Center for Transportation Research 1988.
- [27] CARRASQUILLO, R.L., FARBIARZ, J., "Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Containing Fly Ash: Final Report" Center of Transportation Research, Research Report #450-3F, 1988.
- [28] GLASSER, F.P., Chemistry of Alkali-Aggregate Reaction, 30-53, The Alkali-Silica Reaction in Concrete, R. N. Swamy (ed), Van Nostrand Reinhold, New York, 333 p, 1992.
- [29] U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration Advisory Circular Subject: Handbook For Identification of Alkali-Silica Reactivity In Airfield Pavements, Initiated By: AAS-100 AC No: 150/5380-8, 2004.
- [30] ANDIÇ, Ö., Alkali-Silis Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkılar Yardımı ile Kontrol Altına Alınması, Y.Lisans Tezi, 2002.
- [31] STONE PRODUCTS CONSULTANTS & STOKOWSKI, Steven J., Alkali- Silica Reactivity in Concrete, U.S.A, 1999, 2003.
- [32] ANDIÇ, Ç.Ö., Alkali-Agrega Reaktivitesinin Tespitinde Kullanılan Deney Metotlarının İncelenmesi Doktora Tezi, 2007.
- [33] KALMIŞ, M., GÜNGÖR, N., ERİBOL, S., Betonda Alkali-Agrega Reaksiyonunun Teşhis ve Kontrolü, T.C. Karayolları Kurs Programı.
- [34] PALMER, D., The Diagnosis of Alkali-Silica Reaction, Report of a Working Party, British Cement Association, 44p. 1988.
- [35] SWAMY, R.N., AL-ASALI, M.M., Engineering properties of concrete affected by alkali silica reaction, ACI Materials Journal, Vol. 85: 367-374, 1988.
- [36] BLIGHT, G.E., MELVER, J.R., SCHUTTE, W.R., RIMMER, R., The effects of alkali aggregate reaction on reinforced concrete structures made with Witwaterstrand quartzite aggregate, Proceedings of the 5th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, S252/15: 1-13, 1981.
- [37] BERUBE, M.A, FRENETTE, J., PEDNEAULT, A., RIVEST, M, Laboratory assessment of the potential rate of ASR expansion of field concrete, Cement, Concrete, and Aggregates, Vol.24, No.1:13-19, 2002.

- [38] STARK, D.C., Alkali silica reactivity in Five Dams in Southwestern United States, Report REC-ERC-85-10, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colo, 64 p. 1985.
- [39] STARK, D.C., How to evaluate the state of alkali silica reactivity (ASR) in concrete, Concrete Repair Digest, Aug-Sept.: 104-107. 1991.
- [40] ACI Committee 221, State of the art report on alkali aggregate reactivity, ACI 221.1R-98, 31 p. 1998.
- [41] TÇMB, Mikroskop İncelemeleri ve Mineralojik Analiz Eğitimi, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge Enstitüsü, 2011.
- [42] POOLE, A. B., Introduction to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 30-53, The Alkali-Silica Reaction in Concrete, R. N. Swamy (ed), Van Nostrand Reinhold, New York, 333p. 1992.
- [43] THAULOW, N., HJORTH J.U., CLARK, B., Composition of alkali silica gel and ettringite in concrete railroad ties: SEM-EDX and X-ray diffraction analyses, Cement and Concrete Research, Vol 26, No.2: 309-318. 1996.
- [44] MORANVILLE, R.M., Products of reaction and petrographic examination, 445-456, Proc. 8th International Conference on Alkali- Aggregate Reaction, Ed. Okada, K., Nishibayashi, S., Kawamura, M., Kyoto, Japan, 886 p. 1989.
- [45] COLE, W.F., LANCUCKI, C.J., Products formed in an aged concrete: the occurrence of okenite, Cement and Concrete Research, 13: 611-618. 1983.
- [46] THORDAL, A.K., THAULOW, N., The study of alkali silica reactions in concrete by the use of fluorescent thin-sections, 71-89, Petrography Applied to Concrete and Aggregates, B. Erlin, D. Stark (Eds.), ASTM STP 1061, ASTM, Philadelphia, USA, 207 p. 1990.
- [47] KIRKPATRICK, R.J., MAS nuclear resonance spectroscopy of cement systems, ACBM Seminar, Northwestern University, Evanston, IL. 1991.
- [48] GUTTERIDGE, W.A., HOBBS, D.W., Some chemical and physical properties of Beltane Opal rock and its gelatinous alkali-silica reaction, Cement and Concrete Research, 10: 183-194. 1980.
- [49] HANSEN, W.C., Studies relating to the mechanism by which alkaliaggregate reaction produces expansion in concrete, Journal of American Concrete Institute Proceedings, 40, No.3: 213-227. 1944.
- [50] VIVIAN, H.E., Studies in cement aggregate reaction, Bulletin No.256, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia, Melbourne, Part X: 13-20. 1950.

- [51] DIAMOND S., Chemistry and other characteristics of ASR gels, 31-40, Proceedings 11th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction, Ed. Berube, M.A., Fournier, B., Durand, B., Quebec, QC, Canada; 1406 p. 2000.
- [52] POWERS, T.C. and Steinour, H.H., An interpretation of some published researches on the alkali-aggregate reaction part II-a hypothesis concerning safe and unsafe reactions with reactive silica in concrete, Journal of American Concrete Institute, 51 (4):785-812. 1955.
- [53] WANG, H., GILLOTT, J.E., Mechanism of alkali-silica reaction and the significance of calcium hydroxide, Cement and Concrete Research, 21: 647-654. 1991.
- [54] CHATTERJĪ, S., An accelerated method for detection of alkali aggregate reactivities of aggregates, Cement and Concrete Research, v.8: 647-650. 1978.
- [55] CHATTERJĪ, S., JENSEN, A.D, THAULOW, N., CHRISTENSEN, P., Studies of alkalisilica reaction. Part 3. Mechanism by which NaCl and Ca(OH)₂ affect the reaction. Cement and Concrete Research, 16: 246-254. 1986.
- [56] CHATTERJĪ, S., Mechanism of alkali-silica reaction and expansion, 101-106, Proc. 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction., Okada K., Nishibayashi S., Kawamura, M. (Eds.), Kyoto, Japan, 886 p. 1989.
- [57] CHATTERJĪ, S., THAULOW, N., Some fundamental aspects of alkali-silica reaction, 21-30, Proc. 11th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction, Ed: Berube, M.A., Fournier, B., Durand, B, Quebec, QC, Canada, 1406 p. 2000.
- [58] FIGG, J., ASR-Inside phenomena and outside effects (crack origin and pattern), 152-156, P.E. Grattan-Bellew (Ed.), Concrete Aggregate Reaction, Noyes Publications, New Jersey (1987), 509 p. 1987.
- [59] PALMER, D., Alkali-Aggregate (Silica) Reaction in Concrete, Cement & Concrete Association, Advisory Note ref. 45.003, Wexham Springs, Slough, UK, 9p. 1977.
- [60] MALVAR, N.J., CLINE, G.D., BURKE, D.F., ROLLINGS, R., SHERMAN, T.W, GREENE, J., Alkali silica reaction mitigation-State of the art, TR-2195-SHR, Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, California, USA, 41p. 2001.
- [61] HEIJNEN, W.M.M., LARBI, J.A., Preventive measures against concretedamage to ASR in the Netherlands, Current state of affairs, HERON, V.44, No.4: 285-298. 1999.

- [62] STANTON, D.E., The expansion of concrete through reaction between cement and aggregate, Proc. American Society of Civil Engineers, 66: 1781-1811. 1940.
- [63] BLANKS, R.F., Concrete deterioration at Parker Dam, Engineering News Record 126: 462-465. 1941.
- [64] MEISSNER, H.S., Cracking in concrete due to expansion reaction between aggregate and high alkali cement as evidenced at Parker Dam, Proc. American Concrete Institute, 37: 549-568. 1941.
- [65] KATAYAMA, T., Characteristics on Alkali Aggregate Reaction, The Study on the Maintenance and Rehabilitation of Highway Bridges in the Republic of Turkey, 11p, (unpublished). 1996.
- [66] KATAYAMA, T., Alkali aggregate reaction in the vicinity of İzmir, Western Turkey, Alkali Aggregate Reaction in Concrete, 365-374, Proc. 11th International Conference, Ed. Berube, M.A., Fournier, B., Durand, B., Quebec, QC, Canada, 1406 p. 2000.
- [67] FERNANDEZ, A., JIMENEZ, P.F., The Alkali-Silica Reaction in Alkali-Activated Granulated Slag Mortars with Reactive Aggregate, Cement and Concrete Research, 32, 1019-1024, 2002.
- [68] TURANLI, L., BEKTAŞ, F., MONTERIO, P.J.M., Use of Grand Clay Brick as A Pozzolanic Material to Reduce The Alkali-Silica Reaction, Cement And Concrete Research, 33, 1539-1542, 2003.
- [69] MLADENOVIC, A., SUPUT, J.S., DUCMAN, V., SKAPINGLASSER, A.S., Alkali-Silis Reactivity of Some Frequently Used Lightweight Aggregates, Cement And Concrete Research, 34, 1809-1816, 2004.
- [70] JENSEN V., Alkali-Silica Reaction Damage To Elgester Bridge, Trondheim, Norway; A Review of Construction, Research and Repair up to 2003, Elsevier, Materials Characterization 53 155-170, , 2004.
- [71] HADDAD, R. H., SMADI, M. M., Role of Fibers in Controlling Unrestrained Expansion and Arresting Cracking in Portland Cement Concrete Undergoing Alkali-Silica Reaction, Civil Engineering Department, Jordon University of Science and Technology, Cement And Concrete Research 34 (2004) 103-108.
- [72] ÇAKIR, Ö., Aköz, F., Alkali Agregat Reaksiyonunun Hızlandırılmış Deney Yöntemleriyle Araştırılması. TMMOB, İMO İstanbul Şubesi, 5. Ulusal Beton Kongresi, ss. 175-184, İstanbul, 1-3 Ekim 2003.
- [73] TOPÇU, İ.B, Atık Camlı Harçlarda Alkali Silis Reaksiyonu, 2003.

- [74] RAMYAR, K., TOPAL, A., ANDIÇ, Ö., "Effects of Aggregate Size and Angularity on Alkali-Silica Reaction", *Cement and Concrete Research*, 35 (11), pp. 2165- 2169, 2005.
- [75] KORKANÇ, M. TUĞRUL, A., *Beton Agregası Olarak Kullanılacak Bazaltların Alkali-Silis Reaksiyonu Yönünden İncelenmesi*, İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, C.17, S.2, S.161-169, 2004.
- [76] ZARİF, İ.H., TUĞRUL, A., DURSUN, G., *İstanbul'daki Kireçtaşlarının Agregası Kalitesi Yönünden Değerlendirilmesi* İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, C. 16, S. 2, SS. 61-70, 2003.
- [77] BİNAL, A., *Pesimum Reaktif Agregası İçeriğinin Alkali-Silis Reaksiyonuna Etkisinin Deneysel Yöntemlerle Araştırılması*, İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, C.17, S.2, S.119-128, 2004.
- [78] TOSUN, K., *Uçucu Kül ve Silika Tozunun Alkali Silika Reaksiyonuna Etkisi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 122 p. 2001.
- [79] MUSAL, B., *The Effect of Zeolite and Glass Fibres on Alkali-Silica Reaction*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, p. 141. 2003.
- [80] YILMAZ, K., SERT, G., *Sakarya Bölgesinde Üretilen Kırmataş Agregalarının Alkali-Agregası reaktivitelerinin Belirlenmesi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 2007.
- [81] BERRA, M., MANGIALARDI, T., PAOLINI, A.E., *Application of the NaOH bath test method for assessing the effectiveness of mineral admixtures against reaction of alkali with artificial siliceous aggregate*, *Cement and Concrete Composites*, Vol.16: 207-218. 1994.
- [82] BERUBE, M.A., DUCHESNE, J., CHOUINARD, D., *Why the accelerated mortar bar method ASTM C1260 is reliable for evaluating the effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion alkali silica reactivity*, *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol.17, No.1: 26-34. 1995.
- [83] BERUBE, M.A., DUCHESNE, J., *Evaluation of test methods used for assessing the effectiveness of mineral admixtures in suppressing expansion due to alkali-aggregate reaction*, *Proceedings, 4th International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Istanbul, Turkey, ACI SP-132, American Concrete Institute, Detroit: 549-575. 1992.
- [84] BARRINGER, W.L., *Using accelerated test methods to specify admixtures to mitigate alkali-silica reactivity*, *Cement, Concrete and Aggregates, CCAGDP*, Vol.21, No.2: 165-172. 1999.

- [85] FOURNIER, B., MALHOTRA, V.M., Evaluation of laboratory test methods for alkali-silica reactivity, *Cement, Concrete and Aggregates, CCAGDP*, Vol.21, No.2: 173-184. 1999.
- [86] THOMAS, M.D.A., INNIS, F.A., Use of the accelerated mortar bar test for evaluating the efficiency of mineral admixtures for controlling expansion due to alkali-silica reaction, *Cement, Concrete and Aggregates, CCAGDP*, Vol.21, No.2: 157-164. 1998.
- [87] RAMLOCHAN, T., THOMAS, M., GRUBER K.A., The effect of Metakaolin on alkali-silica reaction in concrete, *Cement and Concrete Research*, 30: 339-344. 2000.
- [88] Stark, D., Morgan, B., Okamoto, P., *Eliminating or Minimizing Alkali-Silica Reactivity, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC, 266 p. 1993.*
- [89] HANNA, W.C., Unfavorable chemical reactions of aggregate in concrete and a suggested corrective, *Proceedings, ASTM, V.47, Philadelphia, PA: 986-1009. 1947.*
- [90] ROGERS, C.A., Alkali aggregate reactions in Ontario, 5-9, *Proc. 7th International Conference in Alkali Aggregate Reaction in Concrete, Concrete Alkali Aggregate Reactions, Grattan-Bellew, P.E. (Ed.), Ottawa, Ontario, Canada, 509 p. 1987.*
- [91] THOMAS, M.D.A., MUKHERJEE, P.K., MCCOLM, E.J., EVERITT, M.F., Case stories of AAR in hydraulic structures in the UK and Canada, *Proc. of the 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams, Fredericton, N.B., Canada, Canadian Electrical Association, 6 p. 1992.*
- [92] DUCHESNE, J., BERUBE, M.A., Long-term effectiveness of supplementary cementing materials against alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, vol.31: 1057-1063. 2001.
- [93] CHUNXIANG, Q., HONGDING, G., MINGSHU, T., Mechanism of mineral admixture suppressing alkali-silica reaction: part I, corrosion degree of reactive aggregate in blended cement pastes and its correlations with expansion value and electric resistance change, *Cement and Concrete Research*, Vol.24, No.6: 1111-1120. 1994.
- [94] MONTERIO, P.J.M., WANG, K., SPOSITO G., DOSSANTOS, M.C., ANDRADE, W.P., Influence of mineral admixtures on the alkali-aggregate reaction, *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No.12: 1899-1909. 1997.
- [95] PREZZI, M., MONTERIO, P.J.M., SPOSITO, G., Alkali-silica reaction-part I: use of double layer theory to explain the behaviour of reaction product gels, *ACI Materials Journal*, Vol.94, No:1, Jan-Feb: 10-17. 1997.

- [96] MİNDESS, S., YOUNG, J.F., DARWİN, D., Concrete, Second Edition, Prentice Hall, 644 p. 2003.
- [97] Mehta, K., Studies on Blended Portland cement containing santorin earth. Cement and Concrete Research, pp.507-518, 1981.
- [98] ANDRIÓLO, F.R., SGARABOZA, B.C., The use of pozzolan from Calcined Clays in preventing excessive expansion due to alkali aggregate reaction in some Brazilian dams. In Concrete Aggregate Reaction, New Jersey, pp.66-70, 1987.
- [99] NAIQIAN, F., HONGWEI J., ENYI, C., Study on the suppression effect of natural zeolite on expansion of concrete due to alkali-aggregate reaction, Magazine of Concrete Research, 50, No.1: 17-24. 1998.
- [100] NAIQIAN F., TINGYU, H., Mechanism of natural zeolite powder in preventing alkali-silica reaction in concrete, Advances in Cement Research, 10, No.3: 101-108. 1998.
- [101] NIXON, P.J., GAZE, M.E., The effectiveness of fly ashes and granulated blast-furnace slags in preventing AAR, 61-68, Proc. 6th International Conference on Alkalies on Concrete, Idorn, G.M., Rostam, S. (Eds), Copenhagen. 1983.
- [102] NIXON, P.J., PAGE, C.L., BOLLINGHAUS, R., CANHAM, I., The Effect of PFA with a high total alkali content on pore solution composition and alkali-silica reaction, Magazine of Concrete Research, 38: 30-35. 1986.
- [103] STARK, D., Alkali-silica reactivity in the Rocky Mountain Region, Proc. of the 4th International Conference on the Effect of Alkalies in Cement and Concrete, Purdue University: 235-243. 1978.
- [104] HOBBS, D.W., Influence of pulverised fuel-ash and granulated blast furnace slag upon expansion caused by alkali-silica reaction", Magazine of Concrete Research, 34 (119): 83-94. 1982.
- [105] OBERHOLSTER, R.E., DAVIES, G., An accelerated method for testing the potential alkali-reactivity of siliceous aggregates, Cement and Concrete Research, Vol.16: 181-189. 1986.
- [106] SHAYAN, A., DIGGINS, R., IVANUSEC, I., Effectiveness of fly ash in preventing deleterious expansion due to alkali-aggregate reaction in normal and steam-cured concrete, Cement and Concrete Research, vol.26, no.1: 153 - 164. 1995.
- [107] STARK, D., MORGAN, B., OKAMOTO, P., 1993, Eliminating or Minimizing Alkali- Silica Reactivity, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC, 266 p. 1993.

- [108] HOOTON, R.D., Canadian use of ground granulated blast-furnace slag as a supplement cementing material for enhanced performance of concrete, *Canadian Journal of Civil Engineering*: 754-760. 2000.
- [109] BARLOW, D.F., JACKSON, P.J., Available alkalis in pulverised fuel-ash and in ground granulated slag using ASTM C-311 method, *Cement and Concrete Research*, 18: 235-248. 1988.
- [110] OLAFSON, H., The Effect of finally Grained Silica Dust and Fly Ash on Alkali Silica Reactivity on High Alkali Cements. National Bureau of Standards Building Composite Group, ABD, 1980.
- [111] MARUSIN, S.L., SHOTWELL, L.B., Alkali silica reaction in concrete caused by densified silica fume lumps- a case study. Proceedings of the 5th Canmet/ACI International Conference on Fly ash, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Supplementary Papers, Milwaukee, WI, pp, 45-49, 1995.
- [112] BALOGH, A., High Reactivity Metakaolin. *Concrete Construction*, 40/7, pp.604-610, 1995.
- [113] BEKTAŞ, F., TURANLI, L., MONTEIRO, P.J.M, Use of perlite powder to suppress the alkali silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 35 (10): 2014-2017. 2005.
- [114] JONES, F.E., TARLETON R.D., Reactions between aggregates and cement, National Building Research Paper, 25 Pt VI, HMSO, London, 20 p. 1958.
- [115] THOMAS, M.D.A., INNIS, F.A., Use of the accelerated mortar bar test for evaluating the efficiency of mineral admixtures for controlling expansion due to alkali-silica reaction, *Cement, Concrete and Aggregates*, CCAGDP, Vol.21, No.2: 157-164., 1999.
- [116] SIMS, I., NIXON, P., RILEM recommended test method AAR-1: detection of potential alkali reactivity of aggregates-Petrographic method, *Materials and Structures*, Vol. 36: 480-496. 2003.
- [117] GRATTAN-BELLEW, P.E., Test methods and criteria for evaluating the potential reactivity of aggregates, Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, 279-294, Okada, K., Nishibayashi, S., Kawamura, M. (Eds.), Kyoto, Japan, 886 p., 1989.
- [118] BERUBE, M.A., FOURNIER, B., Accelerated test methods for alkaliaggregate reactivity, *Advances in Concrete Technology*, Malhotra, V.M. (Ed.), Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada, 991 p. 1992.

- [119] BERUBE, M.A., FOURNIER, B., DUPONT, N., MONGEAU, P., FRENETTE, J., A simple autoclave mortar bar method for assessing potential alkali aggregate reactivity in concrete, Proceedings Ninth International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, The Concrete Society, London: 81-91. 1992.
- [120] NIXON, P., SIMS, I., Universally accepted testing procedures for AAR the progress of RILEM Technical Committee 106, 435-444, Proc. 11th International Conference, Ed. Berube, M.A., Fournier, B., Durand, B., Quebec, QC, Canada, 1406 p. 2000.
- [121] LANE, D.S., OZYILDİRİM, C., Preventive measures for alkali-silica reactions (binary and ternary systems), Cement and Concrete Research, 29: 1281-1288. 1999.
- [122] THOMAS, M.D.A., HOOTON, R.D., ROGERS, C.A., Prevention of damage due to alkali-aggregate reaction (AAR) in concrete construction-Canadian approach, Cement, Concrete and Aggregates, vol.19, No.1: 26-30. 1997.
- [123] GROSOİS, M., FONTAİNE E., Evaluation of the potential alkalireactivity of concrete aggregates: performance of testing methods and a producer's point of view, 267-276, Proc. 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Quebec, 1406 p. 2000.
- [124] SHAYAN, A., IVANUSEC, I., DİGGİNS, R., Suitability of two rapid test methods for determining the alkali reactivity of sands, Cement and Concrete Composites, 16: 177-188. 1994.
- [125] TOUMA, W.E., SUH, C., GOWLER, D.W., CARRASQUILLO, R.L., FOLLİARD, K.J, Alkali-silica reaction in portland cement concrete: testing procedures and mitigation methods, 513-522, Proc. 11th International Conference on Alkali- Aggregate Reaction, Ed. Berube, M.A., Fournier, B., Durand, B., Quebec, 1406 p. 2000.
- [126] BİLİR, T., Donatısız Beton Eleman Üretiminde Çeşitli Endüstriyel Yan Ürünlerin Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Z.K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, 2005.
- [127] YÜKSEL, İ., ÖZKAN, Ö., BİLİR, T., Ereğli Demir Çelik Fabrikaları Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Beton Agregası Olarak Değerlendirilmesi, Z.K.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Bilimsel Araştırma Projesi Nihai Raporu, Proje Kod No: 2001-76-02-40, Zonguldak, 2000.
- [128] MİELLENZ, R.C., Mineral Admixtures-History and Background, ACI Concrete International, Cilt:5, Sayı:8, s. 34-42. 1983.
- [129] MEHTA, P.K., MONTEİRO, P.J.M. Concrete Microstructure, Properties and Materials, Indian Edition, India. 1997.

- [130] LEWIS, D., Blast Furnace Slag as a Mineral Admixture for Concrete, Concrete Construction, Cilt: 27, Sayı: 5, s. 448-449.1982.
- [131] STUTTERHEIM, N., Portland Blast Furnace Cements –A Case for Separate Grinding of Slag, Proceedings, 5. th. International Symposium on the Chemistry of Cement, Cement Association of Japan, Part IV, s. 270-274, Tokyo.1969.
- [132] TOKYAY, M., ERDOĞDU, K., Cürüfler ve Cürüflü Çimentolar, TÇMB AR-GE Enstitüsü, Yayın No: Y97-2, 3. Baskı, Ankara. 2001.
- [133] KOCA, C., Yüksek Performanslı Beton Üretiminde Mikrosilis, Curuf, Klinker Karışımı Çimento Kullanımı. 4. Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, s.381-394. 1996.
- [134] ERDOĞAN, T.Y., Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş. Ankara, 741s. Geliştirme Enstitüsü Seminer Notları-4, Türkiye Çimento Müstahsilleri, 2003.
- [135] YEĞİNOBALI, M.A., Silis Dumanının Betonda Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi. (Endüstriyel Katı Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu: 18-19 Kasım 1993) Bildiriler Kitabı. Ankara: Bizim Büro 149-167, 1993.
- [136] GUDMUNDSSON, G., OLAFSSON, H., Alkali-silica reactions and silica fume 20 years of experience in Iceland, Cement and Concrete Research, Vol.29:1289-1297, 1999.
- [137] PETERSSON, K., Effects of silica fume on alkali-silica expansion in mortar specimens. Cement and Concrete Research, Vol.22, No.2, Pergamon Press Ltd, 15-22,1992.
- [138] TOSUN, K., FELEKOĞLU, B., BARADAN, B., Metakaolin ve Silika Dumanı Kullanımının Çimento Harcının Mekanik ve Fiziksel Özelliklerine Etkileri. 3. Uluslararası Çimento ve Beton Sempozyumu, 2007.

TÜRK STANDARTLARI*

TS 130, 1978, Agregaların Eleme Analizi Deneyi için Metot

TS 2517, 1977, Alkali Agregaların Kimyasal Yolla Tayini

TS 3526, 1980, Beton Agregalarında Özgül Ağırlık - Su Emme Oranı Tayini

TS 3529, 1980, Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini

ÖZGEÇMİŞ

Korkmaz Yıldırım, 01.02.1962 de Muğla' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Muğla'da tamamladı. 1980 yılında Muğla Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi, Yapı Bölümünden mezun oldu.

1980-1987 yılları arasında Enka Holding Yatağan Şantiyesinde, Tarım ve Köy İşleri Bakanlığına Bağlı Mülga Topraksu Baş Mühendisliği ve Köy Hizmetleri İl Müdürlüğünde inşaat teknisyeni olarak çalıştı.

1987 yılında başladığı Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Öğretmenliği bölümünü 1991 yılında bitirdi. 1991-1994 yılları arasında Yapı Eğitimi alanında; Deprem Bölgelerinde Dişli Döşeme Sistemlerinin Optimum Uygulama Şartlarının Araştırılması konulu yüksek lisansını tamamladı.

1992-1996 yıllarında 100.Yıl Endüstri Meslek Lisesi Elazığ'da Yapı Öğretmeni ve aynı dönemde Fırat Üniversitesi Yapı Öğretmenliği bölümünde sözleşmeli öğretim görevlisi olarak, 1996- Ekim 1998 yılları arasında Abant İzzet Baysal Üniversitesi Düzce Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Öğretmenliği bölümünde Öğretim görevlisi olarak çalıştı.

Ekim 1998 tarihinden buyana Sakarya Üniversitesi Hendek Meslek Yüksek Okulu İnşaat bölümünde öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır. Bu süre içerisinde 3 adet bilimsel araştırma projesinde araştırmacı olarak rol aldı. Ayrıca 1 adet SCI, 10 adet Uluslararası ve 10 adet ulusal sempozyum ve kongrelerde yayınlanmış yayını bulunmaktadır.