

T.C.

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALKALİ-SİLİKA REAKSİYONUNU ÖNLEMELİK İÇİN BETONDA PUZOLANİK  
VE KİMYASAL KATKI KULLANIMININ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

DEMET KURT

HAZİRAN 2009

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürünün onayı.

...../...../.....

Doç.Dr.Burak BİRGÖREN

\_\_\_\_\_  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak İnşaat Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Osman YILDIZ

\_\_\_\_\_  
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumuzu ve Yüksek Lisans tezi olarak bütün gerekliliklerini yerine getirdiğini onaylarız.

Yrd. Doç. Dr. İlhami DEMİR

\_\_\_\_\_  
Danışman

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. İlhami DEMİR

Yrd. Doç. Dr. Osman YILDIZ

Yrd. Doç. Dr. Orhan DOĞAN

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## ÖZET

### ALKALİ-SİLİKA REAKSİYONUNU ÖNLEMELİK İÇİN BETONDA PUZOLANİK VE KİMYASAL KATKI KULLANIMININ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

KURT, Demet

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. İlhami DEMİR

Haziran 2009, 104 sayfa

Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR), betonda istenmeyen hasarlar meydana getiren, kompleks kimyasal bir reaksiyondur. Bazı çimentoların içinde fazla miktarda bulunan sodyum oksit ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) ve potasyum oksit ( $\text{K}_2\text{O}$ ) gibi alkali oksitler beton gözenek suyunda çözünerek sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) ve potasyum hidroksit ( $\text{KOH}$ ) oluştururlar  $\text{NaOH}$  ve  $\text{KOH}$  ise agrega içerisinde bulunan aktif silisle reaksiyona girerek, zamanla betonu çatlatan bir jel oluşumuna sebep olurlar. Reaksiyonun neden olduğu genleşme belli bir sınırı aştığında beton için potansiyel bir tehlike oluşturur.

Bu çalışmada bu çatlakları önlemek adına uçucu kül, silis dumanı, gaz beton tozu, kiremit tozu ve lityum tuzu katkılarının etkileri ve betonda kullanılıp kullanılmayacağı araştırılmıştır. Bu çalışmada, Çatalağzı uçucu külü, Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi Tesisleri'nde tutulan silis dumanı, gazbeton tozu, kiremit tozu ve lityum katkıları kullanılmıştır. Öncelikle kullanılacak malzemeler

petrografik ve kimyasal verileri açısından sınıflandırılmıştır. Alkali-silis reaktivitesinin etkilerini belirlemek amacıyla hızlandırılmış harç çubuğu deney metodu ASTM C 1260 kullanılmıştır.

Betonda alkali-silika reaksiyonunu önlemek için yapılan bu çalışma sonucunda, katkılar incelendiğinde, uçucu kül ve lityum karbonatın, diğer katkı maddelerine oranla daha büyük bir yüzde ile genleşme hızını yavaşlattığı görölmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** ASR, Puzolanik, Gazbeton Tozu, Kiremit Tozu, Lityum,

ASTM C 1260.

## ABSTRACT

### INVESTIGATING EFFECTS OF USING POZZUOLANA AND CHEMICAL ADDITIVES TO PREVENT ALKALI-SILICA REACTIONS IN CONCRETE

KURT, Demet

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, M. Sc. Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. İlhami Demir

June 2009, 104 Pages

Alkali-silica reaction (ASR) is a complex chemical reaction that may cause undesirable damages in concrete structures. Alkali oxides like sodium-oxide ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) and potassium-oxide ( $\text{K}_2\text{O}$ ) highly concentrated in some cements get solved by water in concrete holes and produce sodium-hydroxide ( $\text{NaOH}$ ) and potassium-hydroxide ( $\text{KOH}$ ). They eventually react with silica absorbed in cement aggregate and produce a gel formation which causes expansions in concrete. If such expansions exceed a certain limit undesirable cracks occur in concrete.

The effects of using fly ash, silica fume, air concrete, tile powder as pozzuolana and lithium salts to prevent undesirable cracks in concrete are investigated in this thesis. In the study, the fly ash produced by the Çatalağzı Thermal Power Plant and the silica fume from the Antalya Etibank Electro-Metallurgy Plant were utilized. Air concrete powder, tile powder and lithium salts

were obtained from local dealers. The additives were first classified according to their own petrographical and chemical attributes. In order to specify the effect of alkali-silica reactivity the Mortar Bar Method ASTM C 1260 was employed in this study.

The study results show that the fly ash and the Lithium Carbonate ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) reduced the acceleration of expansion in concrete relatively better than other additives.

**Key Words:** ASR, Pozzuolana, Air Concrete Powder, Tile Powder, Lithium,  
ASTM C 1260.

*Hayatım boyunca desteklerini hep hissettiğim*

*biricik anneme, babama ve kardeşlerime ithaf olunur...*

## TEŞEKKÜR

Hayatın bitmeyen müthiş öğrenme süreci içinde; yolculuğuma katkıda bulunan ve beni yüreklendiren, özellikle yüksek lisans eğitimim boyunca bana esin kaynağı olan herkese burada minnet ve şükranlarımı sunmak isterim.

Araştırma yaptığım, deneysel çalışmalarımı yürüttüğüm ve çalışmayı derlediğim süreç boyunca buldukları katkılardan dolayı değerli hocalarım; Sayın Prof. Dr. Mustafa Y.KILINÇ'a, danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr.İlhami DEMİR'e, Sayın Yrd.Doç.Dr. Osman YILDIZ'a, Sayın Yrd.Doç.Dr. Orhan DOĞAN'a, zorlu laboratuvar çalışmaları konusundaki yardımları için Sayın Mahmut ÖZDEMİR ve Sayın Yasin DURGUN'a, desteğini esirgemeyen tüm hocalarıma, okul ve çalışma arkadaşlarıma, Karayolları Genel Müdürlüğü Asfalt Şubesi ve Teknik Araştırma Dairesinin değerli çalışanlarına, yüksek lisans eğitimim boyunca verdikleri destekten ötürü TÜBİTAK'a, tez çalışmamı destekleyen 2007-32 nolu "Kiremit ve Hafif Beton Tozu Kullanımının ASR Etkilerinin Deneysel Olarak Araştırılması" isimli Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi'ne ve son olarak her ihtiyaç duyduğumda büyük fedakarlıklarla yanımda olan Sayın İbrahim IŞIK'a ve destekleri ile güç bulduğum çok sevgili aileme teşekkürü borç bilirim.



## SİMGELER DİZİNİ

$Al_2O_3$	Alüminyum Oksit
C	Karbon
$CaCO_3$	Kalsiyum Karbonat
CaO	Kalsiyum Oksit
$Ca(OH)_2$	Kalsiyum Hidroksit
C-S-H	Çimento
$Fe_2O_3$	Demir Oksit
K	Potasyum
$K_2O$	Potasyum Oksit
KOH	Potasyum hidroksit
MgO	Magnezyum Oksit
Na	Sodyum
NaCl	Kalsiyum Klorür
NaOH	Sodyum Hidroksit
$OH^-$	Hidroksil İyonu
Rc	Alkalinitedeki Azalma
Sc	Çözünmüş Silis
$SiO_2$	Silisyum Oksit

## KISALTMALAR DİZİNİ

AAR	Alkali Agrega Reaksiyonu
AKR	Alkali Karbonat Reaksiyonu
ASR	Alkali Silika Reaksiyonu
ASTM	Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu
GT	Gazbeton Tou
K.K	Kızdırma Kaybı
KT	Kiremit Tozu
MK	Metakaolin
MPa	Megapascal
NBRI	Güney Afrika Ulusal Araştırma Bürosu
NTU	Nephelometric Turbidity Unit (Su Bulanıklık Birimi)
SD	Silis Dumanı
SEM	Tarayıcı Elektron Mikroskobu
UK	Uçucu Kül
YFC	Yüksek Fırın Cürufu
XRD	Enerji Yayılımlı X Işını (EDS)

## ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL	Sayfa
2.1. Silika Üzerinde Alkali Çözeltilisinin Ataklarının Şematik Temsili .....	5
2.2. Alkali Silika Reaksiyonunun Şematik Gösterimi .....	6
2.3. Alkali-Silika Reaksiyonu Nedeniyle Betonun Bozulma Mekanizması ve Tipik Çatlak Görünümü .....	7
2.4. Reaktif Silis/Alkali Oranına Göre Genleşme Miktarları .....	8
2.5. Çimentonun Alkali İçeriğinin Genleşmeye Olan Etkisi .....	9
2.6. Reaktif Agrega Çeşitleri ve ASR' ye Maruz Kalan Hassas Alkali Kayaların Karakteristik Örneklerinin Kompozisyonu ve Morfolojisi .....	11
2.7. Alkali-Silis Reaksiyon Sahasının Kimyasal Kompozisyonu .....	12
2.8. Deniz Suyunun ASR'ye Etkisi .....	15
2.9. (a) ASR'nin Neden Olduğu Harita Çatlakları (b) ASR Jelinin Beton İçinde Oluşumu .....	17
2.10. ASR'den Kaynaklanan Çatlaklara İlişkin Fotoğraflar.....	18
2.11. Afyon'da ki Beton Yoldan ASR'ye İlişkin Çatlak Görünümü .....	19
2.12. Alkalinitedeki Azalma-Çözünmüş Silis Grafiği.....	22
2.13. Uçucu Külün Normal ve SEM ile Alınmış Görüntüsü .....	35
2.14. Uçucu Kül ve Diğer Puzolanların Arayüz Bölgesini Puzolanik Etki Nedeniyle Güçlendirmelerinin Şematik Hali .....	37
2.15. Uçucu Kül Çimento – Agrega Matriksi İçerisinde Boşlukları Doldurur.....	37
2.16. Silis Dumanından Görünümler .....	41
4.1. Katkısız Numunelerin ASR'den Etkilenme Oranlarının Araştırılması.....	68

ŞEKİL	Sayfa
4.2. Katkısız Kontrol Numunesinde Çimento Pastasına Ait EDS Grafiği.....	69
4.3. Katkısız Kontrol Numunesinde Çimento Pastasına Ait SEM Görünümü.....	70
4.4. Lityum Sülfatın ASR Üzerine Etkisinin Araştırılması.....	71
4.5. Lityum Nitratın ASR Üzerine Etkisinin Araştırılması.....	72
4.6. Lityum Karbonatın ASR Üzerine Etkisinin Araştırılması.....	73
4.7. %3 Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> Katkısı İkame Edilmiş Numunenin EDS Görüntüsü.....	73
4.8. %3 Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> İkame Edilmiş Numunenin SEM Görüntüsü.....	74
4.9. Lityum Florürün ASR Üzerine Etkisinin Araştırılması.....	75
4.10. Lityum Bromürün ASR Üzerine Etkisinin Araştırılması.....	75
4.11. %3 LiBr İkame Edilmiş Numunenin EDS Grafiği.....	76
4.12. %3 LiBr İkame Edilmiş Numunenin SEM Görüntüsü .....	77
4.13. Lityum Katkılarının ASR Açısından Kendi Aralarında Kıyaslanması.....	77
4.14. LiBr ve Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> İkame Edilmiş Numunelerin ASR Açısından Kıyaslanması..	78
4.15. Lityum Katkılarının ve Kontrol Numunelerinin ASR Açısından Kıyaslanması.....	79
4.16. Uçucu Külün ASR Üzerine Etkisinin Araştırılması.....	80
4.17. %30 Uçucu Kül İkame Edilmiş Numunede Çimento Pastasına Ait EDS Görünümü.....	81
4.18. %30 Uçucu Kül İkameli Numunenin SEM Görüntüsü.....	81
4.19. Silis Dumanının ASR Üzerine Etkisinin Araştırılması .....	82
4.20. Silis Dumanının ASR Üzerine Etkisine İlişkin SEM Görüntüleri.....	83
4.21. Gazbeton Tozunun ASR Üzerine Etkisinin Araştırılması.....	84
4.22. %30 Gazbeton Tozu İkame Edilmiş Numunede Çimento Pastasına Ait EDS Görünümü.....	85

ŞEKİL	Sayfa
4.23. %30 Gazbeton Tozu İkameli Numunenin SEM Görüntüsü.....	85
4.24. %30 Gazbeton Tozu İkame Edilmiş Numunenin SEM Görüntüsü... ..	86
4.25. Kiremit Tozunun ASR Üzerine Etkisinin Araştırılması.....	87
4.26. %30 Kiremit Tozu İkame Edilmiş Numunede Çimento Pastasına Ait EDS Görünümü.....	88
4.27. %30 Kiremit Tozu İkameli Numunenin SEM Görüntüsü.....	88
4.28. 16 Gün Sonunda Puzolanik Katkılarının ASR Açısından Kıyaslanması.....	89
4.29. 16 Gün Sonunda Puzolanik Katkılar ile Kontrol Numunelerinin ASR Açısından Kıyaslanması.....	90
4.30. %30 Gazbeton Tozu İkame Edilmiş Numune İle %30 Kiremit Tozu İkame Edilmiş Numunenin Kıyaslanması .....	91
5.1. 16 Gün Sonunda Kimyasal Katkılı ve Katkısız Numunelerin ASR Açısından Kıyaslanması .....	93
5.2. 16 Gün Sonunda Puzolanik Katkılı ve Katkısız Numunelerin ASR Açısından Kıyaslanması.....	95
Ek1 Şekil 1. Standartta Belirtilen Kalıp .....	103
Ek1 Şekil 2. Kullanılan Kalıba Ait Aparatlar.....	103
Ek1 Şekil 3. Deney İçin Hazırlanmış Olan Numunelerden Bazıları.....	104
Ek1 Şekil 4. Boy Okumaları İçin Dijital Komprator.....	104

## ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE	Sayfa
2.1. Farklı Oranlarda Mineral Katkı İçeren Numunelere Ait ASR Jeli Ortalama Kimyasal Kompozisyonları .....	33
2.2. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması .....	36
2.3. Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri .....	36
2.4. Silis Dumanının Kimyasal Özellikleri .....	41
2.5. Bazı Kimyasal Katkıların ASR Üzerindeki Etkileri.....	49
3.1. Agreganın Kimyasal Özellikleri.....	55
3.2. Agreganın Mineralojik Özellikleri.....	56
3.3. CEM I 42,5 R Çimentosunun Kimyasal Bileşimi ve Fiziksel Özellikleri.....	56
3.4. Suyun Kimyasal Analizi.....	57
3.5. Uçucu Kül Kimyasal Kompozisyonlar ve Fiziksel Özellikleri.....	57
3.6. Silis Dumanının Kimyasal Analiz Sonuçları.....	58
3.7. Gazbeton Tozunun Kimyasal Analiz Sonuçları .....	59
3.8. Kiremit Tozunun Kimyasal Analiz Sonuçları.....	59
3.9. Lityum Sülfatın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	60
3.10. Lityum Sülfatın Kimyasal Kompozisyonu.....	60
3.11. Lityum Nitratın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	61
3.12. Lityum Nitratın Kimyasal Kompozisyonu.....	61
3.13. Lityum Karbonatın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	62
3.14. Lityum Karbonatın Kimyasal Kompozisyonu .....	62
3.15. Lityum Florürün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	62

ÇİZELGE	Sayfa
3.16. Lityum Bromür Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	62
3.17. Agreganın Granülometrisi.....	65
3.18. Lityum Sülfat İçeren Numuneler İçin Karşım Miktarları.....	65
3.19. Lityum Nitrat İçeren Numuneler İçin Karşım Miktarları.....	65
3.20. Lityum Karbonat İçeren Numuneler İçin Karşım Miktarları.....	65
3.21. Lityum Florit İçeren Numuneler İçin Karşım Miktarları.....	66
3.22. Lityum Bromür İçeren Numuneler İçin Karşım Miktarları.....	66
3.23. Uçucu Kül İçeren Numuneler İçin Karşım Miktarları.....	66
3.24. Silis Dumanı İçeren Numuneler İçin Karşım Miktarları.....	66
3.25. Gazbeton Tozu İçeren Numuneler İçin Karşım Miktarları.....	67
3.26. Kiremit Tozu İçeren Numuneler İçin Karşım Miktarları.....	67

# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	vi
SİMGELER DİZİNİ .....	vii
KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
İÇİNDEKİLER.....	xiv
1.GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Alkali-Silika Reaksiyonu Mekanizması.....	4
2.2. Alkali-Silika Reaksiyonunu Etkileyen Faktörler.....	7
2.2.1. Karışım Oranlarının Etkisi.....	7
2.2.2. Alkali İçeriğinin Etkisi.....	8
2.2.3. Reaktif Agreganın Cinsinin ve Tane Büyüklüğünün Etkisi.....	10
2.2.4. Dış Alkalilerin Etkisi.....	15
2.2.5. Rutubetin Etkisi.....	16
2.2.6. Sıcaklığın Etkisi.....	16
2.2.7. Sürüklenmiş Havanın Etkisi.....	17
2.3. Alkali-Silika Reaksiyonunun Belirtileri.....	17
2.4. Alkali-Silika Reaktivitesinin Belirlenmesi ve Deneyler.....	20
2.4.1. ASTM C 295- Agregaların Petrografik Analizi.....	21



2.4.2. ASTM C 289- Kimyasal Metot.....	22
2.4.3. ASTM C 227- Harç Çubuğu Metodu.....	23
2.4.4. ASTM C 441- Mineral Katkıların veya Yüksek Fırın Cürufunun Etkinliklerini Ölçen Standart Deney Metodu.....	25
2.4.5. ASTM C 1293- Beton Prizma Metodu.....	26
2.4.6. ASTM C 1260- Hızlandırılmış Harç Çubuğu Metodu.....	27
2.4.7. Jel Pat Metodu.....	28
2.4.8. Alman Çözünme Metodu.....	29
2.4.9. Ozmotik Hücre Metodu.....	29
2.4.10. Otoklav Metotları ve Diğerleri .....	30
2.5. Mineral ve Kimyasal Katkıların ASR'ye Etkileri.....	31
2.5.1. Mineral Katkıların ASR'ye Etkisi.....	31
2.5.1.1. Uçucu Külün ASR'ye Etkisi.....	35
2.5.1.1.1. Uçucu Küllerin Puzolanik Aktiviteleri ve Kimyasal Özellikleri.....	36
2.5.1.2. Yüksek Fırın Cürufunun(YFC) ASR'ye Etkisi.....	40
2.5.1.3.Silis Dumanının ASR'ye Etkisi .....	41
2.5.1.4. Metakaolinin ASR'ye Etkisi .....	42
2.5.1.5. Gazbeton Tozu ve ASR'ye Etkisi .....	44
2.5.1.5.1 Gazbetonun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	45
2.5.1.6.1. Kiremit Tozu ve ASR Üzerine Etkisi .....	47
2.5.1.6. Doğal Puzolanların ASR'ye Etkisi.....	48
2.5.2. Kimyasal Katkıların ASR'ye Etkisi .....	49
2.5.2.1. Lityum Katkıları.....	50

2.6. ASR' yi Kontrol Altına Alma Yolları.....	52
2.7. Çalışmanın Amacı .....	53
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	54
3.1. Materyal.....	54
3.1.1. Agreganın Özellikleri.....	55
3.1.2. Çimentonun Özellikleri.....	56
3.1.3. Suyun Kimyasal Analizi.....	57
3.1.4. UK'nın Kimyasal Analiz Sonuçları .....	57
3.1.5. Silis Dumanının Kimyasal Analizi .....	58
3.1.6. Gazbeton Tozunun Kimyasal Analizi .....	59
3.1.7. Kiremit Tozunun Kimyasal Analizi .....	59
3.1.8. Lityum Katkıları.....	60
3.2. Yöntem .....	63
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	68
4.1. Katkısız Numuneler İle Yapılan Çalışmalar.....	68
4.2. Farklı Lityum Tuzlarının ASR Üzerine Etkilerinin İncelenmesi.....	70
4.2.1. Lityum Sülfat İkame Edilerek Hazırlanan Numunelerle Yapılan Çalışma.....	71
4.2.2. Lityum Nitrat İkame Edilerek Hazırlanan Numunelerle Yapılan Çalışma.....	71
4.2.3. Lityum Karbonat İkame Edilerek Hazırlanan Numunelerle Yapılan Çalışma.....	72
4.2.4. Lityum Florür İkame Edilerek Hazırlanan Numunelerle Yapılan Çalışma.....	74
4.2.5. Lityum Bromür İkame Edilerek Hazırlanan Numunelerle	

Yapılan Çalışma.....	75
4.3. Farklı Puzolanik Katkıların ASR Üzerine Etkilerinin İncelenmesi.....	79
4.3.1. Uçucu Kül İle Yapılan Çalışma.....	80
4.3.2. Silis Dumanı İle Yapılan Çalışma.....	82
4.3.3. Gazbeton Tozu İle Yapılan Çalışma.....	84
4.3.4. Kiremit Tozu İle Yapılan Çalışma.....	87
5. SONUÇ.....	92
5.1. Lityum Katkısı Kullanılarak Yapılan Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar.....	92
5.2. Puzolanik Katkı Kullanılarak Yapılan Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar.....	94
KAYNAKLAR.....	98
Ek-1.....	103

## 1.GİRİŞ

Beton, günümüzde en yaygın biçimde kullanılan ve yapıların ayakta kalmasını sağlayan yapay bir yapı malzemesidir. Yapılarda çok önemli bir paya sahip olan betonda yaşanabilecek problemler tüm yapıyı etkileyebilir niteliktedir. Bu da yapıların dayanıklılık, kullanım ömrü gibi birçok özelliği üzerinde aktif rol oynamaktadır.

Beton veya betonarme bir yapı herhangi bir şekilde tahrip olmadan veya özelliklerinde bir azalma meydana gelmeden, belirli bir süre kendinden beklenen işlevleri yerine getirmelidir. Bu durum öncelikle betonun dayanıklılığı sayesinde elde edilebilir<sup>(1)</sup>.

Betonarme veya beton yapı elemanlarının zamanla bozulup işlevlerini beklenen servis ömürlerine ulaşmadan yitirmelerine birçok faktör sebep olabilir. Bu faktörler arasında beton bileşimini oluşturan malzemelerin fiziksel ve kimyasal yapısından kaynaklanan iç etkiler ve çevreden kaynaklanan dış etkiler önemli yere sahiptir. Beton bileşimini oluşturan malzemelerin kendi aralarında veya çevreden gelen bazı zararlı maddelerle kimyasal reaksiyonlara girebildiği, böylece beton hacim sabitliğinin bozulması nedeniyle yapı elemanının zarar gördüğü bilinmektedir<sup>(2)</sup>.

Bileşiminde belirli mineraller bulunan agregalar, betonda oluşan alkali hidroksitlerle reaksiyona girer. Reaksiyonun neden olduğu beton genişmesi, belirli sınırları aştığı zaman beton içerisinde potansiyel bir tehlike oluşturur. Alkali agrega reaksiyonu (AAR) olarak algılanan bu reaksiyonlar; alkali-silika reaksiyonu (ASR)

ve alkali karbonat reaksiyonu (AKR) olmak üzere iki şekilde oluşabilmektedir. Yaygın olarak kullanılan beton agregalarının bünyesinde reaktif silis mineralleri bulunma olasılığının daha fazla olması nedeniyle ASR'nin AKR'ye göre karşılaşıma olasılığı daha fazladır. Bu da ASR'nin önemini arttırmaktadır. Dolomitli kalkerlerin (Kalsiyum, magnezyum, karbonatların) çok ender olarak karşılaşılan özel kompozisyonlarının AKR'ye neden olduğu bilinmektedir<sup>(3)</sup>.

ASR, beton agregalarında bulunan reaktif silis ile betonun boşluklarında eriyik halde bulunan hidroksil iyonlarının reaksiyonudur. Bu reaksiyon, betonda nem etkisiyle genişleyen bir jelin oluşmasına neden olur. Beton içerisinde şişme sebebiyle meydana gelen bu hacim artışı çekme gerilmelerinin doğmasına sebep olarak betonda çatlamlara yol açar. Bu nedenle ASR konusundaki araştırmalar hem kimyasal hem de yapısal açıdan ele alınmaktadır<sup>(4)</sup>.

İlk olarak, 1920'li ve 1930'lu yıllarda ABD'de, Kaliforniya'daki beton yapılarda nedeni belirsiz çatlak oluşumlarına bağlı yıkımlar rapor edilmiştir. Bu raporlarda beton malzemelerin standartlara uygun olmasına rağmen, yapım yılını takiben birkaç yıl içinde çatlaklar olduğu açıklanmıştır. Ayrıca, genellikle harita çatlağı şeklinde görülen çatlaklardan jel çıkışı, betonda patlamalar gibi belirtiler de işaret edilmiştir. Stanton<sup>(5)</sup>, 1940 yılında bu tür çatlakların (daha sonra Alkali- Silika Reaksiyonu olarak adlandırılan) kimyasal bir reaksiyonun sonucu olduğunu açıklamıştır<sup>(6)</sup>.

Reaksiyonlar sonunda oluşan su emme özelliği olan jel, şişerek genişlemektedir. Reaksiyonun bu özelliği nedeniyle beton bünyesinde 0,1-11 MPa'a varan çekme gerilmeleri yarattığı açıklanmıştır<sup>(7)</sup>.

Bu çalışmada; karmaşık ve kimyasal yapısıyla, son yıllarda betonda yaşanan en önemli hastalık olarak bilinen ve genellikle beton kanseri olarak söz edilen; bu tez çalışması ile birlikte de nem ile beslenen yapısıyla verem hastalığına benzer bulunup ‘‘Betonun İnce Hastalığı’’ olarak adlandırılan Alkali-Silika Reaksiyonu tanıtılacaktır. Çalışmada tüm teorik verilerin sunulmasının ardından uçucu kül, silis dumanı, gazbeton tozu, kiremit tozu ve farklı lityum tuzlarının kullanımıyla hazırlanan deneysel çalışmalar anlatılacaktır. Böylece farklı hazırlanmış numuneler birbiri ile kıyaslanarak, betonda ASR'den kaynaklanan genleşmelerin azaltılmasına yönelik zm üretilmesi yoluna gidilecektir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Alkali-Silika Reaksiyonu Mekanizması

Alkali-silika reaksiyonu (ASR) portland çimentosundaki alkali hidroksitlerle agregada mevcut bazı mineraller (opal, çört, kalsedon, trimit, kristobalit ve kuvars gibi) arasında oluşan bir reaksiyondur<sup>(8)</sup>. Reaksiyon sonucu oluşan alkali-silika jeli bünyesinde fazla miktarda su absorbe ederek genişler ve bu suretle betonun şişmesine ve çatlamasına yol açar<sup>(9)</sup>.

ASR'nin oluşumu için, agrega bünyesinde reaktif silis, alkalitesi yüksek por çözeltisi ve ortamda yeterli rutubet bulunmalıdır. Bu koşullardan herhangi biri olmazsa ASR nedeniyle bir genişleme de olmayacaktır. Betonda oluşan yumuşak dokunun (jel) miktarı; silikanın türü, miktarı ve alkali hidroksit konsantrasyonuna bağlıdır. Aşağıda ASR oluşum mekanizması verilmiştir.

- Alkali + Reaktif Silika → Alkali Silika Jel Ürünleri
- Alkali Silika Jel Ürünleri + Rutubet → Genleşme

Betonda içsel çekme gerilmelerinin oluşumu 1.aşamadaki jel oluşumu ile eş zamanlı değildir. Bu nedenle jelin varlığı mutlaka ciddi boyutta ASR tahribatı oluşacağı anlamını taşımayabilir.

Servis ömrü boyunca kuru kalan bir betonda ASR ciddi bir tehlike olmayabilir. Araştırmalar bağıl nem oranı % 80'in üstünde olan betonlarda ASR'nin oluştuğunu göstermektedir. Düşük su/çimento oranlı beton, ilave çimento, mineral katkı veya herhangi bir yolla beton geçirimsizliği azalır, rutubetin betona girişi ve beton içinde dolaşımı azalır. Dolayısıyla içinde alkalilerin yayılması da azalmış olur.

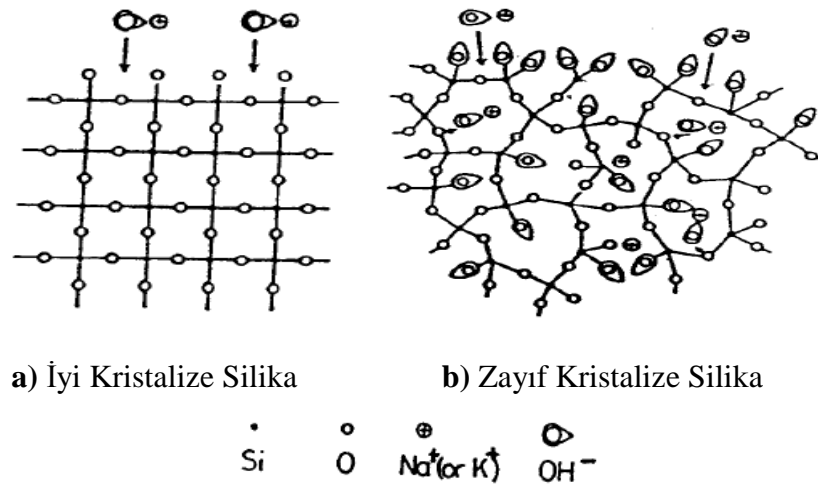
Sıcaklık artışı reaksiyon hızını arttırmaktadır. Agregaların büyük çoğunluğu daha yüksek sıcaklıklarda daha fazla reaktiflik göstermektedir. Ayrıca sık kuruma-ıslanma tekrarı betonda alkali taşınmasını kolaylaştırmakta ve alkalilerin kuruma bölgelerinde yoğunlaşmasına neden olmaktadır<sup>(10)</sup>.

Beton ya da çimento için kullanılan toplam alkali içeriği terimi “sodyum oksit eşdeğeri” olarak ifade edilir ve aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır<sup>(11)</sup>.

$$\text{Na}_2\text{O eq} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O}$$

Alkali-silika reaksiyonu üç aşamada meydana gelir; reaktif silikanın çözülmesi, kalsiyum-sodyum-potasyum jelinin oluşması ve su absorpsiyonu ile jelin genişlemesi. Silisin çözülmesi hidroksit iyonlarının  $\text{OH}^-$  atağı neticesinde iki aşamada olur. Hidroksit iyonlarının mevcudiyeti betonda sadece  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  tarafından değil aynı zamanda  $\text{NaOH}$  ve  $\text{KOH}$  tarafından da sağlanır<sup>(12)</sup>.

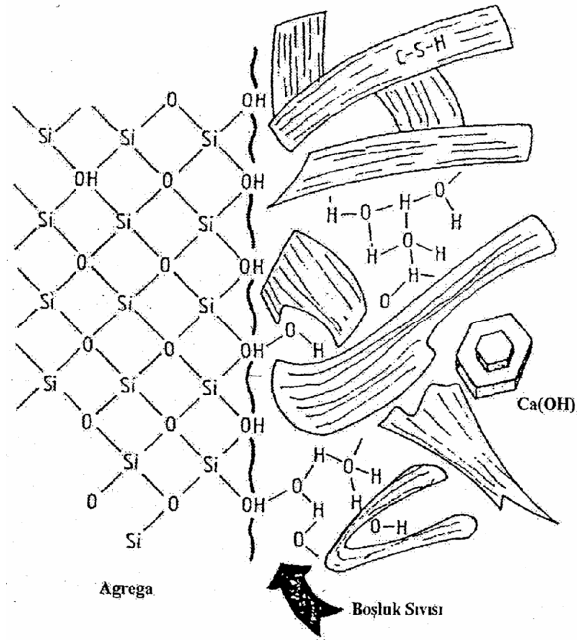
Şekil 2.1’de alkali çözeltisinin silika üzerine atağı görülmektedir. Bu şekilde  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  ve  $\text{OH}^-$  iyonlarının silis üzerine hareketleri şematize edilmiştir.



Şekil 2.1. Silika Üzerinde Alkali Çözeltisinin Ataklarının Şematik Temsili<sup>(13)</sup>



Silikanın çözünme hızı katı parçacıklar içindeki çatlaklarda mevcut olan alkali sıvının difüzyonundan etkilenir. İyonların türü ve iyonik konsantrasyon bu hızı kontrol eder. Çünkü tanecikler içine giren sıvı aynı zamanda hidroksit iyonlu katyonları sürükler ve bu katyonların iyonik yarıçapları difüzyonu sınırlayabilir. Bu yüzden daha küçük iyonik yarıçapa sahip potasyum katyonları daha yüksek difüzyon hızına sebep olabilir. Aynı nedenle lityum tuzları ASR'yi önleyici karışım olarak kullanılır. Çünkü daha büyük iyonik yarıçapa sahip olan lityum hidroksit difüzyonun bazı bölgelerde oluşumuna engel olur<sup>(12)</sup>. Şekil 2.2'de ASR oluşumunun aşamaları anlatılmıştır. Çimentodan gelen alkaliler ve agreganın getirdiği silisin kimyasal tepkime oluşumları şekilde görülmektedir.

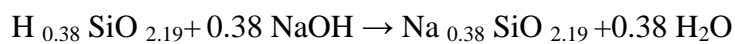


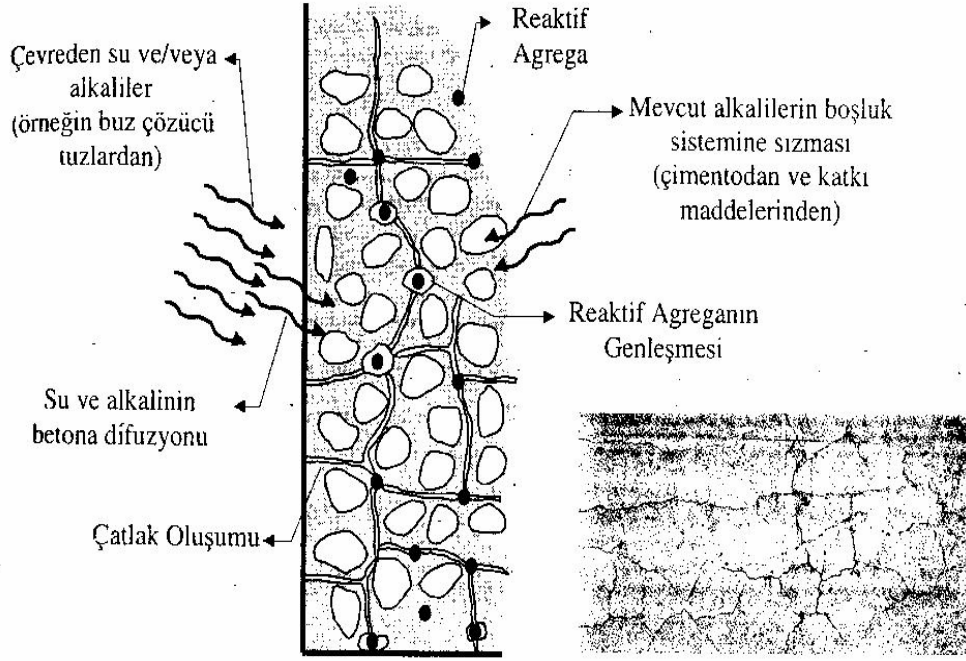
**Şekil 2.2.** Alkali silika reaksiyonunun şematik gösterimi (1.Aşama)<sup>(14)</sup>

C-S-H: Çimento, OH: Beton boşluk suyunda bulunan OH<sup>-</sup> iyonları

Si-O: Reaktif agreg, Ca(OH)<sub>2</sub>:Çimento hidratasyonu sonucu artan kireç

Silika + Alkali → Alkali Silika Jel+Su





**Şekil 2.3.** Alkali-silika reaksiyonu nedeniyle betonun bozulma mekanizması ve tipik çatlak görünümü<sup>(15)</sup>

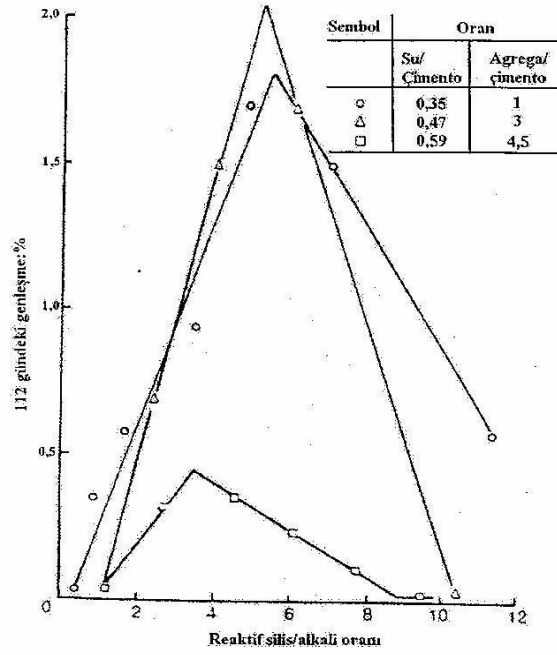
Şekil 2.3’de ASR’nin tipik hali görülmektedir. Öncelikle çimentodan ya da çevreden gelen alkaliler ve reaktif agregalar reaksiyona girmiş ve ASR jel ürününü oluşturmuş daha sonra oluşan bu ürünün bünyesinde su tutması ile beraber genişleme ve akabinde gerçekleşen harita tipi çatlak oluşumu gösterilmiştir.

## 2.2. Alkali-Silika Reaksiyonunu Etkileyen Faktörler

### 2.2.1. Karışım Oranlarının Etkisi

Reaktif agregalar içeren bir betonun karışım oranlarını değiştirilerek betonun reaktif agregalar içeriği ve hidroksil iyonu konsantrasyonu değiştirilebilir. Bu değişim aynı zamanda betonun sonuçtaki genişleme miktarını da etkiler.

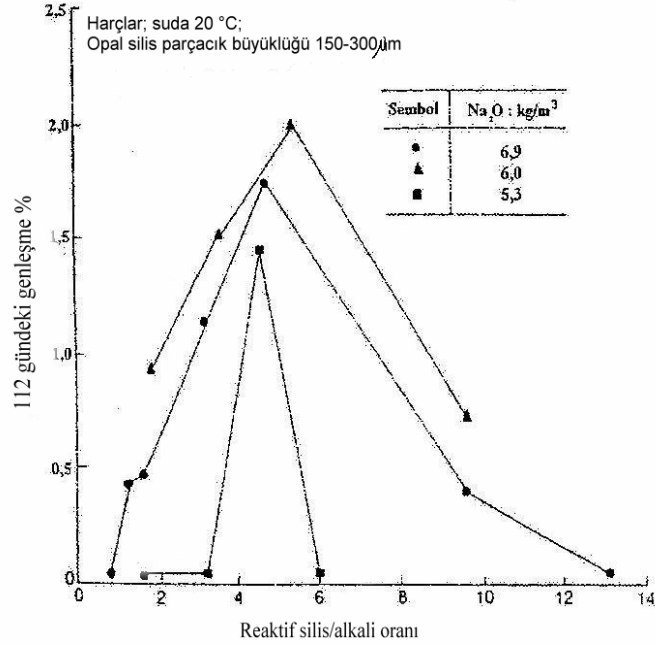
Genleşmenin reaktif alkali/silis oranına bağlı olduğu Şekil 2.4'de görülmektedir. Maksimum genleşme, reaktif alkali/silis oranının 3.5 ile 5.5 olması durumunda meydana gelmektedir. Harç ve betonların bu davranışı pratikte önemlidir<sup>(16)</sup>.



Şekil 2.4. Reaktif Silis/Alkali Oranına Göre Genleşme Miktarları<sup>(16)</sup>

### 2.2.2. Alkali İçeriğinin Etkisi

Betonda kullanılan çimentonun alkali içeriğinin değişmesi, betonun hidroksil iyon konsantrasyonunu, betonun alkali içeriğini ve reaktif silis/alkali oranını değiştirir. Suda bekletilen harç çubuklarında çimentonun alkali içeriğinin genleşmeye etkisi Şekil 2.5'de görülmektedir. Çimentonun alkali miktarı arttıkça pesimum davranış eğrisi genişlemekte ve maksimum genleşme reaktif silis/alkali oranı 4.5 civarında iken meydana gelmektedir<sup>(16)</sup>.



**Şekil 2.5.** Çimentonun Alkali İçeriğinin Genleşmeye Olan Etkisi<sup>(16)</sup>

Bu noktada pesimum kavramından söz edilecek olursa; optimum kelimesinin karşıt anlamlısı olarak ifade edilebilir. Reaksiyon sonucu betonda en fazla genişmeye ve hasara neden olan reaktif agrega oranına “Pesimum oranı” denilmektedir<sup>(5,17)</sup>. Pesimum oranından sonra neden genişlemenin azaldığı Glasser ve Kataoka<sup>(18,19)</sup> tarafından agregaların bozunmasına neden olan alkali çözeltilerinin beton içindeki tüm reaktif agregayı tamamen bozmaya yetmemesi ve betonda daha az oranda genişmeye neden olması ile açıklanmaktadır. Pesimum oranını gösteren eğrinin şekli çimento çeşidinden, kompozisyonundan, oranından, agrega özelliklerinden ve aynı zamanda alkali miktarından da etkilenmektedir<sup>(18, 20- 22)</sup>.

Benzer alkali içeriklerinde, genişleme miktarlarında önemli farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar aşağıdaki faktörlere bağlı olabilir;

- Çimentolardan farklı hızlarda alkali açığa çıkması.

- Çimentoların sodyum/potasyum oranlarındaki değişimler.
- Farklı hızlarda dayanım kazanımı<sup>(4)</sup>.

Yeni yapılarda ASR sebebiyle çatlamanın önüne geçebilmek üzere alkali miktarını sınırlamak açısından aşağıdaki formül öne sürülmüştür.

$$\frac{cxa}{100} \leq 3kg / m^3 \quad (4)$$

c: betonun hedeflenen ortalama portland çimentosu miktarı (kg/m<sup>3</sup>)

a: betonun reaktif alkali içeriği (çimentonun kütlece yüzdesi)

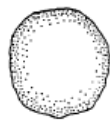
Betondaki tüm alkalilerin sadece portland çimentosundan ileri geldiği düşünülürse İngiliz agregaları ile yapılan araştırmalarda, 3 kg/m<sup>3</sup>'ün koruyucu bir limit olduğu sonucuna varılmıştır<sup>(23)</sup>.

### 2.2.3. Reaktif Agreganın Cinsinin ve Tane Büyüklüğünün Etkisi

Betonda ASR'nin oluşabilmesi için herhangi bir formda reaktif silisin bulunması gerekmektedir. Reaktif silis oldukça farklı doku ve kristal yapısı sergiler. Silisin doku farklılığı, kayaçlaşma sürecinde azalan soğuma hızına bağlıdır. Agregadaki silisli mineraller kayaç oluşum sürecinde soğuma hızına bağlı olarak amorf veya camı (kristalleşmemiş) yapıdan kripto kristal, mikro kristal ve kristal yapıya kadar geniş bir aralığa dağılırlar. Kimi durumlarda kuvars kristallerinin oluşumu sırasında içsel gerilmeler oluşur. Bu tür kuvars mineralleri içeren agregalar reaktiftir<sup>(4)</sup>. Şekil 2.6'da çeşitli reaktif agrega tipleri ve bu agregalarda ASR oluşumuyla gerçekleşen karakteristik çatlak görünümüne yer verilmiştir.

Reaktif Agrega Tiplerinin İçerikleri ;

- Hatalı kristal ya da kristal yapıda olmayan silis. Örneğin; kristobalit, opal,çört
- Kuvars ya da mikrokristal yapıda kuvars
- Kriptokristal yapıdaki volkanik kayaların cam gibi olanları; örneğin ponza taşı<sup>(13)</sup>



Opal



Porfir



Çört



Şist,Fillit



Granit,Gnays



- 1) Jel tarafından şişirilmeden hemen öncesi

Henüz parçalanmamış, kenarlardan deforme olmuş



- 2) İç yapıya doğru çatlama

Rijit ve jel gerilimlerinin olduğu parçalanabilir tanecikli yerlerde



- 3) İç boşluklara hapsolmuş jelin opalli bölgelerde birikmesi

Taş etrafında basit kırık oluşumu



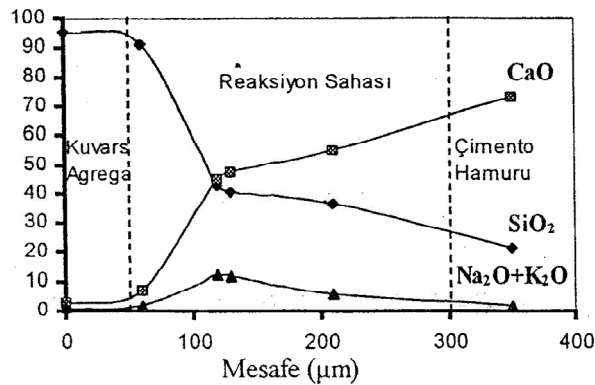
- 4) ASR jelinin etkisiyle intergranül yapıyı takip eden çatlamlar



- 5) Çatlakların Yığılması, kuvars( $\text{SiO}_2$ ) olduğu bölgelerde ciddi tahribat

**Şekil 2.6.** Reaktif agrega çeşitleri ve ASR' ye maruz kalan hassas alkali kayaların karakteristik örneklerinin kompozisyonu ve morfolojisi<sup>(13)</sup>

Hızlandırılmış koşullarda kürlenmiş betonlarda ise kalsiyum, daha yüksek hidrolik çapa ve daha düşük difüzyon hızına sahip olduğundan reaksiyon alanına sızacak zaman bulamaz ve kalsiyum-alkali-silis jeli yerine alkali-silis jeli oluşur. Araştırmacının tipik bir reaktif agrega-çimento reaksiyon alanı üzerinde yaptığı mikro analiz sonuçları Şekil 2.7’de görülmektedir. Şeklin dikey eksenini kimyasal kompozisyonu yüzde cinsinden ifade etmektedir. Oluşan jelin kimyasal kompozisyonu, jelin akışkanlığı ve hareket kabiliyeti hakkında önemli bir etkiye sahiptir. Fazla miktarda kalsiyum içeren jelin hareket kabiliyetinin fazla olduğu söylenebilir de bu konuda literatürde tam bir fikir birliğine varılmamıştır. Jelin akışkanlığı, betona verebileceği zarar açısından önem taşımaktadır. Sert ve rijit yapıdaki jeller çatlamlara yol açan genleşme kuvvetleri meydana getirirken, daha sıvı yapıdaki jeller ise varolan çatlaklar arasından sızar ve betonda zarar oluşturmaz. Ayrıca çözünebilir silikat türleri ise göç ederek lokal pH’ın azaldığı bölgelerde tekrar çöker<sup>(4)</sup>.



Şekil 2.7. Alkali-silis reaksiyon sahasının kimyasal kompozisyonu<sup>(24)</sup>

Günümüzde, elektron sonda mikroanaliz (EPMA) ve tarayıcı elektron mikroskobu-enerji yayımlı x-ışını (SEM-XRD) gibi modern araştırma teknikleri sayesinde, alkalilerin ve kalsiyumun reaksiyona uğrayan agreganın içine girebildiğini ve agreganın dışında ise silis miktarının arttığını bilmekteyiz. Az miktarda reaktif silis, portland çimentosu tarafından salıverilen tüm metal alkalileri tüketebilme özeliğine sahiptir<sup>(4)</sup>.

#### Reaktivitedeki Azalmaya Göre Kayaçlar

- Tüfler dahil volkanik camlar
- Metakuvarsit metamorfize kumtaşları
- Granitik gnayslar
- Deforme olmuş granitik gnayslar
- Diğer silis içeren metamorfik kayaçlar
- Silisli ve mikalı şist ve filitler
- İyi kristalize olmuş volkanik kayaçlar
- Pegmatitik volkanik kayaçlar
- Silis içermeyen kayaçlar

#### Reaktivitedeki Azalmaya Göre Silis Mineralleri

- Amorf silis
- Opal
- Stabil olmayan kristalin silis
- Çört
- Kalsedon
- Silisin diğer kriptokristalin formları
- Metamorfik olarak ayrıışmış ve bozulmuş kuvars



- Deforme olmuş kuvars
- Yarı kristalleşmiş kuvars
- Saf kuvars<sup>(4)</sup>

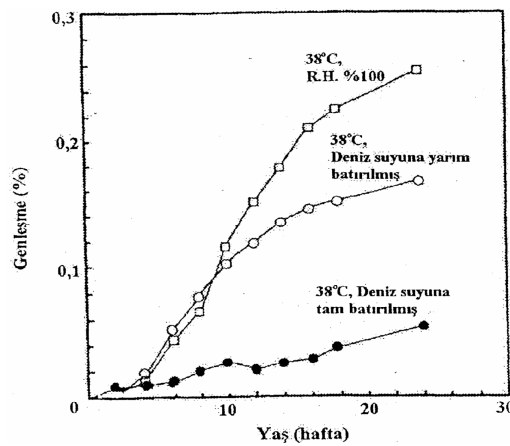
Reaktiviteyi azaltan silis minerallerinden amorf silikanın özellikleri ve kullanım alanlarına Davraz ve Gündüz'e<sup>(25)</sup> ait deneysel çalışmada değinilmiştir. Amorf silika volkanik-hidrotermal sistemler içinde belirli sıcaklığa sahip koloidal silika partikülleri içeren akışkanların yeryüzüne çıkararak soğuması ve aşırı doygunluğa erişmesi sonucunda yüzeyde oluşan sedimanter bir kayadır. Silika sinter veya jeo-silika olarak da adlandırılmaktadır. Amorf silika, açık rengi, hafifliği ( birim hacim ağırlığı  $< 1\text{gr/cm}^3$ ), mikro gözenekli yapısına bağlı yüksek porozitesi ve su emme kabiliyeti, gevrek ve kolay kırılabilir oluşu ile diğer silikatlı kayalardan kolayca ayırt edilebilir. Bilinen en yaygın kullanım alanı inşaat sektörüdür. Beton dayanımını artırıcı ve priz hızlandırıcı polimer esaslı kimyasal maddeler, uçucu küller, kalsine killer ile endüstriyel yan ürün/atık olarak elde edilen silika dumanı gibi, doğal amorf silika da dünyanın bazı bölgelerinde mineral katkı maddesi olarak inşaat endüstrisinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Ülkemiz inşaat ve beton endüstrisinde ise henüz bilinen ve kullanılan bir hammadde değildir. Bununla birlikte son birkaç yılda Isparta Keçiborlu civarında amorf silika yatakları belirlenmiş ve bu kayacın (mikronize halde) betonda mineral katkı maddesi olarak değerlendirilebilirliği üzerine çalışmalar başlatılmıştır<sup>(25)</sup>.

Reaktif agreganın tane büyüklüğü de ASR sebebiyle oluşabilecek zararlar üzerinde etkilidir. Büyüklüğü 75 mm ile 1 mm arasında değişen, hatta bazen 5 mm'ye kadar çıkabilen boyutundaki reaktif agrega kullanılması durumunda genleşmenin maksimum olduğu görülmektedir. Ancak, 75 mm altındaki boyutlarda

reaktif agreganın fazla miktarda bulunması halinde genleşme oluşmadığı halde reaksiyon delillerinin ortaya çıktığı gözlenmiştir. Reaktif agreganın boyutunun etkisi, reaktif agreganın fiziksel ve mineralojik karakterine de bağlıdır. Gözenekliliği fazla olan agreganın içine boşluk çözeltisinin girişi daha kolay olmakta ve reaksiyon alanı artmaktadır<sup>(4)</sup>.

#### 2.2.4. Dış Alkalilerin Etkisi

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 veya çatlak oluşmuş betonlarda dış alkaliler ASR'nin neden olduğu genleşmeleri artırır. Deniz suyunun sertleşmiş betonda oluşan ASR genleşmelerini artırıcı etkisi, hidrate  $C_3A$  ve portlandit bileşenlerinin NaCl ile oluşan reaksiyonu sonucu  $OH^-$  miktarının artması sebebiyledir<sup>(4)</sup>. Şekil 2.8'de deniz suyunun ASR üzerine olan etkisini anlatan bir şekil verilmiştir.



Şekil 2.8. Deniz Suyunun ASR'ye Etkisi<sup>(4)</sup>

### 2.2.5. Rutubetin Etkisi

Rutubet, silisin çözülmesine, alkali iyonlarının 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 üzerinde olan betonlarda ASR'nin oluştuğunu göstermektedir.

Düşük su/çimento oranlı betonun, ilave çimento, mineral katkı veya herhangi bir başka yolla beton geçirimsizliği azaltılırsa; rutubetin betona girişi ve beton içinde dolaşımı azalır. Dolayısıyla beton içinde alkalilerin yayılması da azaltılmış olur.

Betonun sürekli olarak suya doygun halde oluşunun mu, yoksa sıkça kuruyup ıslanmasının mı daha çok tahribat yarattığı kesin olarak bilinmemektedir. Ancak sık kuruma-ıslanma tekrarının betonda alkali taşınmasının kolaylaşmasına ve alkalilerin kuruma bölgelerinde yoğunlaşmasına neden olduğundan bu bölgelerde reaksiyonun hızlı gelişimine yol açtığı bilinmektedir<sup>(4)</sup>.

### 2.2.6. Sıcaklığın Etkisi

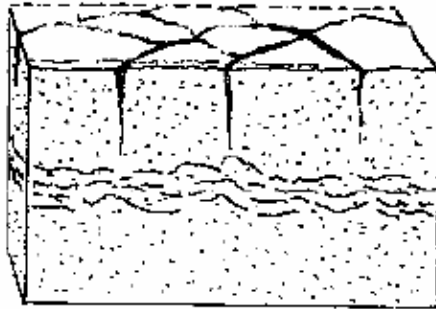
Sıcak iklim koşullarındaki yapılar, soğuk iklim koşullarındakilere göre ASR'ye karşı daha duyarlıdır. Çünkü reaksiyonun hızı sıcaklık arttıkça artar. Sıcaklık artışı, agreganın büyük çoğunluğunda aşırı termal gerilmelere sebep olur. Bazı agregalarda yapılan araştırmalar, 13-20 °C aralığındaki ölçümlerin 38° C' dekinden farklı olduğunu göstermiştir<sup>(26,27)</sup>. Yüksek ve düşük sıcaklıkların genleşmeye etkisi agregaya bağlıdır. Agregaların büyük çoğunluğu daha yüksek sıcaklıklarda daha fazla reaktivite göstermektedir<sup>(4)</sup>.

### 2.2.7. Sürüklenmiş Havanın Etkisi

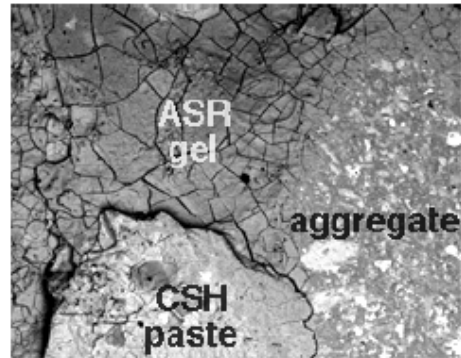
Reaktif agrega içeren ancak ASR sebebiyle hasar görmeyen yapılar incelendiğinde, jelin hava boşluklarını tamamen veya kısmen doldurduğu görülmektedir. Bundan dolayı, jelin hasar görmemiş betonda hava boşluklarını doldurarak ilerlediğini ve hava sürükleyici katkı kullanımının ASR sebebiyle oluşan hasarı önleyebileceği söylenebilir<sup>(4)</sup>.

### 2.3. Alkali-Silika Reaksiyonunun Belirtileri

Betonda ASR ürünleri oluşmadıkça ASR hasarından bahsedilemez. Yapılacak dikkatli incelemelerle tespit edilebilecek ASR belirtileri; genişleme, betonda çatlaklar, yüzey birikintileri, yüzey parçalanmaları-patlama ve renk değişimleridir. ASR varlığının en tipik göstergesi, genişmelerle ortaya çıkan harita çatlağı tipindeki çatlak desenleridir<sup>(3)</sup>. Şekil 2.9 (a) ve (b)'de ASR çatlaklarının deseni görülmektedir.



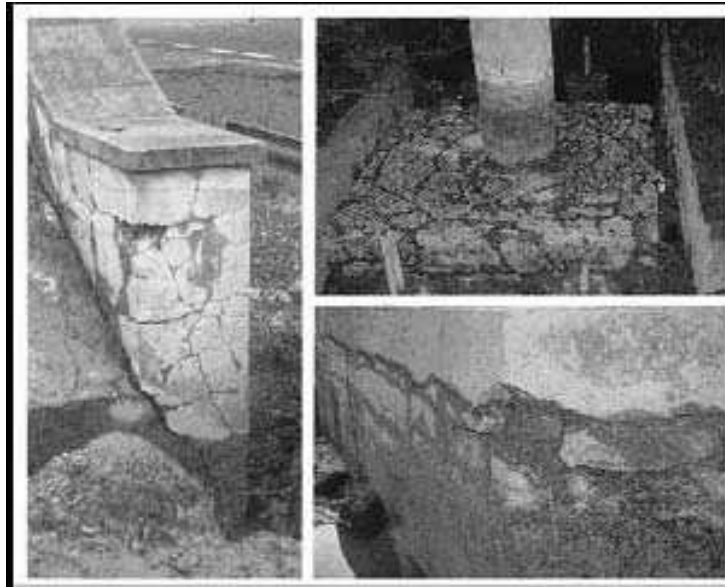
2.9 (a)



2.9 (b)

**Şekil 2.9. (a) ASR'nin neden olduğu harita çatlakları (b) ASR Jelinin Beton İçinde Oluşumu<sup>(28)</sup>**

Yapılabilecek göz muayenesi ile; çatlakların konumu ve deseni, uzunlukları, genişlikleri, görünür derinlikleri, çatlakların agrega kesitinden mi yoksa çimento hamurundan mı geçtiği saptanabilir. ASR'nin oluşturduğu jelleşme, agrega taneciği içinde veya agrega taneciği çevresinde reaksiyon halkası biçiminde gelişebilir. Bulabildiği ölçüde su emerek enerjisini boşaltan bu jel, su emdikçe hacimsel olarak büyür (şişer). ASR'den kaynaklanan çekme gerilmeleri nedeni ile 3 veya 4 kollu yıldız şeklinde çatlar. ASR jelinin su emerek şişmesi sonucu beton içinde depolanan potansiyel enerji, bu çatlamlar ile boşalır (Şekil 2.10)<sup>(3)</sup>.



**Şekil 2.10.** ASR'den Kaynaklanan Çatlaklara İlişkin Fotoğraflar<sup>(3)</sup>

Beton çatlakları boyunca beyazdan griye kadar değişen renklerde ASR jeli yada kalsiyum karbonat tortuları görülebilir. Bu birikintilere bazen yüzey tortuları veya salgıları da denir. Çatlaklardan dışarı sızan bu maddeler, beyaz sarımtırak veya renksiz, viskoz, akışkan, mumsu, elastik yapışkan ya da sert olabilirler<sup>(3)</sup>.

Yüzeyde veya yüzeye çok yakın bölgelerdeki parçalanmalar, tipik bir mısır patlaması gibi davranarak beton yüzeylerinde küçük çukurlar oluşturur. İleri yaşlarda, ASR kopmalarının kaplama betonlarında daha çok görülür. Özellikle rutubetli, ıslak kohezif zeminler üzerinde olan beton kaplamalarda, rutubet yoğunlaşması patlama türü parçalanmaları arttırır<sup>(3)</sup>.

Yüzeyde renk kaybı veya renklenmeler, genellikle harita çatlakları ile birlikte görülür. Koyu renkli veya kararmış bölgeler genellikle ASR'den kaynaklanmaktadır. Çatlak boyunca olan bölgelerde 2-3 mm genişlikte renk açılması, beyazlaşma, pembeleşme yada kahverengileşme görülebilir<sup>(3)</sup>. Şekil 2.11'de çatlak ve renk değişiminin görülebildiği beton yola ait bir şekil verilmiştir.



**Şekil 2.11.** Afyon'da ki Beton Yoldan ASR'ye İlişkin Çatlak Görünümü<sup>(29)</sup>

## 2.4. Alkali-Silika Reaktivitesinin Belirlenmesi ve Deneyle

Yüksek alkali içeren betonlarda agreganın iyi bir performans gösterdiğine dair uzun süreli gözlemlere dayanan sonuçlar varsa reaktivite tespiti için ayrıca deney yapmaya gerek yoktur. Aksi halde, agreganın veya belirli agrega-kombinasyonlarının zararlı alkali-silis reaksiyonu gösterip göstermeyeceğinin tespiti için deneyler yapmak gerekmektedir. Alkali-silis reaktivitesi hakkında günümüzde hala uluslararası kabul görmüş tek bir veya birkaç standart deney yöntemi bulunmamaktadır. Ülkeler, kendilerine en uygun deney metotlarını seçerek uygulamaktadırlar<sup>(4)</sup>.

Şantiye performansı, agregaların reaktivitesi hakkında belirleyici bir gösterge olmasına rağmen aşağıdaki sebeplerden dolayı kesin bir fikir veremeyebilir:

1. Üzerinde çalışılan agregalarla inşa edilmiş limitli sayıda, istenilen yaşta ve belirli şiddette etkiye maruz kalmış yapının bulunması veya yapılarda kullanılan agregalar hakkında yeterli bilginin bulunmaması,
2. ASR'yi etkileyen çimento miktarı, çimentonun alkalinitesi, ve kür koşulları gibi diğer faktörler hakkında da yeterli bilginin olmayışı,
3. Nem, donma-çözünme, ıslanma-kuruma, deniz suyu ve buz çözücü tuzlar gibi dış etkilerin bir yapıdan diğerine farklılık göstermesi,
4. Arada geçen zaman süresince kullanılan agregaların kazı seviyesi ve lokasyonu gibi jeolojik faktörlerdeki; patlatma, kırma, yıkama, eleme gibi teknik faktörlerdeki değişimlerin meydana gelmesi<sup>(4)</sup>.

Laboratuvar deneylerinin bazılarında reaksiyon, anormal yüksek çimento içeriği, alkali ekleme veya yüksek sıcaklıklarda test edilerek hızlandırılmaktadır. Test

metotları, bu sebeple iki ana faktör göze 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 sonuçlara götürebilir<sup>(4)</sup>.

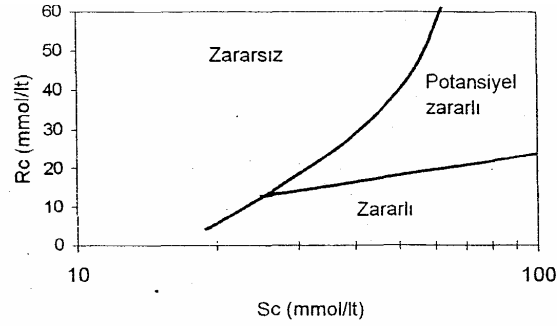
#### **2.4.1. ASTM C 295- Agregaların Petrografik Analizi**

Petrografik inceleme, minerallerin cins ve yüzdelere göre kayacın adlandırılması işlemidir. Agregalardan alınan ince kesitlerin optik mikroskop yardımıyla incelenmesi sonucu içeriklerinde bulunan potansiyel reaktif mineral fazların (reaktif silis) teşhisi mümkündür. X-ışını yayılımı ve tarayıcı elektron mikroskobu gibi yöntemler reaktif silisin saptanmasında faydalıdır. Agregaların yanı sıra, zarar gören beton ve harç numunelerden alınan ince kesitler üzerindeki çalışmalar sonucu, meydana gelen etkinin ASR sebebiyle olup olmadığını tanımlayabilmek mümkündür. Petrografik incelemeyi yapan kişinin bu konudaki deneyimi önemli bir faktördür. ASR üzerinde kimyasal metotlar, beton veya harç numuneleri ile testler uygulamadan önce bu analizin uygulanması zaman kazandırmak ve uygulanacak metodun agrega tipine göre seçimini kolaylaştırmak bakımından önemlidir<sup>(4,30,31)</sup>.



#### 2.4.2. ASTM C 289- Kimyasal Metot

Bu yöntem çabuk ve görünürde açık sonuçlar verdiği için daha çok kullanılmaktadır. Agregayı temsil eden 25 gr ağırlığında ve 150-300 mm'ye kırılmış numune, 25 ml 1 M sodyum hidroksit çözeltisinde 80 C derecede 24 saat boyunca bekletilir. Daha sonra filtre edilir ve asitte titre yöntemiyle çözülmüş silis ile alkalinitedeki azalma analiz edilir. Deney üç kez tekrarlanır. Sonuçlar daha sonra Şekil 2.12' deki eğride işaretlenerek kontrol edilir. Bu şekilde Rc alkalinitedeki azalmayı, Sc ise çözülmüş silisi ifade etmektedir. Eğer tüm sonuçlar eğrinin sol tarafındaki bölgede ise agrega zararsız olarak kabul edilebilir. Bu eğri, yüksek alkali içerikli harç çubuğu genleşmeleri, agregaların petrografik analizleri ve betonda kullanılan agregaların saha performansları dikkate alınarak çizilmiştir<sup>(4,32)</sup>.



Şekil 2.12. Alkalinitedeki Azalma-Çözülmüş Silis Grafiği<sup>(4)</sup>

Bu deney sonucunda reaktif olduğu saptanan agreganın, şantiye koşullarında veya ASTM C-227 harç çubuğu yöntemi ile aksi bir sonuç alınmadıysa reaktif olduğu söylenebilir<sup>(4)</sup>.

Deney sonuçları kalsit, dolomit, magnezit, siderit gibi kalsiyum, magnezyum veya demirli karbonatlar ile antigorit (serpentin) gibi magnezyum silikatlar içeren agregalar için doğru sonuçlar vermeyebilir. Ayrıca, bu deney, zorlanmış veya mikro-granüle kuvars içeren veya metagrovak, metasilttaşı, metakuvars ve benzeri kayalardan oluşan yavaş ve geç silis-silikat reaktivitesi olan agregaların davranışlarını belirlemede kullanılamaz<sup>(4)</sup>.

#### **2.4.3. ASTM C 227- Harç Çubuğu Metodu**

Bu metot, belirli şartlarda kürlenmiş harç numunelerinin belirtilen süre sonucundaki boy değişimlerinin (genleşme yüzdesi) ölçülerek çimento-agrega kombinasyonlarının reaktivitesinin belirlenmesi esasına dayanır. Agregaların şantiye performansı, petrografik incelemeleri ve kimyasal metot uygulanarak elde edilen veriler ışığında bu deneyin verilerinin değerlendirilmesi ve yorumlanması çimento-agrega kombinasyonlarının reaktivitesi hakkında daha sağlıklı sonuçlar vermektedir. Deney sonucunda belirtilen sınır değerlerin 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<sup>(4)</sup>.

Bu deneyde, belirtilen gradasyonda agrega elenerek agrega/çimento oranı 2.25 ve akma değeri % 105-120 arasında olacak şekilde bir harç karışımı hazırlanarak 25x25x285 mm boyutundaki prizmatik kalıplara dökülür. Genellikle, alkali içeriği kütlece % 1.0 ile % 1.2 eşdeğer Na<sub>2</sub>O olan çimento kullanılır. 24 saat sonunda kalıplardan çıkarılan numunelerin boyları ölçülür. Numuneler, 38°C sıcaklıkta ve kenarlarında ortamı nemli tutan fitil görevi gören kurutma kağıdının bulunduğu

kapalı kaplarda su üzerinde (nemli ortamda) saklanır ve periyodik olarak ölçümleri alınır<sup>(4,33)</sup>.

Genleşme limitleri, üç numunenin ortalaması alınarak, 6 ayda %0.10 veya 3 ayda %0.05'tir. 6 aylık sonuçların bulunmaması halinde 3 aylık genleşme limitleri esas alınabilmektedir. 6 aylık genleşme limitlerinin sınır değeri aşması halinde oluşan genleşmenin ASR sebebiyle olduğunun kesin değerlendirilmesinin yapılabilmesi için ek deneyler yapılması önerilmektedir. Grattan-Bellew<sup>(34)</sup> (1989)'a göre 12 ve 6 aylık sonuçlar rapor edilmelidir. Pek çok araştırma kurumu, 12 aylık genleşme sonuçlarına göre değerlendirme yapmaktadır. Hatta, Oberholster ve Davies<sup>(35)</sup>, 12 aylık genleşme limitini %0.05 gibi çok konservatif bir değerle sınırlandırmaktadır<sup>(4)</sup>.

Deney sonuçları, kullanılan kabın tipi, fitillerin bulunup bulunmayışı, çimentonun alkali içeriği, su/çimento oranı gibi faktörlerden hayli etkilenmektedir. Bu deneylerin uygulanışında, fitil kullanılmaması, karışım suyuna NaOH eklemek suretiyle alkali içeriğinin çimentonun kütlege %1.25 eşdeğer Na<sub>2</sub>O seviyesine çıkarılması, su/çimento oranının kırılmış agrega için 0.50, doğal agrega için 0.44 seviyesinde tutulması önerilmektedir<sup>(31,36)</sup>.

Bu yöntemin dezavantajları, uzun süreli olması, kür koşullarındaki farklılıklar sebebiyle değişimler gösterebilmesi ve özellikle bazı yavaş reaktif agregaların reaktivitelerinin saptanamamasıdır.

Bu metot, aynı zamanda mineral ve kimyasal katkıların ASR genleşmesindeki azalmaları ölçmede kullanılmaktadır<sup>(4)</sup>.

#### **2.4.4. ASTM C 441- Mineral Katkıların veya Yüksek Fırın Cürufunun**

##### **Etkinliklerini Ölçen Standart Deney Metodu**

Bu metot, mineral katkılarının veya yüksek fırın cürufunun agregalarla çimento alkalileri arasındaki reaksiyon sonucu meydana gelebilecek zararlı genleşmeleri önlemedeki etkinliğini inceler. Pireks camı reaktif agregası ile mineral katkı veya cüruf içeren çimento kombinasyonları kullanılarak hazırlanan harç çubuklarının standart kür koşullarında, belirli periyotlardaki genleşmeleri değerlendirilir<sup>(4)</sup>.

Öncelikle, 400 gr yüksek alkalin çimento ile belirli gradasyondaki 900 gr pireks camı agregası kullanılarak kontrol karışımı hazırlanır. Bu karışımın 14 günlük minimum genleşmesi % 0.250 olmalıdır. Cüruf dışındaki mineral katkılarda 300 gr yüksek alkalin çimento ile mutlak hacmi 100 gr çimentoya eşit miktarda ( $100 \times$  mineral katkının yoğunluğu / 3.15) mineral katkı kullanılır. Kullanılan katkı cüruf ise mutlak hacmi 200 gr çimentoya eşit miktarda ( $100 \times$  cürufun yoğunluğu / 3.15) kullanılır. Belli durumlar için şantiyede kullanılacak oranlarda çimento-katkı karışımları ile şantiyede kullanılacak alkalinite çimento kullanılabilir. Numunelerin döküm, kütleme ve ölçüm işlemleri ASTM C 227'deki gibidir. Deney süresi sonunda kontrol numunesi ile katkı içeren numuneler arasındaki "genleşme miktarındaki azalma" değeri yüzde cinsinden hesaplanır. ASTM'ye göre, genleşme miktarındaki azalma değerinin % 75 veya daha fazla olması halinde kullanılan mineral katkı miktarı uygundur. Belirli bir çimento agregası kombinasyonunun kullanılması halinde ise 14 günlük maksimum genleşme değeri % 0.02 olarak belirlenmiştir<sup>(37)</sup>.

Bu metodun eleştirilen yönleri; pireks camı gibi çok yüksek reaktivitedeki bir malzemenin doğal agrega gibi davranmadığı ve bu sebeple gerçekçi sonuçlar alınamayacağı ve pireks camının değişken kompozisyona sahip, ortalama alkali veren bir malzeme olması sebebiyle alkali katkısının deney sonuçlarını etkileyebileceğidir<sup>(4,38)</sup>.

#### **2.4.5. ASTM C 1293- Beton Prizma Metodu**

Bu deneyin amacı, beton prizmalarının boy değişimi ile agregaların alkali reaktivitesi hakkında fikir edinmektir. Deney yapılmadan önce agregaların petrografisi ile ilgili bilgi edinilmesinde fayda bulunmaktadır<sup>(4)</sup>.

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 75x75x287 mm kalıplara dökülür. Numunelerin çimento içeriği 420 kg/m<sup>3</sup> olup su/çimento oranı 0.42 ile 0.45 arasında işlenebilirliği sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Kullanılan çimentonun eşdeğer Na<sub>2</sub>O içeriği, karışım suyuna NaOH eklenerek çimentonun kütlece % 1.25'ine yükseltilir. 24 saat sonra kaptan çıkarılan numunelerin ilk boy ölçümleri alındıktan sonra 38 C derece sıcaklıkta, nemli ortamda (su üzerinde) standartta belirtilen şekilde saklanır. Saklama kabında fitil kullanımı bu yöntemde de mevcuttur<sup>(39)</sup>.

Genleşme limitleri üç numunenin ortalaması alınarak, 1 yıllık periyot sonunda % 0.04 olarak belirlenmiştir. Bu metot genelde diğer test metotlarına ek olarak kullanılmaktadır.

Direkt olarak beton üzerine uygulandığından gerçeğe daha yakın sonuçlar vermekte ve bu sebeple diğer deney metotları yetersiz kaldığında kullanılmaktadır. Fakat ne var ki uzun süreli bir deney olması bunu zaman zaman zorlaştırmaktadır. Bununla beraber bu metot, mineral ve kimyasal katkıların ASR genişlemelerine etkisi hakkında en gerçekçi sonuçları vermektedir<sup>(4)</sup>.

#### **2.4.6. ASTM C 1260- Hızlandırılmış Harç Çubuğu Metodu**

Bu metot, kür şartlarını ağırlaştırarak reaksiyonu hızlandırmakta ve agregaların reaktivitesinin 16 gün içinde tespitine olanak vermektedir. Bu yöntem ilk olarak Güney Afrika Ulusal Araştırma Bürosu(NBRI) tarafından uygulanmıştır<sup>(40)</sup>.

Diğer metotlarda olduğu gibi bu metot için de uygulamaya geçmeden önce agregaların petrografik analizinin ve limitlerin üzerinde genişleme görüldüğü takdirde önceki metotlarda belirtildiği şekilde reaktivitenin ASR sebebiyle oluşup oluşmadığının incelenmesi önerilmektedir<sup>(4)</sup>.

Standartta belirtilen gradasyondaki agrega, kütlece çimentonun 2.25 katı kadar kullanılarak su/çimento oranı 0.47 olan harç karışımı hazırlanır. 25x25x285 mm boyutlarındaki kalıplara dökülen harç numuneleri 24 saat sonra kalıplardan alınarak ilk boyları ölçülür. Kalıplarda numune üzerine yapışarak suyun difüzyonunu önleyebilen standart kalıp yağları yerine teflon sprej gibi artık bırakmayan tipte kayganlaştırıcı materyal kullanılır. Kalıp sökümünden itibaren 1 gün süreyle 80 C derece suda bekletilerek boy ölçümleri alınan numuneler, takip eden 14 gün boyunca 80 C derece 1N NaOH çözeltisinde bekletilir ve periyodik ölçümleri alınır. Standart, çimentonun alkali miktarı hakkında bir değer vermemektedir, bunun nedeni kür koşulları nedeniyle numunelerin boşluk çözeltisi alkalinitesinin artmasıdır<sup>(41)</sup>.

Toplam 16 gün süren deney sonucunda, genleşme yüzdeleri şöyle değerlendirilir; 16 gün sonundaki genleşmeler,

- % 0.10 değerinin altıdaysa agregalar zararsız davranış göstermektedir. 16 gün sonundaki genleşmeler,
- % 0.20 değerinin üstüdeyse agregalar potansiyel olarak zararlı genleşme gösterirler.
- 16 gün sonundaki genleşmeler, % 0.10 ile % 0.20 değerinin arasındaysa agregalar, şantiye koşulları altında hem zararlı hem de zararsız davranış gösterebilirler. Karar vermeden önce ek deneylerle genleşme sebebinin araştırılması ve ölçümlerin 28 güne kadar uzatılması önerilmektedir<sup>(40)</sup>.

Bu metot, kür koşulları oldukça ağır olduğundan tatmin edici şantiye performansı gösteren bazı agregaların da reaktif olarak tanımlanabilmesi gibi bir probleme yol açabilmektedir. Yine de deney süresinin kısa olması ve pratikliği sebebiyle araştırmalarda daha çok tercih edilmektedir<sup>(4)</sup>.

#### **2.4.7. Jel Pat Metodu**

Bu metotta agrega örneği koyu kıvamda çimento hamurunun içine gömülür ve yüzeyi bilerek agrega parçalarının açığa çıkması sağlanır. Alkalin çözeltiye batırılan hamur, stereoskopik mikroskop ile periyodik aralıklarla incelenir. Deney, 20 ° C sıcaklıkta veya yükseltilmiş sıcaklıklarda uygulanabilmektedir. Agregada opal silis içeren bileşik olması halinde birkaç gün içinde jel oluşumu gözlenebilir.

Bu metot, petrografik mikroskop altında incelenemeyecek kadar ince dağılımlı reaktif silisin ortaya çıkarılmasına imkan verir. Bu deney sonucunda reaktif olabileceği izlenimi veren agrega hakkında yeterli saha performansı olmadığı

takdirde beton veya harç prizma yöntemlerinden birinin uygulanması önerilmektedir<sup>(4)</sup>.

#### **2.4.8. Alman Çözünme Metodu**

Bu metot, opal ve flint içeren agregaların potansiyel alkali reaktivitesini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Seçilen tanecik boyutundaki agregalar (1-2 veya 2-4 mm) 90 °C 4 M NaOH çözeltisinde 1 saat boyunca bekletilir, kurutulup tartılan agregalardaki kütle kaybı, “alkalide çözülebilir” olarak adlandırılmaktadır<sup>(4)</sup>.

Ancak bu metot agreganın alkaline ortamdaki kimyasal kararsızlığını ortaya koymakta fakat çeşitli çimento kombinasyonlarıyla birlikte davranışını ve genişleme yaratıp yaratmayacağını belirleyememektedir. Ayrıca, 1 mm boyutunun altındaki agreganın potansiyel reaktiviteye katkısını göz önüne almamaktadır<sup>(31)</sup>.

#### **2.4.9. Ozmotik Hücre Metodu**

Stark'a<sup>(42)</sup> göre ozmotik hücre, agrega parçacığı ile çimento ara yüzeyinin modellenmesidir. Ozmotik hücre, her biri 1N NaOH çözeltisi içeren iki adet odacıktan oluşmaktadır. Odacıklar, su/çimento oranı 0.55 olan çimento hamuru zarı ile birbirlerinden ayrılır. Reaksiyon odası adı verilen odacıkta 150-300 mm boyutlarında 12.40 gr ağırlığında agrega parçacıkları bulunmaktadır. ASR oluştuğunda çözelti, çimento hamuru membranının içinden “havza odacığından” , “reaksiyon odacığına” doğru akar. Her odacığın üst kısmındaki ince borucuklardaki çözelti miktarındaki değişim, bu akışın miktarını ve hızını ölçmeye imkan tanımaktadır. Günde 1.5-2.0 mm gibi bir akış hızı, agreganın potansiyel olarak reaktif olduğunun göstergesidir.



Ters bir akış gözlenmesi, agreganın reaktif olmadığına işaretidir. Bu deney normal reaktif bir agregada 30-40 gün devam ederken hızlı reaktif agregada 2-3 günde sonuç vermektedir. Bu metot, reaktivitenin hızlı değerlendirilmesine imkan vermektedir. Gelişme deneyleri ile birlikte kullanılması faydalıdır<sup>(4)</sup>.

#### **2.4.10. Otoklav Metotları ve Diğerleri**

Bazı araştırmacılar, harç veya beton numuneleri yüksek sıcaklık ve basınç altında alkali çözeltisinde veya suda kaynatarak ya da buhar kürüne tabi tutarak agregaların reaktivitesini ölçmek için metotlar öne sürmüşlerdir. Bu konuda standart bir deney yöntemi olmamakta ve numune boyutlarından kullanılan malzeme miktarına ve kür koşullarına kadar pek çok faktör değişiklik göstermektedir. Amaç, boy değişimi ve çatlakların incelenerek agregaların reaktivitesinin belirlenmesidir.

Bu yöntemler dışında araştırmalara konu olan pek çok farklı deney metodu bulunmaktadır. Kimyasal büzülme metodu, farklı ülkelerin araştırma enstitülerinde geliştirilen, farklı kür koşullarında gerçekleştirilen harç ve beton prizma metotları bunlardan bazılarıdır. Tüm bu metotlar değerlendirilirken, özel kullanım alanları, pratik ve hızlı sonuç vermeleri, hangi tip malzemeler için güvenilir sonuçlar verdikleri göz önüne alınmalıdır. Geliştirilen metotların hepsinin her tip agrega için güvenilir sonuçlar vermediği açıktır. Bu sebeple, agregalar değerlendirilirken, uygulanan deney yöntemleri öncelikle agreganın saha performansı verileriyle, veri mevcut değilse diğer deney metotlarıyla karşılaştırılmalı olarak test edilmelidir<sup>(4)</sup>.

Agregaların reaktivitesinin tespitinde önemle vurgulamak gereken nokta ilk önce yapılacak işin petrografik analiz olduğudur. Petrografik analiz, agregaların seçimi ve reddinde kullanılacağı gibi, işlemin devamında uygulanacak deney

metotlarının seçimi hakkında fikir vererek zaman kaybı ve boş uğraşlardan korunmayı sağlar. Gerçekten de, bazı deney metotları bazı tip agregaların reaktivitesini saptayamazken bazı deney metotları ise belirli tipte agregalar için fazla şiddetli şartlar oluşturabilir. Hızlı deney metotları arasında istatistiksel olarak en güvenilir ve rutin bir test olarak en çok tavsiye edilen metot ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuğu metodudur. Bu yöntem, şiddetli şartlar içermesi sebebiyle bazı zararsız agregalarda negatif sonuçlar verdiğiinden malzemeleri reddetmede kullanılmamalıdır. Ancak, zararlı agregaların çok az bir miktarında yanlış değerlendirmelere yol açması sebebiyle emniyetli tarafta kalmayı sağlamaktadır. Uzun süreli metotlar arasında ise 38°C' de uygulanan ASTM C1293 beton prizma metodu en gerçekçi sonuçları vermektedir<sup>(31)</sup>.

## **2.5. Mineral ve Kimyasal Katkıların ASR'ye Etkileri**

### **2.5.1. Mineral Katkıların ASR'ye Etkisi**

Mineral katkıları, kendi başına bağlayıcı özellik taşımayan, ince öğütüldüğünde ve nemli ortamda çimento hidratasyonu sonucu açığa çıkan kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip bileşenler oluşturan silisli veya silisli-alüminli malzemelerdir<sup>(4)</sup>.

Günümüzde, sertleşmiş betonda ASR sebebiyle meydana gelebilecek zararlı genleşmeleri kontrol etmesi mümkün olan tüm metotlar arasında puzolanik veya mineral katkıların kullanılmasının betonun durabilitesini ve ASR etkilerine karşı direncini artırması bakımından avantajlara sahip olduğu kabul edilmiştir. Literatürde uçucu kül, yüksek fırın cürufu, sus dumanı gibi yapay malzemeler için “yapay puzolan” terimi zaman zaman kullanılmaktadır. Gerçekte “Puzolan” terimi şiddetli

yanardağ patlamaları sonucu oluşan camsı piroklastik malzemeler için kullanılmaktadır. Beton imalatında mineral katkıların ana malzemelerden biri olarak kullanımı, kar sağlamlasının yanı sıra teknik, enerji tasarrufu ve çevrenin korunumu açısından da faydalar sağlamaktadır<sup>(4,36)</sup>.

Mineral katkıların ASR genişmesini azaltmasında hangi mekanizmanın baskın olduğu netlikle anlaşılmasada şu teorik kabuller dikkate alınmaktadır;

**1.** Katkı maddeleri, Portland çimentosundan daha az reaktif oldukları ve daha düşük oranlarda alkali açığa çıkardıkları için seyreltici görevi görürler. Katkı içeren karışımlar, sadece çimento içeren karışımlara nazaran daha yüksek efektif su/çimento oranına sahiptirler ve su da 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 arayeri iyileştirmesi yaparak daha düşük geçirimsizliğe yol açmaktadır. Bu sayede, alkalilerin reaktif agregaya göçü yavaşlamaktadır.

**3.** Katkı maddeleri, çimento hamurundaki  $\text{Ca(OH)}_2$  içeriğini azaltarak pH'ını düşürmektedir. Ancak pH'ın,  $\text{Ca(OH)}_2$ , C-S-H ve boşluk çözeltisi arasındaki denge ile belirlendiği ve bunların tek başlarına miktarlardan bağımsız olduğu belirtilmiştir.

**4.** Katkı maddesi içeren sistemler, alkalileri sadece Portland çimentosu ile hazırlanan karışımlardan daha güçlü bir şekilde bağlarlar. Portland çimentosu hamurunda C-S-H'nin tipik Ca/Si oranı 1.8 iken mineral katkı kullanıldığında bu oran düşmektedir. C-S-H'nin yüzeyindeki yük, Ca/Si oranına bağlıdır, bu oran yüksek olduğu takdirde C-S-H'nin yüzey yükü pozitif olmakta ve C-S-H liflerinde anyonlar

emilmektedir. Bu durumda Na ve K gibi kanyonlar boşluk suyunda kalırlar. Ca/Si oranı 1.2 - 1.3'den düşük olduğunda C-S-H'nin yüzey yükü negatif olur ve C-S-H ile alkali kanyonları birleşir <sup>(4)</sup>.

Monteiro<sup>(43)</sup>, mineral katkıların etkinliğini Prezzi vd.tarafından öne sürülen çift tabaka teorisi ile açıklamıştır.Bu amaçla değişik oranlarda puzolan,uçucu kül ve cüruf içeren ve hızlandırılmış harç çubuğu metoduyla genleşmeleri ölçülen numunelerin bir kısmında oluşan ASR jelinin yapısı tarayıcı elektron mikroskopu(SEM) ile gözlenmiş ve bu jellerin kimyasal analizi enerji yayıcı X-Işını ile incelenmiştir.Farklı oranlarda mineral katkı ve iki tip çimento içeren numunelere ait ASR jeli ortalama kimyasal kompozisyonları Çizelge 2.1 de verilmiştir<sup>(4)</sup>.

**Çizelge 2.1.** Farklı Oranlarda Mineral Katkı İçeren Numunelere Ait ASR Jeli Ortalama Kimyasal Kompozisyonları<sup>(44)</sup>

Numuneler	Referans Çimento I	Çimento I + %25 Puz.A	Çimento I + %25+UK	Referans Çimento 2	Çimento 2 + %45 Cüruf	Çimento 2 + %55 Cüruf
Genleşme(%) 30Günlük	0.145	0.079	0.078	0.155	0.116	0.032
SiO <sub>2</sub>	53.40	60.18	58.05	51.51	67.18	51.07
CaO	30.32	24.27	28.84	20.52	29.83	37.92
Na <sub>2</sub> O	10.69	8.16	6.73	7.74	6.21	3.31
K <sub>2</sub> O	0.58	1.53	1.96	3.26	0.85	0.60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.57	3.14	2.56	13.23	3.08	3.94
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.70	0.92	0.67	1.87	0.71	0.74
MgO	0.78	0.87	0.00	1.01	0.65	1.09
SO <sub>3</sub>	0.96	1.10	1.17	0.85	0.89	1.36
Na <sub>2</sub> O Eşdeğer	11.06	9.17	8.03	9.89	6.76	3.70
CaO/(Na <sub>2</sub> O)e	3.10	3.49	3.59	2.16	4.80	12.15
SiO <sub>2</sub> /(Na <sub>2</sub> O)e	5.06	7.73	7.25	5.43	9.15	13.23

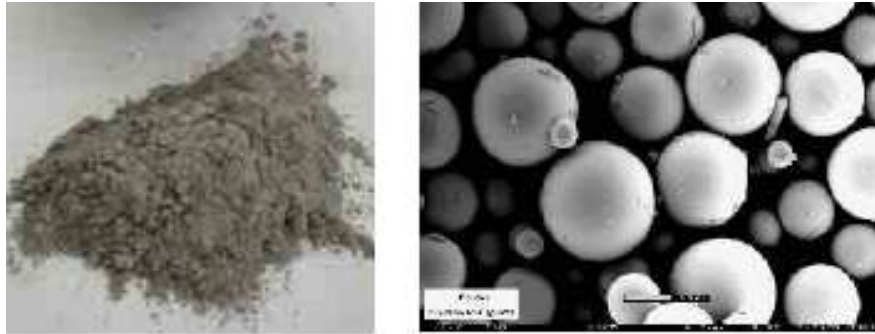
Mineral katkıların etkinliği incelenirken uygulanan deney yöntemleri de önem taşımaktadır. Hızlandırılmış harç çubuğu metodunda harç numunelerinin tabii tutulduğu kür koşulları, doğada betonların maruz kaldığı koşullardan çok daha şiddetlidir. Bu deneye tabii tutularak reaktif olduğu belirlenen bazı agregalar, normal servis koşullarında betonda genleşme göstermemişlerdir. Bu sebeple, anılan yöntemle reaktivitesi belirlenen agregalar üzerinde başka deneylerin de uygulanması önerilmektedir. Ancak mineral katkıların etkinliğini karşılaştırmalı olarak belirlemede, hızlandırılmış harç çubuğu metodu, bu amaç için uygun ve hızlıdır. ASR'nin oluşabilmesi için betondaki alkali miktarı da önem taşımaktadır. Alkaliler; çimentodan, katkılardan ve dış kaynaklardan gelebilirler. Genellikle düşük alkaline mineral katkıları, yüksek alkalilere nazaran boşluk çözültisi alkali konsantrasyonunu, dolayısıyla da genleşmeyi azaltma bakımından daha etkilidir. Dışarıdan devamlı alkali girişi söz konusu olduğunda (hızlandırılmış harç çubuğu yönteminde olduğu gibi) mineral katkının alkali içeriği ikinci plandadır ve puzolanik aktivite sonucu geçirimsizliğin azalması olayı ön plana çıkar<sup>(4)</sup>.

Mineral katkıların ASR üzerine etkileri tür ve içerik oranları ile yakından alakalıdır. Genellikle oranın azlığı nispetinde ASR'yi yavaşlatma etkisi de azalmaktadır. Mineral katkı miktarı yeter derecede artırıldığı takdirde ise ASR oluşumunu geriletebilmektedir.

Mineral katkının etkili alkali içeriğinin katsayısı için sabit bir değer yoktur ancak var olan değerler içeriğin bir fonksiyonu olarak karşımıza çıkmaktadır<sup>(47)</sup>. Karşım oranları her bir mineral katkı için farklılık göstermektedir. Bu nedenle deneysel tecrübelerden faydalanılarak her bir katkı için optimum miktara karar verilmelidir<sup>(45)</sup>.

### 2.5.1.1. Uçucu Külün ASR' ye Etkisi

Termik santrallerde, elektrik enerjisinin üretimi için toz haline getirilmiş kömür yakılmaktadır. Kömürün yakılması sonucu çeşitli gazlar ve yanmamış atıklar ortaya çıkar. Açığa çıkan kömür külünün yaklaşık %80'i baca gazıyla beraber uçar. Bu küller, atmosfere salıverilmeden bacalardaki filtreler tarafından tutulur (Bkz. Şekil 2.13). Bunlar literatürde “uçucu kül” (UK) olarak adlandırılırlar. Uçucu küllerin ana kimyasal bileşenleri; silis ( $\text{SiO}_2$ ), alümin ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ve demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )'tür. Uçucu küller, çeşitlerine göre farklı miktarlarda kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ), magnezyum oksit ( $\text{MgO}$ ), sülfürtrioksit ( $\text{SO}_3$ ) ve yanmamış kömür parçacıkları karbon (C) içerirler<sup>(4)</sup>.



Şekil 2.13. Uçucu Külün Normal ve SEM İle Alınmış Görüntüsü<sup>(45)</sup>

Uçucu kül puzolanik özellik gösterir. Yüksek oranda (%10'dan fazla)  $\text{CaO}$  içeren uçucu kül puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özellik de gösterir.

ASTM C 618'e göre uçucu kül, C sınıfı ve F sınıfı olmak üzere ikiye ayrılır. F sınıfı uçucu külün  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  içeriği %70'ten fazladır. Antrasit veya bitümlü kömürden elde edilir. Sadece puzolanik özellik gösterir. C sınıfı uçucu külün

SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği %50'den fazladır. Linyit ya da subbitümlü kömürden üretilir. Kireç içeriği %10'dan fazla olabilir. Puzolanik ve bağlayıcı özellik taşır. Uçucu külün kireç içeriği %10'un üzerindeyse “yüksek kireçli uçucu kül” olarak adlandırılır<sup>(4)</sup>. (Bkz. Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3)

**Çizelge 2.2.** Uçucu Küllerin Sınıflandırılması<sup>(45)</sup>

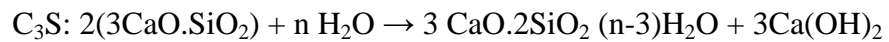
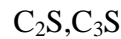
Sınıf	Tanımı
<b>F</b>	SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≥ %70 bitümlü veya antrasit (parlak kömürden elde edilen uçucu küller)yalnızca puzolanik özelliğe sahip
<b>C</b>	SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≥%50 linyit kömüründen elde edilen uçucu kül. Kireç (CaO) içeriği %10'dan fazla olabilir. (Yüksek kireçli uçucu kül) Puzolanik ve bir miktar bağlayıcılık özelliğe sahip

**Çizelge 2.3.** Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri<sup>(45)</sup>

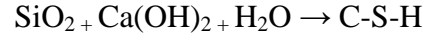
Kimyasal Özellik	F Sınıfı (CaO < %10)	C Sınıfı (CaO >%10)
SiO <sub>2</sub>	43.6-64.4	23.1-50.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.6-30.1	13.3-21.3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.8-23.9	3.7-22.5
CaO	0.7-6.7	11.5-29.0
MgO	0.9-1.7	1.5-7.5
Na <sub>2</sub> O	0-2.8	0.4-1.9
C(Kızdırma Kaybı)	0.4-0.72	0.3-1.9

#### 2.5.1.1.1. Uçucu Küllerin Puzolanik Aktiviteleri ve Kimyasal Özellikleri

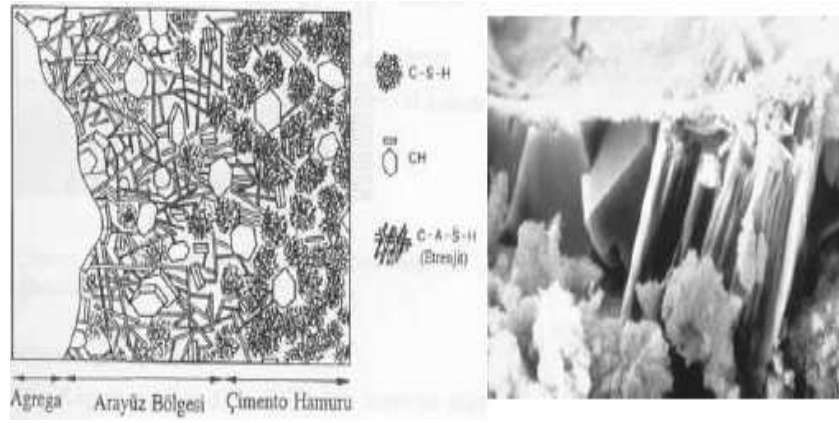
Çimentonun karma oksitlerinin hidratasyonu sonucu Ca(OH)<sub>2</sub> oluşur.



Bu  $\text{Ca(OH)}_2$  ile bünyesinde aktif silis içeren puzolan reaksiyona girerek C-S-H oluşturur.

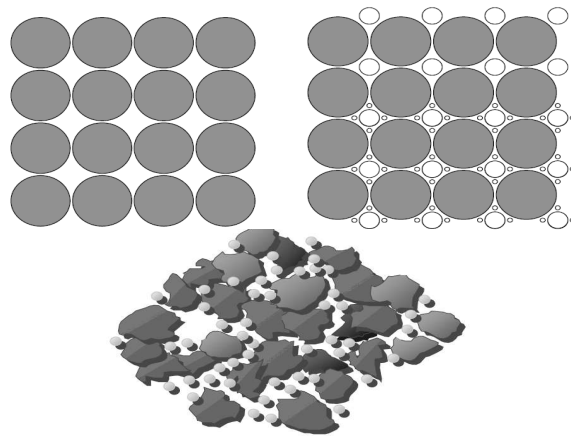


Çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan  $\text{Ca(OH)}_2$  genelde agrega üzerine çökler<sup>(45)</sup>.



**Şekil 2.14.** Uçucu Kül ve Diğer Puzolanların Arayüz Bölgesini Puzolanik Etki

Nedeniyle Güçlendirmelerinin Şematik Hali<sup>(45)</sup>



**Şekil 2.15.(a)** Uçucu Kül Çimento – Agregamatriksi İçerisinde Boşlukları

Doldurur<sup>(45)</sup>





**Şekil 2.15. (devam ediyor) (b)**

Uçucu külün pozolanik aktivitesinin sonucu olarak, agrega matriksleri ve çimento agrega arayüzünü doldurmasına ilişkin oluşum şekilleri Şekil 2.14 ve 2.15’de verilmiştir.

Uçucu küldeki CaO miktarı için standartlarda bir limit bulunmamaktadır. Ancak serbest kireç, hidrasyon sırasında kalsiyum hidroksit (portlandit) haline dönüşerek, betonda genleşme ve çatlak oluşumuna sebep olabilir. Bu nedenle serbest kireç miktarı TS EN 450’de<sup>(50)</sup> %1 ile sınırlandırılmıştır<sup>(45)</sup>. (TS450 standardı 2006 yılında yürürlükten kaldırılmış yerine TS EN 450-1+A1 getirilmiştir.)

MgO hidrasyonu yavaş gelişen bir maddedir. Ancak, hidrate olduğunda meydana gelen hidrasyon ürününün miktarı büyük bir hacim kaplar ve sertleşmiş betonun genişleyip çatlamasına yol açar. Uçucu kül şartnamelerinin büyük bir bölümünde max. MgO miktarı %5 ile sınırlandırılmıştır<sup>(45)</sup>.

Yüksek miktarlarda SO<sub>3</sub> içeriği, ileri yaşlarda yüksek miktarda kalsiyum alumina sülfat hidrate oluşumuna (ettringite) yol açtığından, sertleşmiş betonda

genleşme ve bozulmalar oluşturur. Uçucu kül ile ilgili ASTM şartnamesinde SO<sub>3</sub> miktarı max. %5 olarak belirlenmiştir<sup>(45)</sup>.

ASR reaksiyonunun azaltılmasında eklenen F Sınıfı Uçucu Kül, ASTM C 618'e göre sağladığı bazı avantajlar aşağıda sıralanmıştır:

- 1) Yapım maliyetini düşürür.
- 2) Portland çimentosu üretiminde tasarruf sağlar.
- 3) Hidratasyon ısını ve geçirimliliği azaltır.
- 4) Su yapılarının durabilitesini artırır.
- 5) Uzun vadede daha yüksek dayanım sağlar.
- 6) CO<sub>2</sub> oluşumunu azaltır.

Uçucu kül, katkılı çimento üretiminde kullanıldığı gibi betonda belirli oranlarda çimento veya ince agrega yerine de kullanılmaktadır. Taze betonda sabit su/çimento oranında işlenebilirliği artırır. Sertleşmiş betonda ise dayanım kazanma hızını yavaşlattığından erken yaşlardaki dayanımı düşürürken ileri yaşlardaki dayanımı artırır. Ayrıca, puzolanik özelliği sayesinde oluşturduğu ikincil C-S-H'larla yapıyı daha yoğun hale getirir, agrega-harç arayerini iyileştirir ve bu sayede betonun geçirimliliğini azaltır. Bu sebeple, çeşitli kimyasal ve fiziksel etkilere karşı betonun durabilitesi artar<sup>(4)</sup>.

Alkali-silika reaksiyonu, betonda uçucu kül gibi bazı puzolanların yeterli miktarda kullanılmasıyla geciktirilebilmekte veya önlenmektedir. Puzolanların ince taneleri içindeki silis çimento hamuru gözenek sıvısındaki alkalileri hızla bağlayarak yoğunlukları ve sıvının pH değerini azaltır. Bu durumda gözenek sıvısında azalan alkalilerin agregadaki reaktif silis ile reaksiyona girmeleri zorlaşır. Ayrıca, katkılı hamurda geçirgenliğin azalmış olması da olumlu etki yapmaktadır<sup>(46)</sup>.

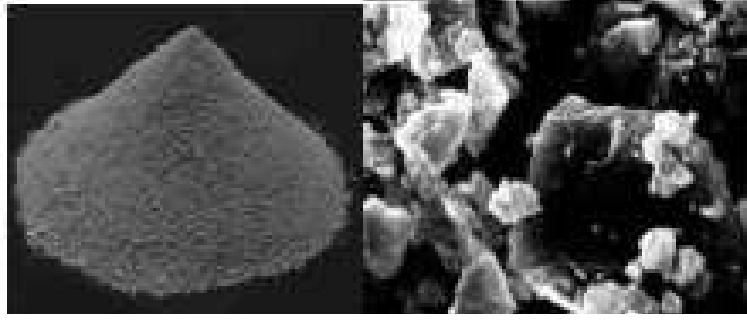
### **2.5.1.2. Yüksek Fırın Cürufunun (YFC) ASR'ye Etkisi**

Çeşitli metal endüstrilerinin yan ürünü olarak elde edilen atık maddelere “cüruf” adı verilmektedir. Cüruflar, elde edildikleri metal endüstrisinin ana ürün tipine ve üretim yöntemlerine bağlı olarak birbirinden farklı kimyasal bileşenlere ve özelliklere sahiptir. Örneğin, nikel ve bakır gibi metallerin cürufları yalnızca puzolanik özelliğe sahipken, demir-çelik üretiminden elde edilen yüksek fırın cüruflarının (YFC) kendi başına bağlayıcı olma özelliği vardır<sup>(45)</sup>.

Konvansiyonel yöntemle üretim yapan çelik endüstrisinde elde edilen cüruflar kristal yapılı olup, ancak yol malzemesi veya hafif beton agregası olarak kullanımı mümkündür. Buna karşılık modern yöntemlerle çelik üretiminden elde edilen cüruflar ise camsı yapıya sahip olup puzolanik özellik gösterirler. Bunları çimento ile birlikte kullanmak mümkündür. Örneğin, nikel ve bakır gibi metallerin cürufları yalnızca puzolanik özelliğe sahipken, demir-çelik üretiminden elde edilen yüksek fırın cüruflarının (YFC) kendi başına bağlayıcı olma özelliği vardır<sup>(45)</sup>.

### **2.5.1.3. Silis Dumanının ASR'ye Etkisi**

Silis dumanı, silikon metali veya ferrosilikon gibi silikon alaşımlarının üretimi esnasında ortaya çıkan, ortalama tanecik çapı 0.11µm'den az olan yüksek incelikte (yaklaşık çimentonun inceliğinin yüzde biri kadar) bir üründür. Bu malzemenin silis içeriği %85 ile %98 arasında değişmektedir. Kimyasal yapısındaki ikincil bileşenler, karbon, (yanmamış kömür artığı), demir oksit ( $Fe_2O_3$ ), alümin ( $Al_2O_3$ ), 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.



**Şekil 2.16.** Silis Dumanından Görünümler<sup>(45)</sup>

Toz halinde, yoğunlaştırılarak, sıkıştırılarak, su-azaltıcı kimyasal katkılarla işlem görerek veya sulandırılarak piyasaya sunulur. Betonda kullanımı, basınç dayanımını artırır, kanama, segregasyon, geçirimsizlik ve hidrasyon ısısını azaltır, ayrıca buz çözücü tuzlar, sülfatlar gibi çeşitli dış etkilere ve alkali-agrega reaksiyonuna karşı durabiliteyi artırır. Ancak, inceliği sebebiyle su isteğini arttırması, plastik büzülme sebebiyle çatlamaya yatkın olması gibi etkiler kullanım esnasında göz önünde bulundurulmalı ve gerekli önlemler alınmalıdır.

**Çizelge 2.4.** Silis Dumanının Kimyasal Özellikleri<sup>(45)</sup>

<b>Kimyasal Bileşen</b>	<b>ABD</b>	<b>Norveç</b>	<b>Türkiye</b>
SiO <sub>2</sub>	90.0-93.0	90.0-96.0	93.0-95.0
C	1.3-2.6	0.5-1.4	0.8-1.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.4-0.7	0.2-0.8	0.4-1.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5-1.6	0.5-3.0	0.4-1.4
MgO	0.3-0.5	0.5-1.5	1.0-1.5
CaO	0.5-0.8	0.1-0.5	0.6-1.0
Na <sub>2</sub> O	0.1-0.3	0.2-0.7	0.1-0.4
K <sub>2</sub> O	1.0-1.2	0.4-1.0	0.5-1.0
S	0.1-0.2	0.1-0.4	0.1-0.3
K.K	1.4-2.8	0.7-2.5	0.5-1.0

Silis dumanı, yoğun bir yapı oluşturarak betonun geçirimliliğini azaltır, geniş özgül yüzeyi ile alkalileri bağlayarak boşluk çözeltisinin alkali konsantrasyonunu düşürür. Ayrıca 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 salınan sodyum ve potasyum iyonlarının büyük kısmı reaksiyon esnasında tükenir. Betonun dayanım kazanmasından önce gelişen bu reaksiyon zararlı genleşmeler ve çatlaklara yol açmaz.

Silis dumanının ASR üzerindeki etkisi, kimyasal kompozisyonuna ( $\text{SiO}_2$  ve alkali içeriğine), kullanım yüzdesine, çimentonun tipi, alkali içeriği ve inceliğine bağlıdır. Olafsson<sup>(47)</sup>, ASTM C227'nin<sup>(33)</sup> modifiye versiyonunu uyguladığı araştırmalarında püreksi ince agrega olarak kullanmış ve silis dumanı gibi yüksek yüzey alanına sahip puzolanlarda düşük oranlarda kullanımın yararlı olabildiğini gözlemlemiştir.

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<sup>(4)</sup>.

#### 2.5.1.4. Metakaolinin ASR'ye Etkisi

Beton üretiminde kullanılan puzolanların çoğu endüstriyel atık malzemeler veya yan ürünlerdir. Metakaolin (MK) bu amaç için üretilen puzolanik bir malzemedir. Metakaolinin çimento harcında puzolan amaçlı olarak kullanımı 1960'lı yıllara dayanır. 1990'lı yıllardan itibaren ise sağladığı yüksek dayanım ve dayanıklılık özellikleri nedeniyle beton üretiminde kullanımı yaygınlaşmıştır<sup>(47,48)</sup>.

Saflaştırılmış kaolin kilinin kalsine edilmesiyle üretilen MK, beyaz renkli, amorf yapılı bir alümina silikattır. 100–200 °C civarında kil mineralleri adsorbe sularını kaybederler. Kaolin kilinin dehidrolize olarak suyunu kaybettiği sıcaklık ise 500–800 °C (diğer bir kaynağa göre 700–900 °C) aralığındadır. Bu sıcaklıkta kaolin bağlı suyunun % 14'ünü kaybeder ve MK'ye dönüşür. Dönüşüm sonucunda, alümina ve silika tabakaları, kristal yapılarındaki düzeni kaybeder, böylece kaolin, amorf ve kimyasal olarak reaktif bir yapı kazanır. Kaolin kili aşırı miktarda sıcaklığa maruz kalırsa (900 °C üstünde) mullit fazı oluşur ve reaktif özelliğini kaybeder. Başarılı bir ısıl işlem uygulanması halinde yüksek oranda puzolanik özelliğe sahip amorf fazlı MK elde edilir<sup>(49)</sup>.

MK diğer puzolanlarda olduğu gibi kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek çimentoya ilave bağlayıcı özellik kazandırır. Literatürde MK'in çimento yerine uygun oranlarda kullanıldığında, mekanik özellikleri olumlu etkilediği, kılcal su emmeyi ve permeabiliteyi azalttığı, durabiliteyi arttırdığı, çiçeklenmeyi kontrol etmede etkili olduğu ve özellikle alkali silika reaksiyonu oluşumunu azalttığı rapor edilmiştir. Öte yandan MK kullanımı ile betonda kuruma rötresi ve sünmenin azaldığı rapor edilmiştir<sup>(47)</sup>.

Tosun vd.'nin<sup>(47)</sup> metekaolin ve silis dumanı ile yaptıkları çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1. MK ve SD'nin kullanımı çimento harçlarının aynı kıvamı elde etmek için gerekli su ihtiyacını arttırmıştır. MK katkısı çok küçük tane boyutu, çubuksu ve köşeli tane şekli nedeniyle, silis dumanı ise nispeten kaba ve küresel şekilli olmasına rağmen yüzey pürüzlülüğü nedeniyle su ihtiyacını arttırmıştır.

2. MK içeren harçların 28 günlük basınç ve eğilme dayanımları kontrol harcının üzerine çıkmıştır.

3. MK katkılı 28 günlük harçların su emme özellikleri, kılcal boşluk oranlarının oldukça düşük seviyelerde olduğunu göstermiştir. Diğer bir deyişle, katkılı harçların teorik olarak kapiler boşluk oranları ilk yaşlarda kontrol harcından daha yüksektir. Ancak kapiler boşluklar zamanla MK'in yarattığı puzolanik reaksiyon sayesinde azalmıştır.

4. SD katkılı harçların düşük mekanik performansları ve su emme değerlerindeki yükseklik iri silis dumanı taneciklerinin puzolanik reaksiyon yapamamasına bağlanmıştır<sup>(47)</sup>.

#### **2.5.1.5. Gazbeton Tozu ve ASR'ye Etkisi**

TS 453'e göre<sup>(50)</sup>; "Gazbeton, ince öğütülmüş silisli bir agregaya ve inorganik bir bağlayıcı madde(kireç ve/veya çimento) ile hazırlanan karışımın gözenek oluşturucu bir madde ilavesi ile hafifletilmesi ve buhar kürü ile sertleştirilmesi ile elde edilen gözenekli hafif betondur." Gazbetonu oluşturan ana maddelerde biri olan kuvarsit, genel olarak kuvars kumu tanelerinin, silisten meydana gelmiş bir çimento

ile birbirlerine çok sağlam şekilde bağlanmalarıyla oluşmuş bir kayaç olup, sedimanter ve metaformik olmak üzere 2 çeşidi vardır. Kuvarsit, direnci yüksek, sağlam ve aşındırıcı bir kayadır ve öğütülmesi oldukça güç ve pahalıdır. Bu nedenle kuvarsit üretimi, aynı kimyasal bileşimde bulunan kuvars kumu ve kumtaşından, ayrıca daha saf olan kuvarstan sonra tercih edilmektedir. Kuvarsitin kimyasal bileşimi, kuvars, kumtaşı ve kuvars kumu gibi SiO<sub>2</sub> olup ancak içerisindeki çeşitli miktarlarda feldspat, mika, kil, manyetit, hematit, granat, rutil, kireçtaşı vb. bulunabilir. Gazbeton üretiminde kullanılan kuvarsitte SiO<sub>2</sub> miktarının en az %90, Fe miktarının en fazla %2 olması istenmektedir<sup>(50-52)</sup>.

#### **2.5.1.5.1 Gazbetonun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri**

- a) Özgül ağırlığı: Gazbeton malzemenin ortalama boşluksuz özgül ağırlığı 2.60 kg/dm<sup>3</sup>'tür.
- b) Porozite: Gazbetonun porozitesi kuru birim hacim ağırlığı ile ters orantılı olarak değişmektedir.
- c) Isıl Genleşme: Gazbetonun ısı genleşme katsayısı, 20-100 °C arasında 0.008 mm/m °C'dır.
- d) Rötre: Gazbeton, bünyesindeki nem miktarı azaldıkça hacim kaybetmekte arttıkça da hacim kazanmaktadır. TS453, ağırlıkça %3,5 ve %20 arasındaki nem durumunda, hacim değişmesini 0.5 mm/m olarak sınırlandırmıştır.
- e) Su emme-kuruma: Yapay taş malzemelerin su emmesinin başlıca nedeni (üretim hataları dikkate alınmazsa), üretim suyunun açığa çıkan kısmının bünyeden atılırken oluşturduğu kılcal yapıdır. Üretim sırasında karışıma verilen suyun çok az miktarı



kimyasal bağlantı ile bünyede kalmakta, serbest kalan diğer kısım buharlaşma yolu ile bünyeden atılmaktadır. Atılan su miktarı gaz betonda %50 civarında olmaktadır. Bu arada diğer bir önemli noktada suyun bünyeden atılış hızıdır. Kuruma ne kadar hızlı olursa bünyede oluşan kılcal yapı da o kadar gelişmiş olacaktır. Gazbeton üretiminde açığa çıkan suyun az olması, üretim sırasında kurutma ve pişirme işlemi olmayıp, tersine yoğun su buharında kimyasal sertleştirme işlemi olmasından ileri gelmektedir. Bunun sonucunda zayıf bir kılcal yapı oluşmakta ve suyun hareketi gözenekler dolayısı ile engellenmektedir.

Suya doymuş duruma gelen yapı malzemesinin içerdiği nem miktarı, o malzemenin su kapasitesini belirlemektedir. Yapı malzemelerinde su kapasitesi toplam boşluk miktarına yaklaştığı oranda, malzeme donmaya karşı hassas duruma gelmekte, ayrıca nemin etkisi ile ısı yalıtım özelliğini kaybetmektedir. Gazbeton malzemenin, suya doygun durumda iken dahi bünyesindeki boşlukların yaklaşık %60'ının kuru kaldığı belirtilmektedir.

f) Buhar geçirgenlik: Gazbeton, gözenekli yapısı sayesinde düşük bir buhar geçirgenlik direncine( $\mu=5-7$ ) sahiptir<sup>(52,53)</sup>.

g) Kimyasal Etkenlere Karşı Direnç: Gaz beton, silika hidratlardan oluşan alkali bir yapıya sahiptir. pH değeri 9.5-11.0 arasında değişmektedir. Bu bakımdan asidik ortamlardan olumsuz yönde etkilenmektedir. Sülfirik asit, hidroklorik asit, asetik asit malzeme yapısını, kloridler, sülfatlar ve nitratlar ise donatıyı hasara uğratırlar. Bu bakımdan da gazbeton,deniz suyuna karşı korunmalıdır. Ortamda yoğun ve devamlı kimyasal agresif maddelerin bulunması halinde gazbeton malzeme, bu maddelere dayanıklı yüzey kaplamaları ile korunmalıdır.

h) Suda Çözünme: Gazbetonun mukavemetini sağlayan hidrosilikatlar suda çözülmezler. Ancak üretime giren diğer maddeler (kum,kireç,çimento veya su) suda çözünebilen tuzlar içerirlerse, ortam şartlarına göre bu tuzlar malzeme yüzeyinde kristalleşerek çiçeklenme yapabilirler. Şunu da belirtmek gerekir ki çiçeklenme öncelikle eriyik tuz miktarına bağlı olmayıp gazbeton bünyesindeki kılcal su hareketinin hızına ve yüzeydeki kuruma hızına bağlıdır<sup>(53)</sup>.

#### **2.5.1.6.1. Kiremit Tozu ve ASR Üzerine Etkisi**

İçinde kil minerali ihtiva eden, belli ölçüde suyla karıştırıldığında plastik çamur haline gelen, şekillenme özelliğine sahip ve 900–1000°C’de pişirildiğinde, çatlamadan sertleşebilen bütün topraklar, tuğla-kiremit hammaddesi olarak kabul edilir<sup>(54)</sup>.

Kil minerallerinin en önemli özelliği belirli oranda su ile (% 25–35) karıştırıldığında plastik hale gelmesi, şekillenebilmesi ve kurutulup pişirildikten sonra dayanıklı bir malzeme yeteneğinin olmasıdır. Kil içinde bulunan silisli, demirli ve alkali bileşikler plastikliğini ve ateşe dayanma yeteneğini azaltırlar<sup>(54,55)</sup>.

Tuğla-kiremit imaline elverişli topraklar kumlu kil olarak da adlandırılabilir. Seramik killerinden farkları bunların demir, silis ve karbonat bakımından daha zengin olmalarıdır. Bu topraklar kil, çorak, mil, silt, lem, balçık gibi isimler altında da tanınırlar. Bu toprakların içinde kuvars, montmorillonit, kaolinit, kalsit, limonit, hidromika, serisit, illit ve klorit gibi mineraller bulunur. Toprakların bir kısmı ise amorf yapıdaki killerden oluşur. Tuğla-Kiremit hammaddesi olarak kullanılacak olan killerde istenen birtakım fiziksel ve mekanik özellikler vardır. Bunlar plastiklik suyu % 25–35, pişme rengi koyu kırmızı (% 5 Fe), tane boyut dağılımı +3 mm’de max.

%1, gerekli su miktarı % 20–30, sertlik 3–5 (Mohs), küçülme hacim kaybı % 6 (rötre), çekme dayanımı, sıcakta ergime ve su emme % 10–15 olarak verilebilir. Tuğla-kiremit üretiminde kullanılan killerin kimyasal yapıları da önemlidir. Kimyasal yapıda ortalama % 42–64 SiO<sub>2</sub>, % 15–20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve % 8 CaO bulunmalıdır. Kalsiyum Karbonat (CaCO<sub>3</sub>) miktarı % 35'in altında % 25-30'den fazla olmamalıdır<sup>(54,56)</sup>.

#### **2.5.1.6. Doğal Puzolanların ASR'ye Etkisi**

Kil, şeyl ve zeolit gibi betonda kullanılan doğal malzemeleri “doğal puzolanlar” olarak gruplandırmak mümkündür<sup>(4)</sup>. Puzolanların, genişleme yaratan reaksiyonlara karşı etkili oldukları bilinmektedir. Mindess ve Young, kireç-puzolan reaksiyonunda boşluk çözeltisi pH'nın düşmesi sonucu puzolanların etkili olduğunu öne sürmüşlerdir. Ayrıca, reaktif puzolanların alkalilerle reaksiyona girerek alkalileri tükettiklerini ve genişleme yaratmayan ürünler oluşturduklarını belirtmişlerdir. Davis vd., puzolanların ASR'yi azaltmadaki etkisinin puzolanın reaktivitesine bağlı olduğunu ve bu etkinin çimento yerine kullanılacak miktarı belirlediğini söylemektedir<sup>(57)</sup>.

Mielenz vd.<sup>(58)</sup>, pişirilmiş kil ve şeyilerin ASR üzerindeki etkilerini incelemiştir. Kaolinit kili için yapılan deney sonuçlarına göre, 587-810 °C arası pişirme en iyi sonucu vermektedir. 800°C'de pişirilen sodyum montmorillonit tipi killerin ASR'yi azaltmada etkili sonuç vermediği belirlenmiştir. Aynı şekilde, 1032 °C'de pişirilen illit ve vermiküllit tipi killeri de ASR üzerinde etkili olamamıştır<sup>(4,57)</sup>.

### 2.5.2. Kimyasal Katkıların ASR'ye Etkisi

Belli kimyasal katkıları potansiyel olarak;

- a. Silisin çözünmesini durdurabilir veya azaltabilirler,
- b. Alkali-silis jelinin oluşmasına engel olur ve karakterini değiştirebilirler,
- c. Jelin genleşmesini azaltabilirler<sup>(59)</sup>.

Mc Joy ve Caldwell<sup>(60)</sup>, çeşitli kimyasal katkıların ASR üzerindeki etkilerini inceleyen araştırmacıdır. Araştırmalarında, pireks camı ve eşdeğer Na<sub>2</sub>O içeriği %0.57 ve %1.15 olan tip çimento kullanarak ASTM C227<sup>(33)</sup> harç çubuğu metodunu uygulamışlardır. Çizelge 2.5'te yüksek alkalin çimento ve farklı oranlarda kimyasal katkıları kullanımı ile 8 haftalık periyotta kontrol numunesine kıyasla enleşmelerdeki azalmalar verilmiştir. Bazı bakır ve amonyum tuzlarının etkili olduğu, ancak en iyi sonucu lityum tuzlarının verdiği görülmektedir<sup>(4)</sup>.

**Çizelge 2.5.** Bazı Kimyasal Katkıların ASR Üzerindeki Etkileri<sup>(60)</sup>

Kullanılan Kimyasal Katkı	Li <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O (kütlece%)	8 Haftalık genleşmedeki azalma (%)
Alüminyum tuzu	0,25	75
Ba karbonat	1,00	3
Ca karbonat	10,0	-6
Cr fosfat	1,00	9
Cu klorit	1,00	29
Cu sülfat	1,00	46
Li klorit	0,50	34
Li klorit	1,00	88
Li karbonat	0,50	62
Li karbonat	1,00	91
Li florit	0,50	82
Li nitrat	1,00	20
Li sülfat	1,00	48
Na klorit	1,00	15
Na karbonat	1,00	44
NH <sub>4</sub> karbonat	1,00	38
Zn karbonat	0,5	34

### 2.5.2.1. Lityum Katkıları

Lityum tuzları, agreganın reaktifliğine karşı beton karışımına eklenebilir. McCoy ve Caldwell<sup>(60)</sup>, lityum tuzu içeren bazı kimyasal tuzların ASR'ye maruz olan harçlardaki genleşmeleri azalttığını ilk kez kanıtlamışlardır. Bu günlerde ASR'yi kontrol için lityum içerikli katkıları piyasada bulunmaktadır. Bugüne kadar, lityum katkıları üzerinde yapılan çalışmalar, mekanizmanın tam olarak anlaşılmasını sağlamamış veya bu tip katkıların ASR genleşmesini azaltma mekanizması açıklanamamıştır. Sonuçta, uygun lityum bileşiğinin ve dozunun belirlenmesi ile lityum katkılarının ne kadar süre genleşmeleri önlemeye çalışacağı tahmin edilmesi oldukça zordur<sup>(8,61,62)</sup>. Lityum tuzları ile yapılan bir çok çalışmanın bir arada irdelendiği X. Feng vd.<sup>(63)</sup>'ye ait çalışmada da bu zorluktan bahsedilmiş, literatürde yer alan Li tuzu ile ASR arasındaki ilişkiyi anlatmak için yapılan tüm çalışmalar bir arada özetlenmiştir.

Lityum bazlı katkılardaki  $Li^+$ 'nin  $K^+$  veya  $Na^+$  ile yaptığı kısmi değişimin ASR jeli içerisinde meydana geldiği düşünülmüştür. Jelin parçası olan  $Li^+$  iyonlarının olağan alkali iyonlarına ( $K^+$ ,  $Na^+$ ) oranı, çözeltideki iyonlarla bağlantılı bir fonksiyondur. Böylelikle, lityum davranışının etkililiği temelinde, lityumun çözeltideki diğer katyonlara olan yüksek oranını korumasına bağlıdır. ASR'den kaynaklı genleşmelerin tamamen durdurulabilmesi için 0.6-0.9 aralığını geçen  $Li/(K+Na)$  mol oranına ihtiyaç olduğu bulunmuştur. Ayrıca uygun olmayan dozlardaki LiOH kullanımının, ASR bulunan kontrol harçlarında daha fazla ASR genleşmesi oluşturduğunu gösteren bazı deney sonuçları da bulunmaktadır. Bu noktada, iyon konsantrasyonunun LiOH davranışının bir sonucu olarak zaten yüksek

olan OH<sup>-</sup> iyon konsantrasyonunu oldukça arttıran bir etkisi vardır. Bu yüzden, daha az lityum bileşiminin kullanıldığı durumlarda daha dikkatli olunmalıdır<sup>(64)</sup>.

20 °C’de Alkali-Silika Reaksiyonunu yavaşlatmada LiOH kullanımına dayalı bir laboratuvar çalışmasının sonucunda şu bulgulara erişilmiştir; 20 °C’de agrega olarak zeolit- perlit içeren harçların alkali agrega reaksiyonu genişmesi uzun süreli bir şekil yerine LiOH ile yavaşlatılabilir, geriletebilir ve Li/(Na+K) molar oranının artmasıyla bu etkide artar. Ancak ne var ki bu olumlu etkinin yanında harç dayanımı LiOH eklenmesiyle azalacaktır. LiOH miktarı artırıldıkça dayanıklılık da azalacaktır. LiOH ilave edildiğinde çimentonun priz başı ve sonu süreleri kısalacaktır. LiOH ilavesi ile Li/(Na+K) daki molar artışla beraber bu süre daha da kısalacaktır. 20 °C’de ki değişim sadece harç çubuklarındaki genişleme değildir. Reaksiyon oluşumu ve reaksiyon ürünlerinin bileşimi SEM ve EDS ile araştırılmıştır. Hem Li<sup>+</sup> hem de K<sup>+</sup> (Na<sup>+</sup>) ilave edildiğinde; normal alkali-silika reaksiyonunun jel formunda olmayan bir oluşum ve reaksiyona giren Li<sup>+</sup> bulunmuştur. Sonuç olarak şunu söylemek mümkündür ki; ASR genişmesi olayının oluşumdaki ana sebepleri lityum bileşenlerinin ilavesiyle engellenebilir<sup>(64)</sup>.

Kimyasalların genişleme reaksiyonları üzerindeki etkileri ile ilgili gerçek çalışmalar yapılmasına rağmen, bunların, betonun uzun süreli ve diğer özellikleri üzerindeki etkilerine nispeten daha az dikkat yöneltilmiştir. Bu günlerde hala, lityum bileşimlerinin yalnızca ASR’yi önlemedeki yararlılığının açıklanması konusunda değil, ayrıca benzer bileşimlerin çimentonun priz süresi ve dayanımı gibi diğer özellikleri üzerindeki etkilerinin açıklanması konusunda da eksiklikler bulunmaktadır<sup>(64)</sup>.

## 2.6. ASR' yi Kontrol Altına Alma Yolları

ASR'yi önlemenin en iyi yolu beton dökülmeden önce gerekli önlemleri almaktır. Bunun için bağlayıcı malzemelerin ve agregaların dikkatlice analiz edilmesi ve malzeme seçiminin verimliliğini ve ekonomikliğini optimize eden bir kontrol stratejisinin seçilmesi gerekir.

ASR'yi önlemek için malzeme seçiminde aşağıdaki konulara dikkat edilmelidir;

- Aktif silis içermeyen agregaların tercih edilmesi,
- Betonun alkali içeriğini sınırlamak,
- Ortamın nemini kontrol altında tutmak,
- Katkı maddesi kullanımı<sup>(4,65)</sup>.

ASR'nin beton üzerine etkisi ve oranı; agreganın minerolojik yapısı ve nemin varlığı-sıcaklık gibi iklim özellikleri ile geçirgenlik, beton boşlukları ve sertleşmiş betondaki kalsiyum hidroksitin sıklığı gibi özelliklere bağlıdır. Bu faktörlerin kontrol edilmesi ASR'nin beton üzerinde yarattığı yok edici etkiyi minimize etmenin anahtarıdır. Agregalar ASTM C 295<sup>(30)</sup> ile incelenmeli ve partiküller incelenirken aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir.

- Kaya karakteristiği belirlenmelidir.
- Kalsit ve dolomit oranları, kaya özelliklerine göre yayılma artışının eğilimi
- Asit-çözünmez çözeltinin davranış ve miktarı
- Matrikslerin tane-boyutları
- Dolomit kristallerinin alışkanlık ve tane-boyut oranlarına bakılmalıdır<sup>(66)</sup>.

## **2.7. Çalışmanın Amacı**

Bu çalışmanın amacı; betonunun kompleks bir problemi olan Alkali-Silika Reaksiyonunu, reaksiyon oluşumuna neden olan etkenleri, tanımlanmasını ve reaksiyonu önlemeye yönelik tedbirlerin nasıl alınabileceğini anlatmaktır. Bu amaçla farklı puzolanik katkıları ve lityum tuzları ile deneysel çalışmalar yapılarak etkileri gözlenmiş ve kıyaslanarak anlatılmıştır.



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Deneysel çalışma için öncelikle agrega, çimento ve gerekli katkıları temin edilmiştir. Agregaların fiziksel ve mineralojik – petrografik özellikleri belirlenmiş ve hızlandırılmış harç çubuğu yönteminde belirtilen şekilde yıkanıp kurutulmuş ve deneysel çalışmaya hazır hale getirilmiştir. Çimentonun ve katkıların fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Katkı olarak kullanılacak olan beş adet kimyasal, dört adet puzolanik ve çimento mukayesesi ile ilgili çalışmada kullanılacak olan borlu çimento temin edilmiştir.

CEM I 42,5 R Portland çimentosu ile numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin mukayesesi için öncelikle potansiyeli olduğu saptanan agregalarla ASTM C1260<sup>(41)</sup> ile kontrol numuneleri dökülmüştür.

Kontrol numunesindeki genişleme değerlerini zararsız bölge sınırlarına indirmek ya da var olduğu durumdan daha az genişleme durumuna çekebilmek amacıyla çeşitli katkılarla, hızlandırılmış harç çubuğu metodunu kullanarak çalışmalar yapılmıştır. Çalışmaların sonuç ve yorumları tablolar, grafikler ve SEM görüntüleri halinde verilmiştir.

#### 3.1. Materyal

Malzeme olarak agrega, CEM I 42,5 R çimentosu, su ve çeşitli puzolanik ve kimyasal katkıları kullanılmıştır.

### 3.1.1. Agreganın Özellikleri

Çalışmada Şavşat/Artvin/Türkiye'den alınan kırmataş agrega kullanılmıştır. Kullanılan agregaya ait analiz MTA da yaptırılmıştır<sup>(67)</sup>. Kırmataş agregaya ait petrografik özellikler aşağıdadır;

**Çizelge 3.1.** Agreganın Kimyasal Özellikleri

Bileşim	İçerik
Na <sub>2</sub> O	% 2,5
MgO	% 1,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% 13,2
SiO <sub>2</sub>	% 68,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	% 0,1
K <sub>2</sub> O	% 1,9
CaO	% 3,9
TiO <sub>2</sub>	% 0,5
MnO	% 0,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% 4,2

Kullanılan agreganın kimyasal analiz sonucundan da görüldüğü üzere (Bkz. Çizelge 3.1) SiO<sub>2</sub> oranı oldukça yüksek bir agregadır. İçeriğinde %2.5 değerinde Na<sub>2</sub>O bulundurmaktadır. Bunlar ASR üzerine olumsuz etki eden özelliklerdir. Ayrıca örnekte yapılan modal mineralojik analiz sonucu Çizelge 3.2'deki gibi bulunmuştur. Buradan agregadaki opal miktarı ve diğer mineralojik veriler görülebilmektedir.

**Çizelge 3.2.** Agreganın Mineralojik Özellikleri

Kuvars	Plajiyoklaz	Ortoklaz	Epidot	Klorit	Kalsit	Amfibol	Opal
%15	%65	%5	%5	%4	%3	%1	min%2

### 3.1.2. Çimentonun Özellikleri

Deneysel çalışmada piyasadan temin edilen CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılacak olan çimentonun kimyasal analizleri yaptırılmış ve daha sonra Çizelge 3.3'deki değerler kullanılarak eşdeğer alkali miktarları belirlenmiştir. Bu çimentonun ASR' ye neden olabilecek Na<sub>2</sub>O ve K<sub>2</sub>O değerleri elde edildikten sonra eşdeğer alkali miktarı denilen (Na<sub>2</sub>O+ 0.658 K<sub>2</sub>O) değeri hesaplanmıştır. ASR' nin oluşabilmesi için bu değer % 0.6' dan büyük olması gerekmektedir.

**Çizelge 3.3.** CEM I 42,5 R Çimentosunun Kimyasal Bileşimi ve Fiziksel Özellikleri

SiO <sub>2</sub> (%)	26,18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	8,01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,24
CaO (%)	51,12
MgO (%)	1,78
Na <sub>2</sub> O (%)	0,58
K <sub>2</sub> O (%)	0,87
SO <sub>3</sub> (%)	2,61
Özgül Ağırlık	2,87
Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	3480

### 3.1.3. Suyun Kimyasal Analizi

Deneysel çalışmada Kırıkkale’de kullanılan Kızılırmak suyu kullanılmıştır. Suyun kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.4’de gösterilmiştir. Kullanılan suların fazla miktarda NaOH ve KOH içermemesi gerekmektedir. Eğer bu bileşikler suların içerisinde fazla miktarlarda bulunursa ASR’ nin oluşumuna katkıda bulunurlar ve bu da betonu olumsuz şekilde etkiler. Ayrıca yapılan analizde sülfat miktarının oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Kullanılabilir şebeke suyunun sülfat üst sınırı Türkiye için 250 olarak belirlenmiştir. Burada ise değer 350’dir. Kullanılan yüksek sülfat değerinin betonda yaratabileceği sülfat etkisi göz ardı edilmemelidir.

**Çizelge 3.4.** Suyun Kimyasal Analizi

Parametre	Birim	Ölçülen Değer
pH	-	7,83
Na	mg/l	200
Sülfat	mg/l	350,00
Bulanıklık	NTU	1,9

### 3.1.4. UK’nın Kimyasal Analiz Sonuçları

Bu çalışmada F Sınıfı, Çatalağzı Uçucu Külü kullanılmıştır. Çatalağzı Uçucu Külüne ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.5’de verilmiştir.

**Çizelge 3.5.** Uçucu Kül Kimyasal Kompozisyonlar ve Fiziksel Özellikleri

Oksit (%)	UK
SiO <sub>2</sub>	56,80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,80

### Çizelge 3.5. (devam ediyor)

CaO	1,40
MgO	2,40
SO <sub>3</sub>	2,90
K.K.	0,80
Bilinmeyen	1.33
Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2,06
Özgül Yüzey ( cm <sup>2</sup> /g)	3800

### 3.1.5. Silis Dumanının Kimyasal Analizi

Çalışmada Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi Tesisleri'nde tutulan silis dumanı kullanılmıştır. Bu silis dumanına ait kimyasal özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir. % 82,61 olan silis miktarı ve 20 000 cm<sup>2</sup>/g değerindeki özgül yüzey alanı bizim için ön plana çıkan değerler olmuştur. Silis dumanı çok yüksek özgül yüzey alanı sayesinde arayüzleri iyice doldurabilmektedir.

### Çizelge 3.6. Silis Dumanının Kimyasal Analiz Sonuçları

Oksit (%)	Silis Dumanı
SiO <sub>2</sub>	82,61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.71
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.92
CaO	1.29
MgO	4.75
Na <sub>2</sub> O	0.40
K <sub>2</sub> O	3.41
SO <sub>3</sub>	0.38
Özgül Ağırlık	2.37
Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	20.000

### 3.1.6. Gazbeton Tozunun Kimyasal Analizi

Çalışmada kullanılan gazbeton tozuna ait analiz sonuçları Çizelge 3.7'de verilmiştir.

**Çizelge 3.7.** Gazbeton Tozunun Kimyasal Analiz Sonuçları

SiO <sub>2</sub>	48,94
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,41
CaO	26,97
MgO	1,18
SO <sub>3</sub>	5
K <sub>2</sub> O	1,14
Na <sub>2</sub> O	0,33
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03
Cl	0,025
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0
Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	5850

### 3.1.7. Kiremit Tozunun Kimyasal Analizi

Çalışmada Eskişehir Kılıçoğlu kiremiti öğütülerek kullanılmıştır. Kiremit tozuna ait analiz sonuçları aşağıdaki Çizelge 3.8 verilmiştir.

**Çizelge 3.8.** Kiremit Tozunun Kimyasal Analiz Sonuçları

SiO <sub>2</sub>	53,96
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,78
CaO	8,68
MgO	4,49

**Çizelge 3.8. (devam ediyor)**

SO <sub>3</sub>	0,13
K <sub>2</sub> O	1,24
Na <sub>2</sub> O	2,19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,26
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,16
Cl	0,01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04
Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	5200

### 3.1.8. Lityum Katkıları

Çalışmada piyasadan temin edilen 5 farklı lityum katkısı kullanılmıştır. Bunlar Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(Lityum Sülfat), LiNO<sub>3</sub> (Lityum Nitrat), Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (Lityum Karbonat), LiBr (Lityum Bromür) ve LiF(Lityum Florür) dir.

**Çizelge 3.9. Lityum Sülfatın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri<sup>(68)</sup>**

pH Değeri	~4,5-6 (50 g/l, H <sub>2</sub> O, 20 °C)	Yoğunluk	2.05 g/cm <sup>3</sup> (20 °C)
Ergime sıcaklığı	120 °C	Molar Kütle	127,96 g/mol
Suda çözünürlük		340 g/l (20 °C)	

**Çizelge 3.10. Lityum Sülfatın Kimyasal Kompozisyonu<sup>(68)</sup>**

Safılık (Metallik)	≥ 99,99 %
Al (Alüminyum)	≤ 0,050 ppm miktarda
Ba (Baryum)	≤ 5 ppm miktarda
Ca (Kalsiyum)	≤ 10 ppm miktarda
Cd (Kadminyum)	≤ 0,010 ppm miktarda
Co (Kobalt)	≤ 0,010 ppm miktarda

**Çizelge 3.10. (devam ediyor)**

Cs (Sezyum)	$\leq 10$ ppm miktarda
Cu (Bakır)	$\leq 0,010$ ppm miktarda
Fe (Demir)	$\leq 0,050$ ppm miktarda
K (Potasyum)	$\leq 10$ ppm miktarda
Mg (Magnezyum)	$\leq 1,0$ ppm miktarda
Mn (Manganez)	$\leq 0,050$ ppm miktarda
Na (Sodyum)	$\leq 5$ ppm miktarda
Ni (Nikel)	$\leq 0,010$ ppm miktarda
Pb (Kurşun)	$\leq 0,050$ ppm miktarda
Rb (Rubidyum)	$\leq 10$ ppm miktarda
Sr (Stronzyum)	$\leq 5$ ppm miktarda
Tl (Talyum)	$\leq 0,01$ ppm miktarda
Zn (Çinko)	$\leq 0,010$ ppm miktarda

**Çizelge 3.11. Lityum Nitratın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri<sup>(68)</sup>**

pH Değeri	~7-9 (50 g/l, H <sub>2</sub> O, 20 °C)	Yoğunluk	2.36 g/cm <sup>3</sup> (20 °C)
Ergime sıcaklığı	255 °C	Molar Kütle	68,95 g/mol
Suda çözünürlük		522 g/l (20 °C)	

**Çizelge 3.12. Lityum Nitratın Kimyasal Kompozisyonu<sup>(68)</sup>**

Safılık (metallik)	$\geq 99.995$ %
Klorür(Cl)	$\leq 10$ %
Sülfat (SO <sub>4</sub> )	$\leq 10$ %
Ağır metaller (Pb)	$\leq 0.005$ %
Kalsiyum(Ca)	$\leq 1$ %
Demir(Fe)	$\leq 0.05$ %
Potasyum(K)	$\leq 5$ %
Sodyum(Na)	$\leq 5$ %



**Çizelge 3.13.** Lityum Karbonatın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri<sup>(68)</sup>

pH Değeri	~10-11(5 g/l, H <sub>2</sub> O, 20 °C)	Yoğunluk	2.1 g/cm <sup>3</sup> (20 °C)
Ergime sıcaklığı	720 °C	Molar Kütle	73.89 g/mol
Suda çözünürlük	13 g/l (20 °C)	Buhar Basıncı	20 °C

**Çizelge 3.14.** Lityum Karbonatın Kimyasal Kompozisyonu<sup>(68)</sup>

Ürün (asidimetrik)	≥98.5 %
Klorür(Cl)	≤0.05 %
Sülfat (SO <sub>4</sub> )	≤0.4 %
Ağır metaller (Pb)	≤0.005 %
Kalsiyum(Ca)	≤0.05 %
Demir(Fe)	≤0.003 %
Potasyum(K)	≤0.02 %
Sodyum(Na)	≤0.3 %

**Çizelge 3.15.** Lityum Florürün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri<sup>(68)</sup>

Kaynama Noktası	1676 °C	Yoğunluk	2.64 g/cm <sup>3</sup> (20 °C)
Ergime sıcaklığı	870 °C	Molar Kütle	25,94 g/mol
Suda çözünürlük	1,3 g/l (20 °C)		

**Çizelge 3.16.** Lityum Bromür Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri<sup>(68)</sup>

pH değeri	7 (100 g/l, H <sub>2</sub> O)	Yoğunluk	3,46 g/cm <sup>3</sup> (25 °C)
Ergime sıcaklığı	≈ 547 °C	Molar Kütle	86,85 g/mol
Suda çözünürlük	Serbest Çözünür (20 °C)	Kaynama Noktası	≈ 1265 °C

Öncelikle, %0 katkı oranıyla (katkısız) referans numuneleri hazırlanmıştır. Katkılı olan gruplara lityum katkıları %0.5, %1, %1.5, %2, %2.5 ve %3; puzolanik katkıları ise %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında çimentoya ikame edilerek kullanılmıştır. Çalışmada her bir katkı miktarı için, farklı katkı türlerinden üçer adet numune dökülmüştür. 90'ı lityum katkılı, 72'si puzolanik katkılı ve 3'ü katkısız olmak üzere toplam 165 numunenin verileri ile çalışma hazırlanmıştır.

### 3.2. Yöntem

Deneysel çalışmada ASTM C1260<sup>(41)</sup> metodu kullanılmıştır. Bu metot, kür şartlarını ağırlaştırarak reaksiyonu hızlandırmakta ve agregaların reaktivitesinin 16 gün içinde tespitine olanak vermektedir.

Diğer metotlarda olduğu gibi bu metot için de uygulamaya geçmeden önce agregaların petrografik analizinin ve limitlerin üzerinde genleşme görüldüğü takdirde önceki metotlarda belirtildiği şekilde reaktivitenin ASR sebebiyle oluşup oluşmadığının incelenmesi önerilmektedir<sup>(4)</sup>.

Standartta belirtilen gradasyondaki agrega, kütlece çimentonun 2.25 katı kadar kullanılarak su/çimento oranı 0.47 olan harç karışımı hazırlanır. 25x25x285 mm boyutlarındaki kalıplara dökülen harç numuneleri 24 saat sonra kalıplardan alınarak ilk boyları ölçülür. Kalıplarda numune üzerine yapışarak suyun difüzyonunu önleyebilen standart kalıp yağları yerine teflon sprej gibi artık bırakmayan tipte kayganlaştırıcı materyal kullanılır. Kalıp sökümünden itibaren 1 gün süreyle 80 C derece suda bekletilerek boy ölçümleri alınan numuneler, takip eden 14 gün boyunca 80 C derece 1N NaOH çözeltisinde bekletilir ve periyodik ölçümleri alınır. Standart,

çimentonun alkali miktarı hakkında bir değer vermemektedir, bunun nedeni kür koşulları nedeniyle numunelerin boşluk çözeltisi alkalinitesinin artmasıdır<sup>(41)</sup>.

Toplam 16 gün süren deney sonucunda, genleşme yüzdeleri şöyle değerlendirilir; 16 gün sonundaki genleşmeler,

- % 0.10 değerinin altıdaysa agregalar zararsız davranış göstermektedir. 16 gün sonundaki genleşmeler,
- % 0.20 değerinin üstündeyse agregalar potansiyel olarak zararlı genleşme gösterirler.
- 16 gün sonundaki genleşmeler, % 0.10 ile % 0.20 değerinin arasındaysa agregalar, şantiye koşulları altında hem zararlı hem de zararsız davranış gösterebilirler. Karar vermeden önce ek deneylerle genleşme sebebinin araştırılması ve ölçümlerin 28 güne kadar uzatılması önerilmektedir<sup>(40)</sup>.

Bu metot, kür koşulları oldukça ağır olduğundan tatmin edici şantiye performansı gösteren bazı agregaların da reaktif olarak tanımlanabilmesi gibi bir probleme yol açabilmektedir. Yine de deney süresinin kısa olması ve pratikliği sebebiyle araştırmalarda daha çok tercih edilmektedir<sup>(4)</sup>.

Deneysel çalışmada izlenen aşamalar sırasıyla şöyledir;

1) Öncelikle 25x25x285 mm boyutlarındaki harç çubuklarının hazırlanması amacıyla agrega için gerekli granülometri belirlenmelidir. Deneysel çalışmada standarda uygun olarak hazırlayacağımız numunelere ilişkin değerler Çizelge 3.17- Çizelge 3.26'da verilmiştir.

**Çizelge 3.17.** Agreganın Granülometrisi

Elek Boyutları	İki Elek Arasında Kalan Malzeme, %
4,75 mm (No:4) – 2,36 mm (No: 8)	% 10
2,36 mm (No:8) – 1,18 mm (No: 16)	% 25
1,18 mm (No: 16) – 600 µm (No: 30)	% 25
600 µm (No: 30) – 300 µm (No: 50)	% 25
300 µm (No: 50) – 150 µm (No: 100)	% 15

**Çizelge 3.18.** Lityum Sülfat İçeren Numuneler İçin Karşım Miktarları

Malzemeler (gr)	Kontrol	% 0,5 Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	% 1 Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	% 1,5 Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	% 2 Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	% 2,5 Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	% 3 Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Çimento	440	437.8	435.6	433.4	431.2	429	426.8
Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0	2.2	4.4	6.6	8.8	11	13.2
Agrega	990	990	990	990	990	990	990
Su	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8

**Çizelge 3.19.** Lityum Nitrat İçeren Numuneler İçin Karşım Miktarları

Malzemeler (gr)	Kontrol	% 0,5 LiNO <sub>3</sub>	% 1 LiNO <sub>3</sub>	% 1,5 LiNO <sub>3</sub>	% 2 LiNO <sub>3</sub>	% 2,5 LiNO <sub>3</sub>	% 3 LiNO <sub>3</sub>
Çimento	440	437.8	435.6	433.4	431.2	429	426.8
LiNO <sub>3</sub>	0	2.2	4.4	6.6	8.8	11	13.2
Agrega	990	990	990	990	990	990	990
Su	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8

**Çizelge 3.20.** Lityum Karbonat İçeren Numuneler İçin Karşım Miktarları

Malzemeler (gr)	Kontrol	% 0,5 Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	% 1 Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	% 1,5 Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	% 2 Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	% 2,5 Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	% 3 Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
Çimento	440	437.8	435.6	433.4	431.2	429	426.8
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0	2.2	4.4	6.6	8.8	11	13.2
Agrega	990	990	990	990	990	990	990
Su	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8

**Çizelge 3.21.** Lityum Florit İçeren Numuneler İçin Karşım Miktarları

Malzemeler (gr)	Kontrol	% 0,5 LiF	% 1 LiF	%1,5 LiF	% 2 LiF	% 2,5 LiF	% 3 LiF
Çimento	440	437.8	435.6	433.4	431.2	429	426.8
LiF	0	2.2	4.4	6.6	8.8	11	13.2
Agrega	990	990	990	990	990	990	990
Su	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8

**Çizelge 3.22.** Lityum Bromür İçeren Numuneler İçin Karşım Miktarları

Malzemeler (gr)	Kontrol	% 0,5 LiBr	% 1 LiBr	%1,5 LiBr	% 2 LiBr	% 2,5 LiBr	% 3 LiBr
Çimento	440	437.8	435.6	433.4	431.2	429	426.8
LiBr	0	2.2	4.4	6.6	8.8	11	13.2
Agrega	990	990	990	990	990	990	990
Su	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8

**Çizelge 3.23.** Uçucu Kül İçeren Numuneler İçin Karşım Miktarları

Malzemeler (gr)	Kontrol	% 5 UK	% 10 UK	% 15 UK	% 20 UK	% 25 UK	% 30 UK
Çimento	440	418	396	374	352	330	308
UK	0	22	44	66	88	110	132
Agrega	990	990	990	990	990	990	990
Su	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8

**Çizelge 3.24.** Silis Dumanı İçeren Numuneler İçin Karşım Miktarları

Malzemeler (gr)	Kontrol	% 5 SD	% 10 SD	% 15 SD	% 20 SD	% 25 SD	% 30 SD
Çimento	440	418	396	374	352	330	308
SD	0	22	44	66	88	110	132
Agrega	990	990	990	990	990	990	990
Su	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8

**Çizelge 3.25.** Gazbeton Tozu İçeren Numuneler İçin Karşım Miktarları

Malzemeler (gr)	Kontrol	% 5 GT	% 10 GT	% 15 GT	% 20 GT	% 25 GT	% 30 GT
Çimento	440	418	396	374	352	330	308
GT	0	22	44	66	88	110	132
Agrega	990	990	990	990	990	990	990
Su	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8

**Çizelge 3.26.** Kiremit Tozu İçeren Numuneler İçin Karşım Miktarları

Malzemeler (gr)	Kontrol	% 5 KT	% 10 KT	% 15 KT	% 20 KT	% 25 KT	% 30 KT
Çimento	440	418	396	374	352	330	308
KT	0	22	44	66	88	110	132
Agrega	990	990	990	990	990	990	990
Su	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8	206.8

2) Bahsedilen şekilde hazırlanan numuneler 24±2 saat bekletilmiştir. Kalıplardan çıkarılan numuneler ayırt edilmelerini sağlamak amacıyla isimlendirilmiş daha sonra da kompratör ile ilk boy ölçümleri yapılarak kayıt edilmiştir. (Li:ilk boy )

3) Boy ölçümü yapılan numuneler 24±2 saat boyunca 80 °C saf suda bekletilmiş ve ardından yine boy ölçümleri (sıfır okumaları) yapılmıştır (Lo).

4) Bu aşamanın gerçekleştirilebilmesi için numuneler 80°C’ de sudan çıkartılmadan önce NaOH çözeltisi hazırlanmıştır. Böylece işlem aksayışı olmayacaktır. Çözelti, toplam 1 lt çözeltide 40 gr NaOH çözülerek hazırlanmıştır.

5) Standartta verilen zaman sınırları içinde ölçümler tamamlanır tamamlanmaz numuneler 80°C sıcaklıkta NaOH çözeltisi içine 14 gün beklemek üzere yerleştirilmiştir. 14 gün içinde 2. ve 7. gün de olmak üzere 2 boy ölçümü yapılmıştır.

---

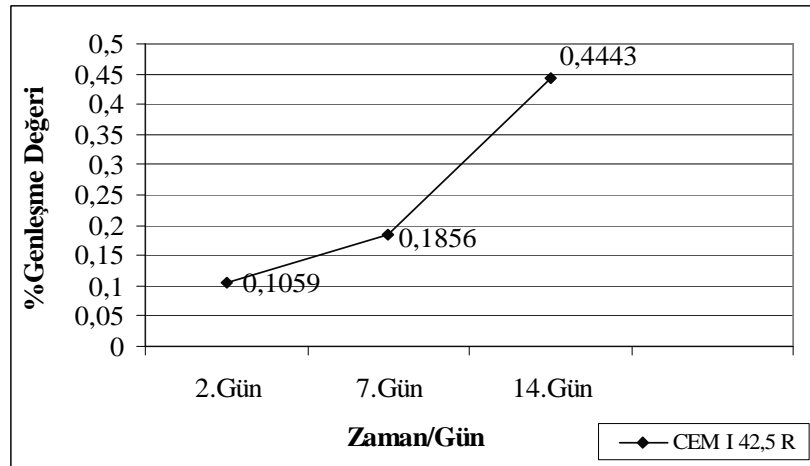
\* ASTM C 1260’a göre kullanılan gereçler ve çalışılan numunelere ait görünüşler Ek1’de verilmiştir.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

ASTM C 1260 uyarınca gerçekleştirilen deneysel çalışmanın tamamlanmasının ardından her grup numune için % genleşme değerleri bulunmuştur. Sonuçlar, ASTM C 1260'a<sup>(41)</sup> göre dökümden 16 gün sonraki genleşme miktarı değerlerine göre yorumlanmıştır.

##### 4.1. Katkısız Numuneler İle Yapılan Çalışmalar

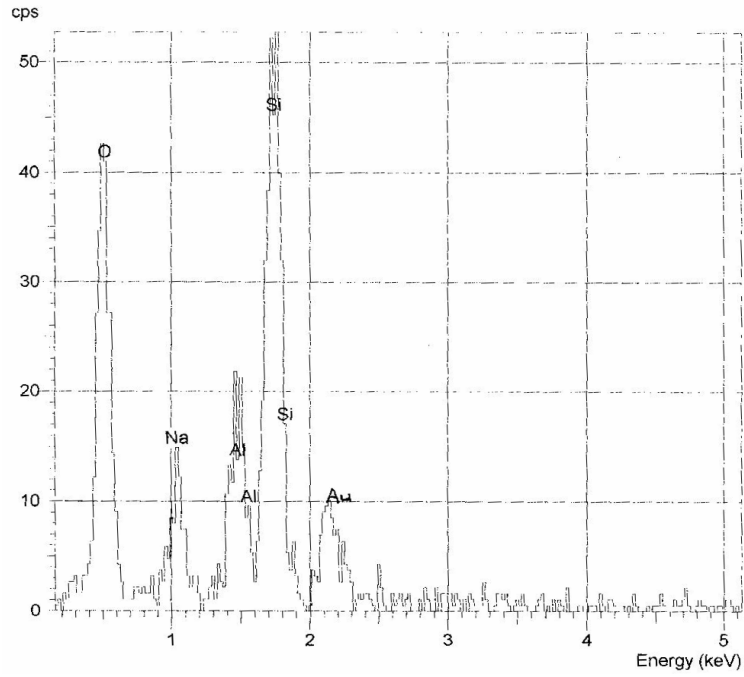
Kıyaslamalarda yararlanmak amacıyla öncelikli olarak Şekil 4.1'de kontrol numunesine ait değerler verilmiştir.



Şekil 4.1. Katkısız Numunelerin ASR'den Etkilenme Oranlarının Araştırılması

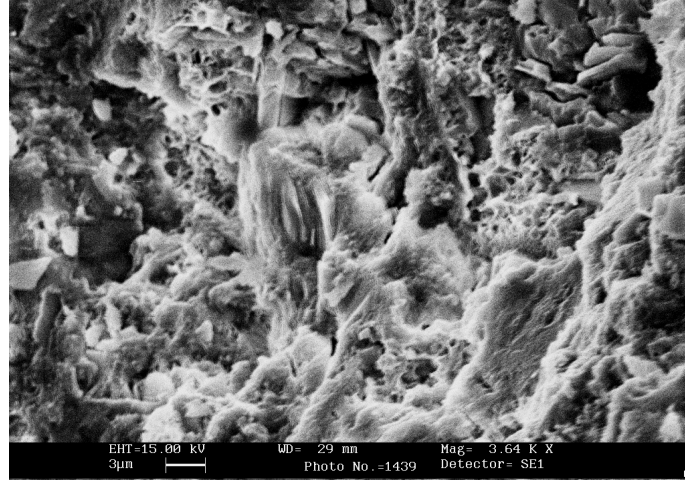
Kontrol numunelerinde oluşan genleşme miktarlarının Şekil 4.1'den görüldüğü üzere yüksek derecede reaktif bir agrega türü kullanılmaktadır. ASTM C

1260'a göre 16 gün sonunda numunelerde gerçekleşen ortalama % genleşme değeri 0,4443 olmuştur. Standartta agregalar için belirtilen; % 0.20 değerinin üstüdeyse agregalar potansiyel olarak zararlı genleşme gösterirler ifadesi nedeni ile kullanılan agregaları zararlı olarak nitelendirmek mümkündür. Agreganın beraberinde getirdiği yüksek oranda silisin bunda payı büyüktür. Şekil 4.2'de verilen, kontrol numunelerinden alınan örneklere yapılan X ışını yayılımı ile kırık yüzey incelemesinde (EDS), yüksek oranlarda görülen Si'de bunun bir göstergesidir.



Şekil 4.2. Katkısız Kontrol Numunesinde Çimento Pastasına Ait EDS Grafiği<sup>(69)</sup>





**Şekil 4.3.**Katkısız Kontrol Numunesinde Çimento Pastasına Ait SEM Görünümü<sup>(69)</sup>

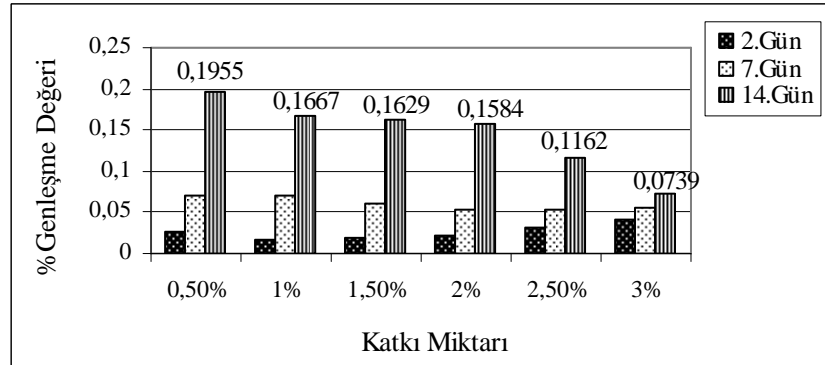
Şekil 4.3’de, CEM I 42,5 R ile hazırlanan harç çubuklarından alınan numunelerin SEM altında incelenirken çekilen mikro fotoğraflarına yer verilmiştir. Yüksek oranda silis içeriğinin yanısıra SEM görüntülerinde de yoğun kristal ve yapraklanmış yapıda ASR ürününe rastlanmıştır. Kontrol numunesi olarak dökülen katkısız CEM I 42,5 R’li numunelerin 16 gün sonunda ki genleşme değerlerinden ASR’nin gerçekleştiği görülmüştür.

#### **4.2. Farklı Lityum Tuzlarının ASR Üzerine Etkilerinin İncelenmesi**

ASR’nin gerçekleşmesini önleyici ya da geciktirici olarak lityum tuzlarının kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla deneysel çalışmada 5 farklı lityum katkısı kullanılmıştır. Bunlar lityum sülfat, lityum nitrat, lityum karbonat, lityum florür ve lityum bromürdür. Lityum tuzlarının çimentoya ikame edilmesi ile hazırlanan numunelere ait genleşme değerleri kendi aralarında ve kontrol numunesine ait değerlerle kıyaslanarak yorum yapılmıştır.

#### 4.2.1. Lityum Sülfat İkame Edilerek Hazırlanan Numunelerle Yapılan Çalışma

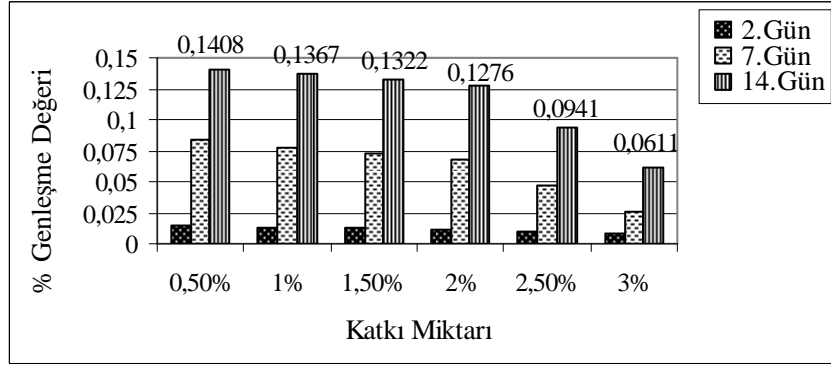
Çimentoya farklı oranlarda lityum sülfat ikame edilerek genleşme üzerine etkisi gözlenmiştir. Şekil 4.4'den görüleceği üzere lityum sülfat katkısının betonda kullanımını %0,5 gibi az bir değerken bile ASR açısından genleşme değerini kontrol numunesine oranla oldukça aşağı çekmiştir. % 0.2 sınır değerinin altına inilmesi açısından değerlendirilecek olursa; büyük bir yeterlilik sağlanamamakla beraber genleşme değerleri sınırın altına inmiştir. %1'den %2 katkı oranına kadar genleşme miktarları yaklaşık değerler sergilemiş potansiyel zararlı bölge hatları içinde kalmıştır. %2,5'den sonra genleşmenin düşüş hızı artmıştır. Genel olarak katkı miktarı artırıldıkça genleşme açısından iyileşme oranı da artış göstermektedir. %3 katkı ikamesi durumunda 16 gün sonunda % genleşme 0,0739 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.4. Lityum Sülfatın ASR Üzerine Etkisinin Araştırılması

#### 4.2.2. Lityum Nitrat İkame Edilerek Hazırlanan Numunelerle Yapılan Çalışma

Lityum nitrat ikame edilerek hazırlanan çalışmaya ait % genleşme sonuçları Şekil 4.5'de verilmiştir.



**Şekil 4.5.** Lityum Nitratın ASR Üzerine Etkisinin Araştırılması

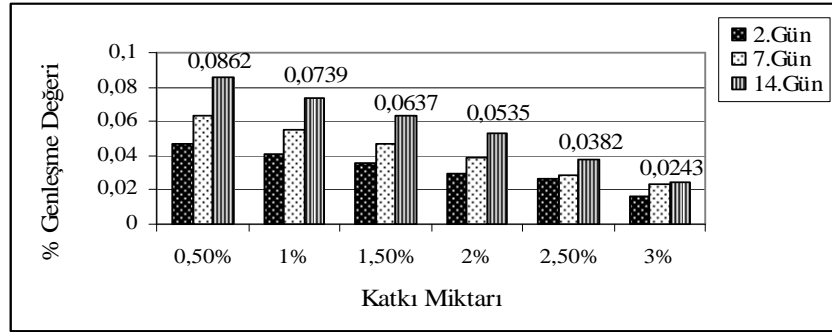
Lityum nitratın betona ilave edilmesi ile ASR çatlakları açısından oldukça olumlu sonuçlar alınmıştır. Şekil 4.5’den görüleceği üzere; deney çalışmasında kullanılan en az katkı miktarı dahi zararlı bölge sınırının altında kalınmasını sağlamıştır. %0,5-%2 katkı oranları arasında genleşmeye etki çok büyük olmazken, katkı oranı %2,5’e çıktıktan sonra genleşmedeki düşüş hızı artmıştır. Denenen en yüksek katkı miktarı olan %3 oranında ise %0,0611 gibi aşağı çekilmiş, zararlılık sınırının altında bir genleşme değeri elde edilmiştir.

#### **4.2.3. Lityum Karbonat İkame Edilerek Hazırlanan Numunelerle**

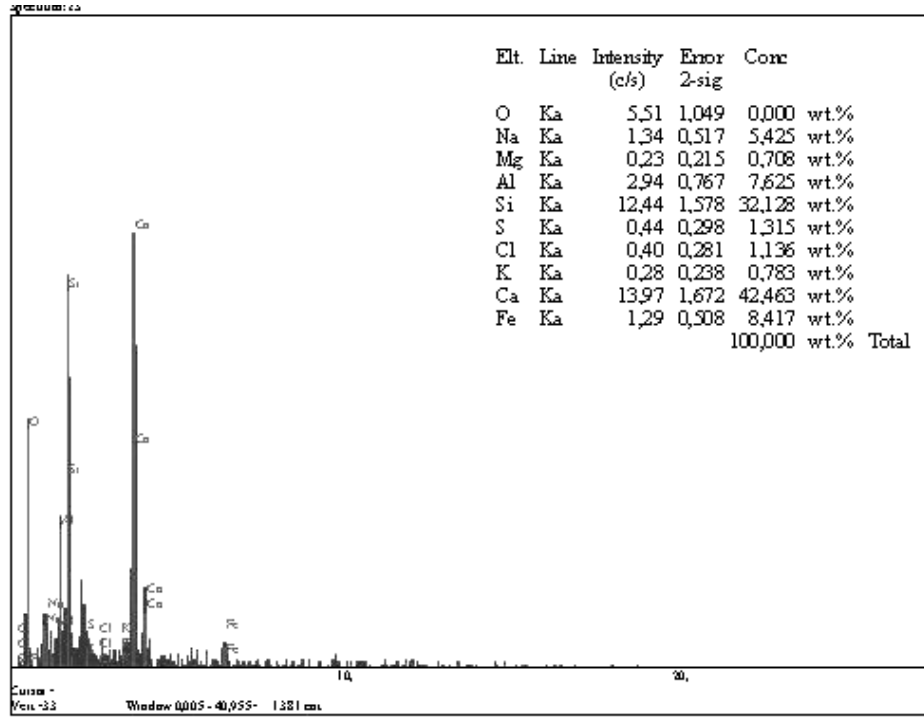
##### **Yapılan Çalışma**

Lityum karbonat ikame edilerek hazırlanan numunelere ait % genleşme sonuçları Şekil 4.6’da verilmiştir. İlk olarak denenen lityum sülfat ve lityum nitratta olduğu gibi lityum karbonatta ASR genleşmelerini azaltma açısından olumlu sonuçlar vermiştir. Şekil 4.6’dan görüldüğü üzere; %0,5’den %3’e kadar tüm ikame miktarlarında genleşmeler agrega açısından zararsız bölge hatları içinde kalmıştır. %3 katkı oranında genleşme değeri, 16 gün sonunda %0,0243 olarak hesaplanmıştır.

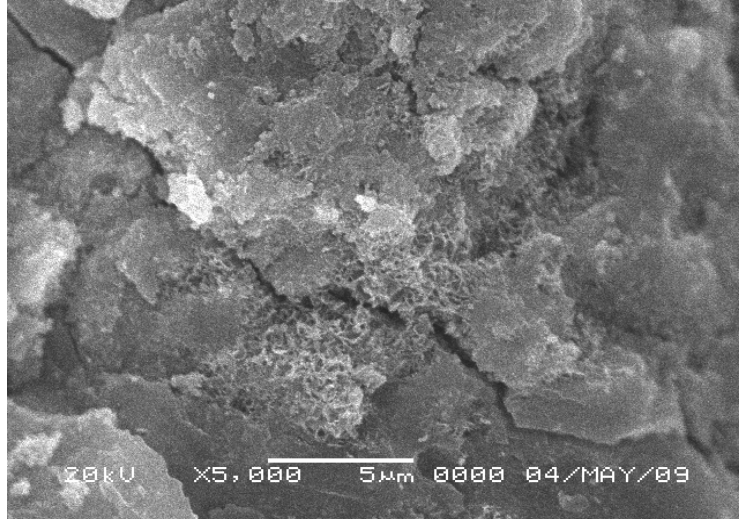
Şekil 4.7’de ise  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ’e ait EDS grafiği verilmiştir. Grafikten görüleceği üzere numune içeriğinde yüksek Ca ve Si’e rastlanmıştır. Bunlar alkali reaksiyonlarını tetikleyen unsurlardır. Ancak tüm lityum tuzları içerisinde en olumlu sonuç  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ’ün ikame edildiği harç çubuklarından alınmıştır.



Şekil 4.6. Lityum Karbonatın ASR Üzerine Etkisinin Araştırılması



Şekil 4.7. %3  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  Katkısı İkame Edilmiş Numunenin EDS Görüntüsü

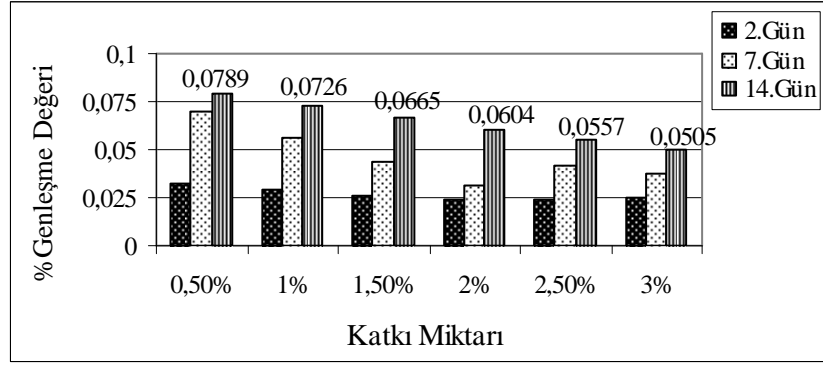


**Şekil 4.8.** %3  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  İkame Edilmiş Numunenin SEM Görüntüsü

$\text{Li}_2\text{CO}_3$  katkılı numuneye ait SEM görüntülerinde ASR ürünlerine pek rastlanmamakla beraber Şekil 4.8’de verilen 5000 kat büyütmede yapraklanmış ASR ürünlerine rastlanmıştır. Yapraklı ürünlerin arasında en büyüğü yaklaşık  $0.4 \mu\text{m}$  genişliğinde çatlaklara rastlanmıştır.

#### **4.2.4. Lityum Florür İkame Edilerek Hazırlanan Numunelerle Yapılan Çalışma**

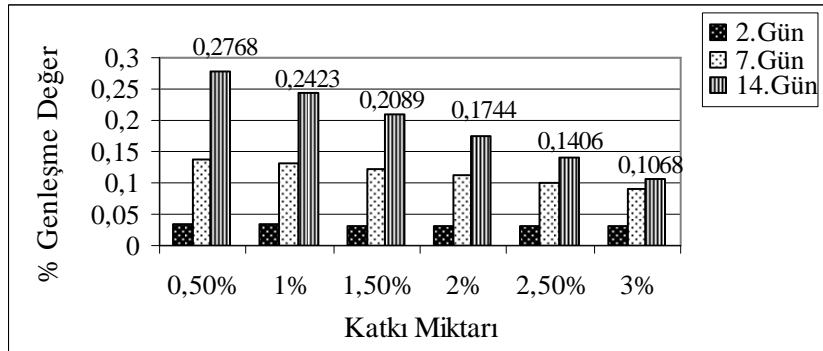
Lityum florür ikame edilerek hazırlanan numunelere ait % genleşme değerleri Şekil 4.9’da verilmiştir. Şekildeki sütun grafikten kolaylıkla görüleceği üzere tüm ikame miktarları için genleşme değerleri zararsız bölge içinde kalmış ve %3 ikame oranı için genleşme %0,0505 olmuştur.



**Şekil 4.9.** Lityum Florürün ASR Üzerine Etkisinin Araştırılması

#### 4.2.5. Lityum Bromür İkame Edilerek Hazırlanan Numunelerle Yapılan Çalışma

Lityum bromür ikame edilerek hazırlanan numunelere ait % genleşme değerler Şekil 4.10'da verilmiştir.

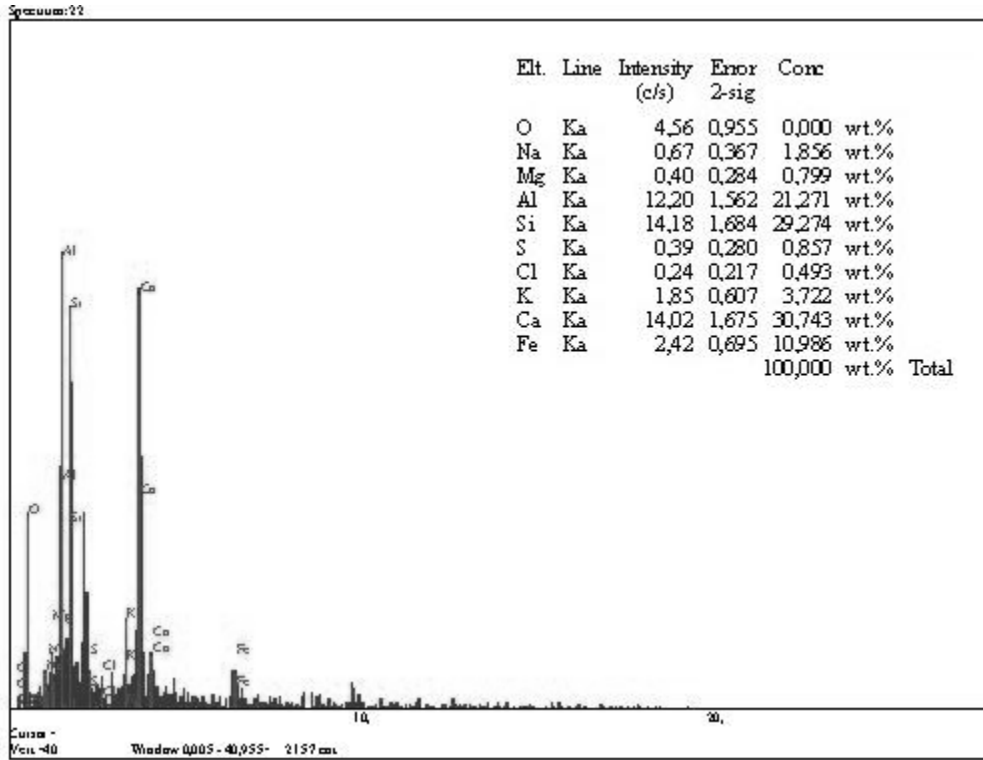


**Şekil 4.10.** Lityum Bromürün ASR Üzerine Etkisinin Araştırılması

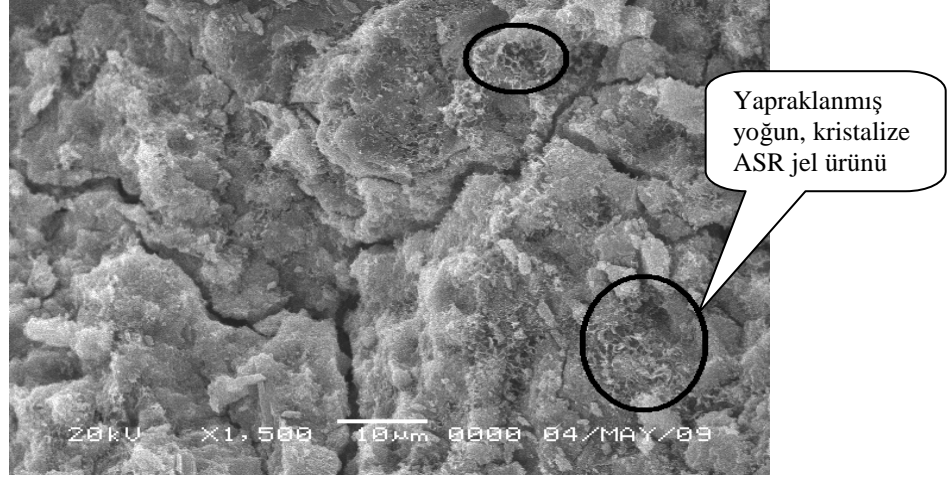
Lityum tuzlarının ikame edildiği numuneler içerisinde en kötü sonucu veren numuneler lityum bromür katkılı numuneler olmuştur. %0,5 katkı oranında zararlı

bölge sınırlarından çıkılmadığı gibi %3 katkı oranında da zararsız bölge sınırına, %0,10'un altına inilememiştir. Maksimum katkı oranında dahi % genişleme değeri %0,1068'de kalmıştır. (Bkz.Şekil 4.10)

LiBr içeren numunelerin SEM görüntüleri alındığında ASR ürünleri ve çatlaklı yapıya  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  içeren numunelerden daha sık rastlanmıştır. Şekil 4.11'de EDS grafik ve değerleri verilen harç çubuğunun incelemesinde yüksek oranla Al, Ca ve Si'ye rastlanmıştır. Şekil 4.12'de verilen SEM görüntüsünde de yaklaşık 0,25  $\mu\text{m}$ 'den 1 $\mu\text{m}$ 'ye kadar çatlaklara rastlanmıştır.

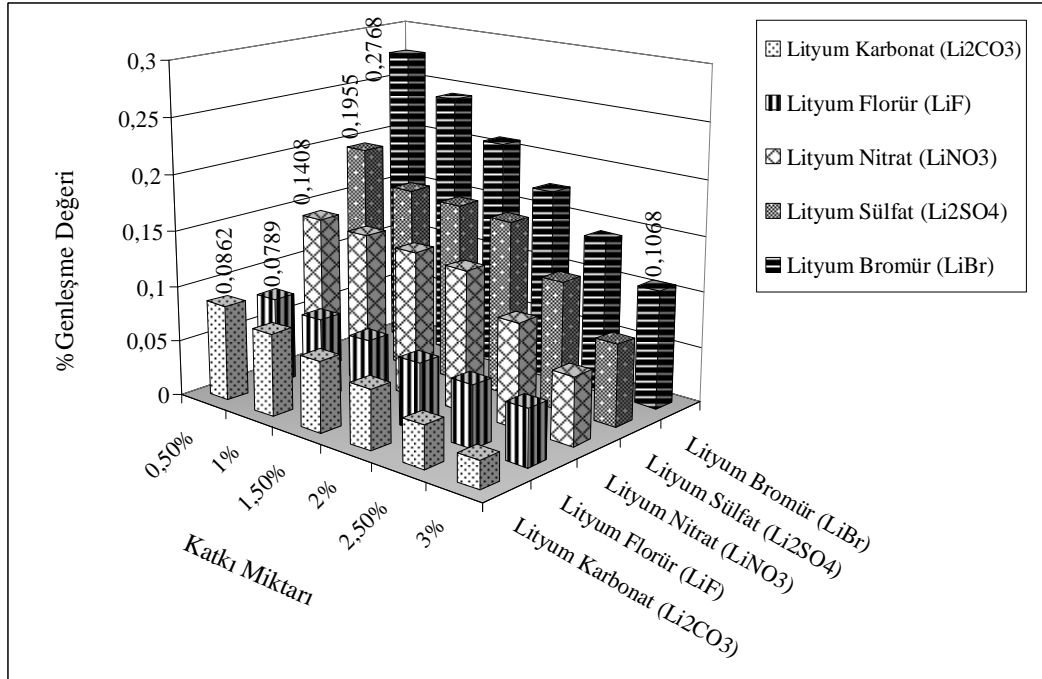


Şekil 4.11. %3 LiBr İkame Edilmiş Numunenin EDS Grafiği



**Şekil 4.12.** %3 LiBr İkame Edilmiş Numunenin SEM Görüntüsü

Şekil 4.13’de lityum tuzları ilave edilmiş olan harç çubuklarının ASR genleşmelerinin kıyaslaması verilmiştir. Bu şekle bakıldığında lityum katkıları içinde en olumlu sonucu  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ’ün, en olumsuzunu da LiBr’ün verdiği görülmektedir.

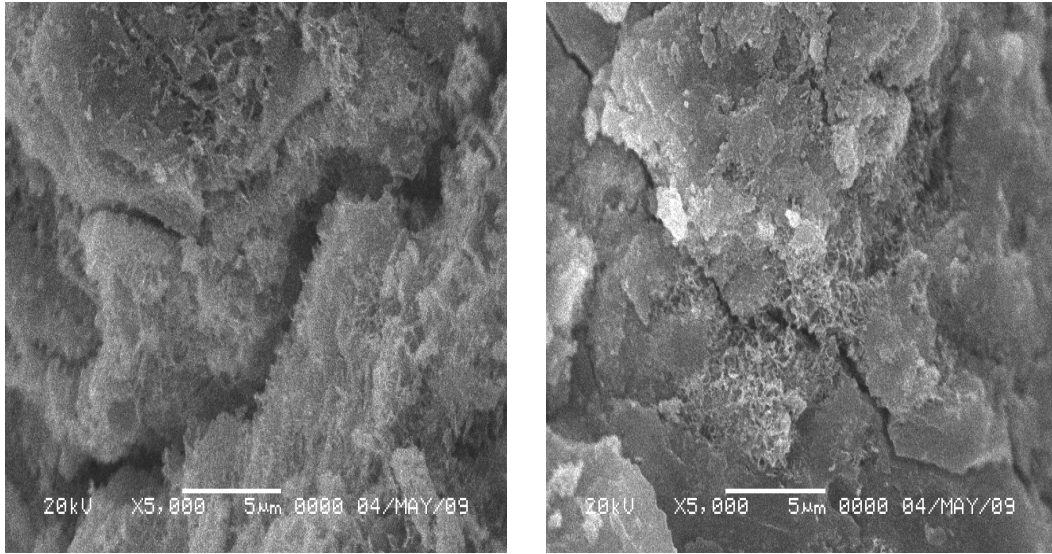


**Şekil 4.13.** Lityum Katkılarının ASR Açısından Kendi Aralarında Kıyaslanması



%0.5 ve %0.1 katkı oranında en olumlu sonuç LiF'den alınırken diğer tüm katkı oranlarında  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  olumlu sonuç vermiştir. Şekil 4.13'de görüldüğü gibi %3 oranında LiBr ikame edilen harç çubuklarında genleşme değeri %0.1068'de kalarak zararsızlık sınırı kabul edilen %0.1'in altına düşmemiştir.

Şekil 4.14'de her ikisinde 5000 kat büyütülerek alınmış, LiBr ve  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ 'a ait SEM görüntüleri mevcuttur. En iyi sonucu veren katkının ikame edildiği numune ile en kötü sonucun alındığı katkının ikame edildiği numuneleri kıyaslamak böylece mümkün olacaktır. Bu iki görüntüden belli olduğu üzere ASR ürünleri benzerlik göstermekle beraber LiBr ikame edilen numunede çatlak oluşumu daha fazla ve nettir.

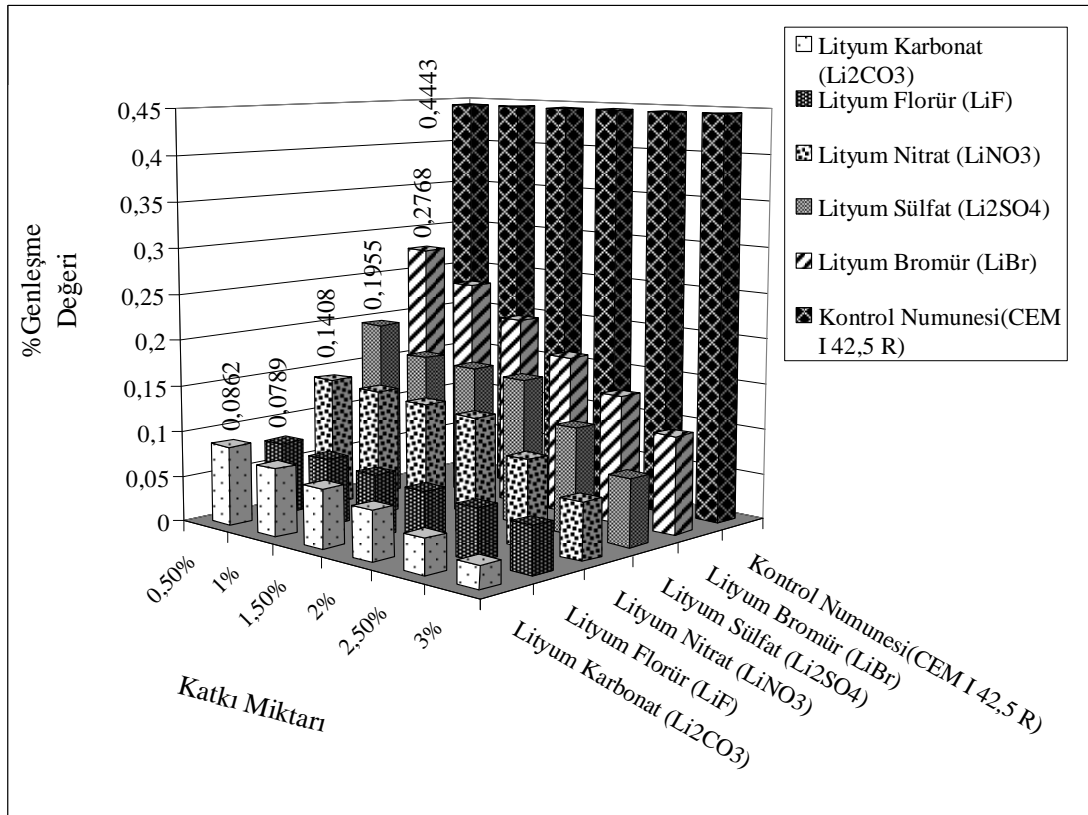


**LiBr**

**$\text{Li}_2\text{CO}_3$**

**Şekil 4.14.** LiBr ve  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  İkame Edilmiş Numunelerin ASR Açısından Kıyaslanması

Şekil 4.15’de ise lityum katkıları ile beraber kontrol numunesi de kıyaslamaya sokulmuş ve kendi içlerinde gösterdikleri değerlerin yanı sıra kontrol numunesine oranla ne mertebede genişleme gösterdikleri verilmiştir. Lityum katkıları kendi aralarında kıyaslandığında en kötü sonucu veren lityum bromür dahi kontrol numunesine göre genişleme değeri açısından olumlu sonuç vermiştir.



**Şekil 4.15.** Lityum Katkılarının ve Kontrol Numunelerinin ASR Açısından Kıyaslanması

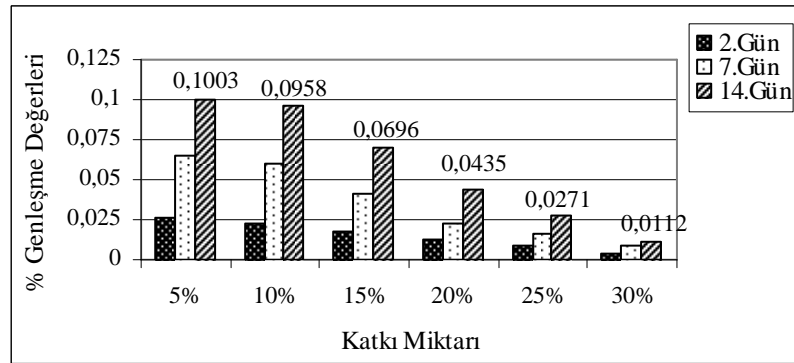
### 4.3. Farklı Puzolanik Katkıların ASR Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Puzolanların ASR’den doğan genişmeleri azaltmada olumlu değişiklikler yaptığı bilinmektedir. Bu çalışmada uçucu kül, silis dumanı, gazbeton tozu ve

kiremit tozu çimentoya ikame edilerek ASTM C1260 uyarınca harç çubukları hazırlanmış ve çalışma yürütülmüştür.

#### 4.3.1. Uçucu Kül İle Yapılan Çalışma

Çeşitli miktarlarda uçucu kül ikame edilerek yapılan çalışmalara ait sonuçlar Şekil 4.16'dan görülebilmektedir.

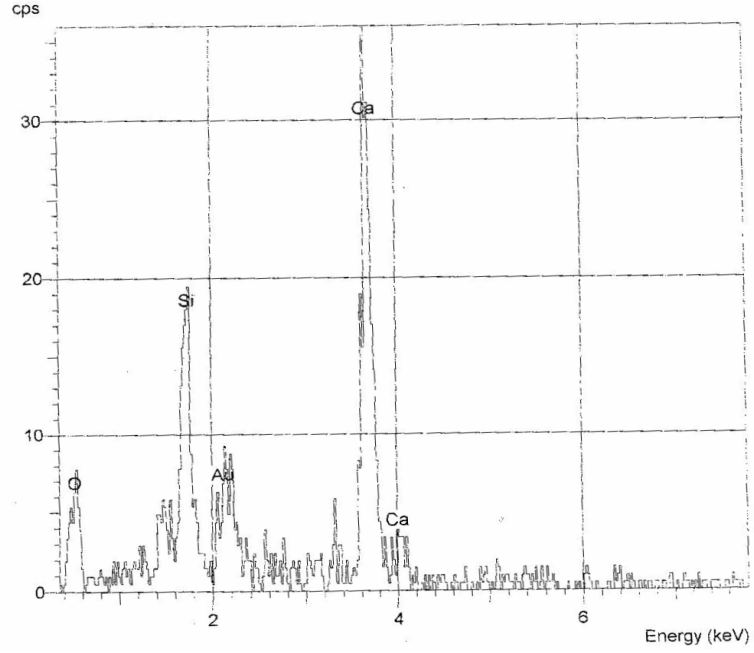


Şekil 4.16. Uçucu Külün ASR Üzerine Etkisinin Araştırılması

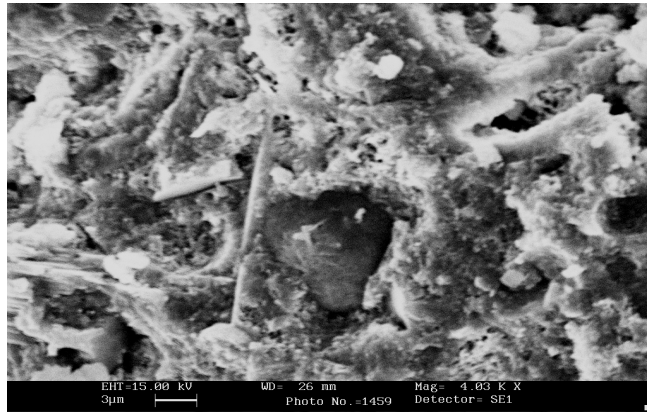
Deneysel çalışma sürecinde puzolanik katkıları ile yapılan çalışmalarda en olumlu sonuç uçucu kül ikame edilmiş olan numunelerden alınmıştır. Şekil 4.16'dan da görüldüğü üzere; %5'lik bir katkı oranında 16 gün sonunda %0,1003 değeri bulunurken %30 katkı oranında bu değer %0,0112'ye kadar düşmüştür.

Numuneye ait EDS grafiği Şekil 4.17'de verilmiştir. %30 uçucu kül ikame edilmiş olan numunelerden alınan EDS'lerde Ca ve Si oranı yüksek değerlerde

bulunmaktadır. Şekil 4.18'de de aynı numuneye ait agrega taneciğinin SEM görüntüsü bulunmaktadır.



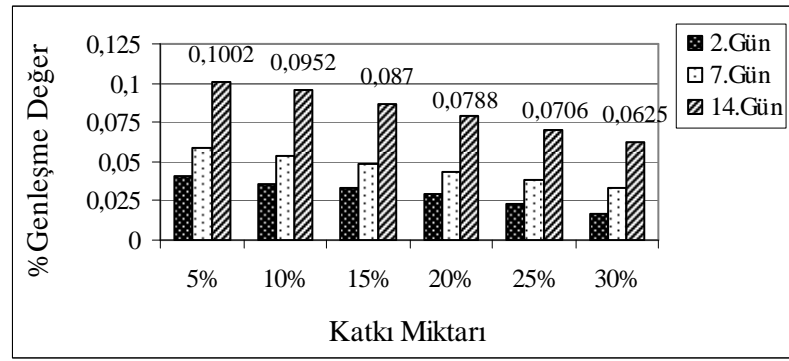
**Şekil 4.17.** %30 Uçucu Kül İkame Edilmiş Numunede Çimento Pastasına Ait EDS Görünümü<sup>(69)</sup>



**Şekil 4.18.** %30 Uçucu Kül İkameli Numunenin SEM Görüntüsü<sup>(69)</sup>

#### 4.3.2. Silis Dumanı İle Yapılan Çalışma

Harç çubuklarına silis dumanı ikame edilmesi sonucunda, % genleşme değerleri Şekil 4.19' da görüldüğü üzere %0,0625'e kadar düşmüştür. Bunda silis dumanının çok büyük özgül yüzeye sahip olmasının etkisinin olduğu düşünülmektedir.

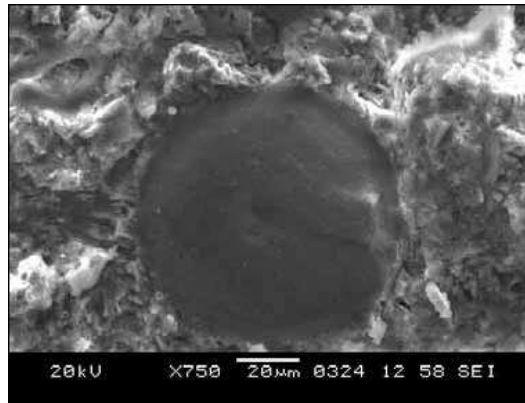
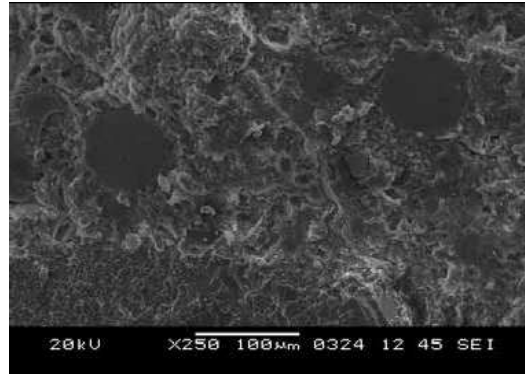


Şekil 4.19. Silis Dumanının ASR Üzerine Etkisinin Araştırılması

Silis dumanının ASR üzerine etkilerinin araştırıldığı diğer çalışmalarda da genleşmeyi durdurmada önemli bir katkı olduğu bulunmuştur (Tosun vd.<sup>(47)</sup>). Ancak SD yarattığı bu olumlu etkinin yanı sıra bazı olumsuz sonuçlarda doğurmaktadır. Tosun vd.<sup>(47)</sup>'nin yaptığı bir çalışmada silis dumanı içeren örnekler incelenmiş ve SEM görüntüleri çekilmiştir. SD içeren örneklerin kırık yüzey incelemelerinde tüm örneklerde iri silis dumanı tanelerinin 28. günde hala büyük ölçüde reaksiyona girmeden kaldığı gözlenmiştir. Bu taneler çimento hamuru fazında tüm yüzeyde dağılmış olarak görülmektedir (Şekil 4.20). Bu çalışmada da %30 SD içeren numuneler aynı oranda UK içeren numunelerle kıyaslanınca genleşme değeri yüksek

kalmaktadır. Buda kullanılan silis dumanının özellikleri ve topaklaşmış silis dumanı partiküllerinin sonradan tepkimeye girebilmesi özelliğini akla getirmektedir.

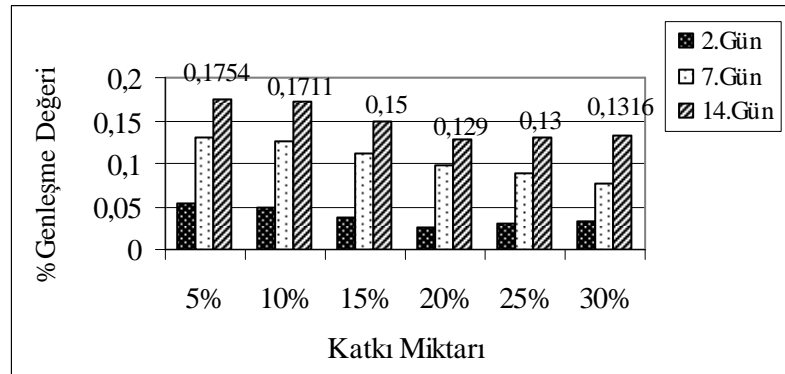
SD katkılı karışımların hem mekanik özelliklerdeki zayıflık hem de su emme değerlerinin yüksekliği reaksiyona girmeden hamur fazında kalan çok sayıdaki iri silis dumanı tanesine bağlanmıştır. Bu açıdan bakıldığında, kullanılan her silis dumanının fiziksel ve mekanik özellikleri geliştirmede yüksek performans sağlayamayacağı görülmüştür. Elde edilen bu sonuç, tane boyutunun, mineral katkıların etkinliklerinde ne derece önemli bir rol oynadığını göstermektedir<sup>(47)</sup>. Şekil 4.20'de, bahsedilen iri silis dumanı tanelerinin de görülebildiği 250 ve 750 kat büyütme ile alınmış SEM görüntüleri verilmistir.



**Şekil 4.20.** Silis Dumanının ASR Üzerine Etkisine İlişkin SEM Görüntüleri<sup>(47)</sup>

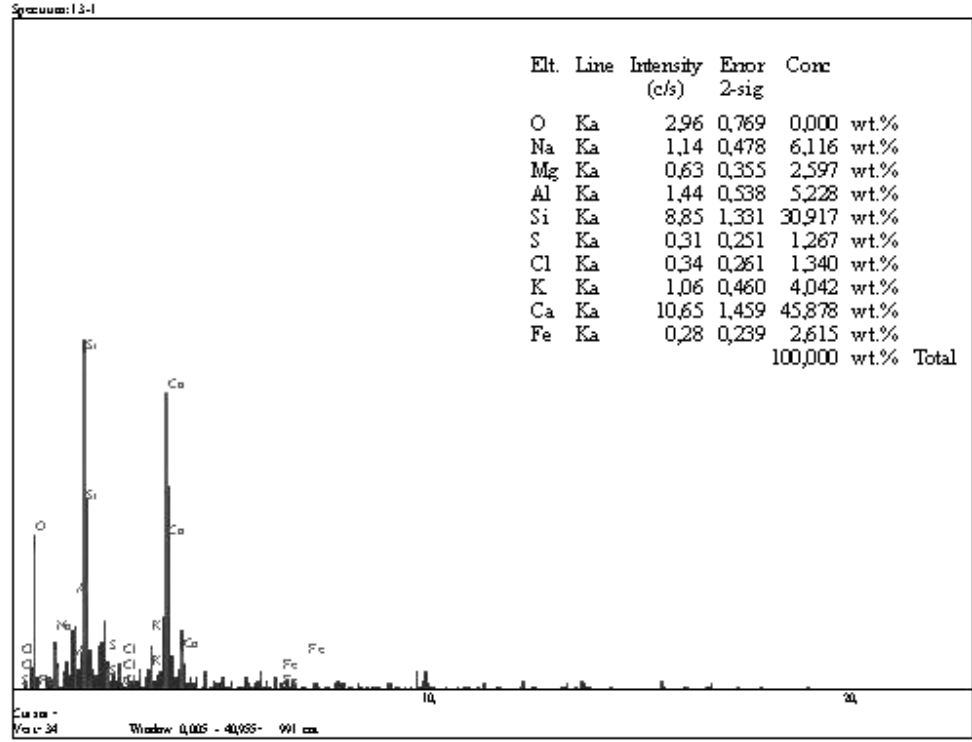
### 4.3.3. Gazbeton Tozu İle Yapılan Çalışma

Gazbeton tozu ikame edilerek hazırlanan numunelere ait % genleşme sonuçları Şekil 4.21’de verilmiştir. GT ikame edilen numunelerde genleşme azalması olmakla birlikte SD ve UK katılmış olan numunelerdeki kadar olumlu değişiklikler gözlenmemiştir. Bunda gerek GT’nin düşük özgül yüzeyi gerekse de morfolojik yapısının etken olduğu düşünülmektedir. %20’lik GT katılması durumu GT için en olumlu sonuç alınırken katkı oranı artırıldıkça genleşmede de artış başlamıştır. %30’luk katkı ikame edilmesi durumunda bile %0,10 değerinin altına inilememiş %0,1316’da kalmıştır.

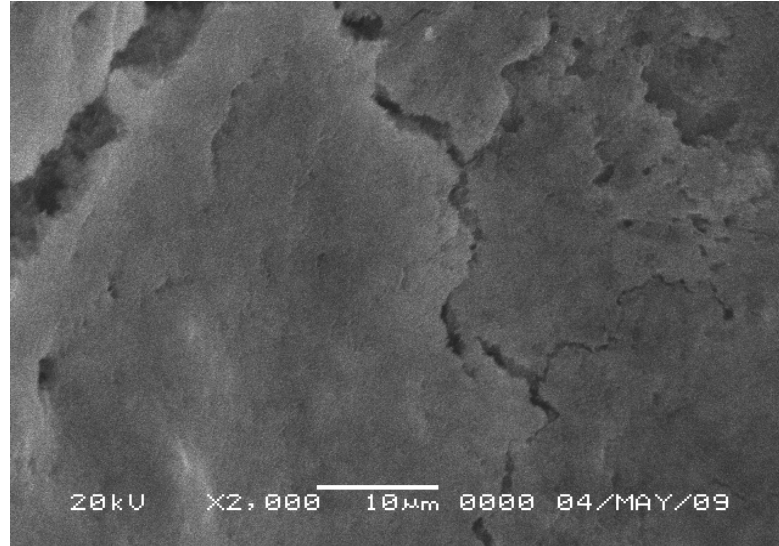


Şekil 4.21. Gazbeton Tozunun ASR Üzerine Etkisinin Araştırılması

Şekil 4.22’de verilen gazbeton tozu içeren numunelere ait EDS grafiklerinde de yüksek Ca ve Si’ye rastlanmıştır. Şekil 4.23’de verilen X2000 SEM görüntülerinde ise masif ASR ürünlerine ve yaklaşık 0,15µm’den 7µm’ye kadar ulaşan çatlaklara rastlanmıştır.

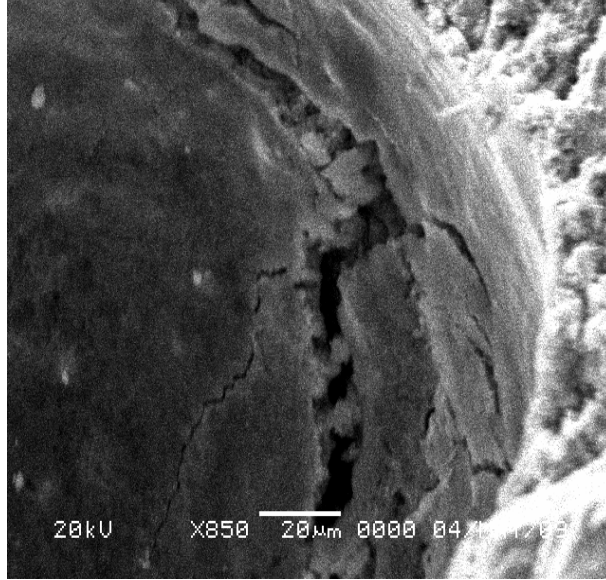
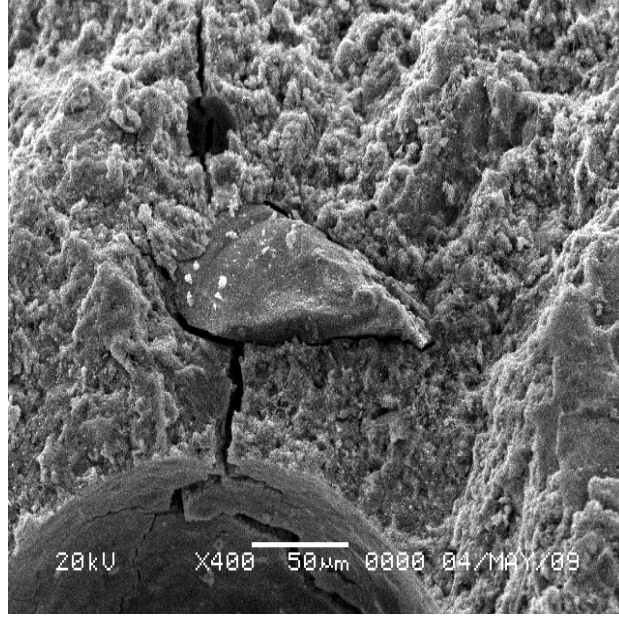


**Şekil 4.22.** %30 Gazbeton Tozu İkame Edilmiş Numunede Çimento Pastasına Ait EDS Görünümü



**Şekil 4.23.** %30 Gazbeton Tozu İkameli Numunenin SEM Görüntüsü



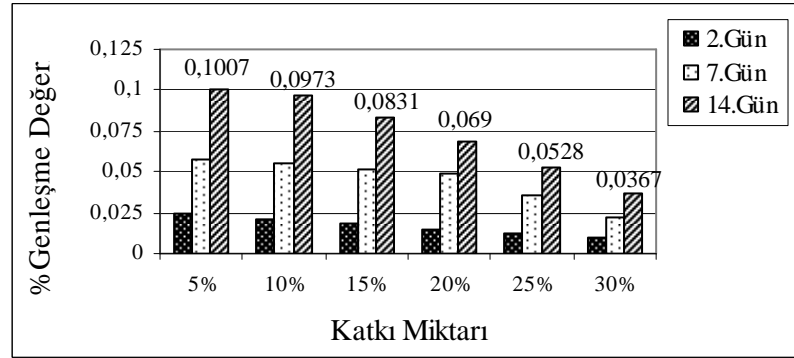


**Şekil 4.24.** %30 Gazbeton Tozu İkame Edilmiş Numunenin SEM Görüntüsü

%30 GT ikame edilen numuneden alınan çimento pastası ve agrega taneciğini gösteren SEM görüntüsü Şekil 4.24'de bulunmaktadır. Şekilden görüleceği üzere ASR etkisinin yarattığı enerji boşalmasına bağlı çatlaklar agrega taneciğine kadar nüfuz etmiştir.

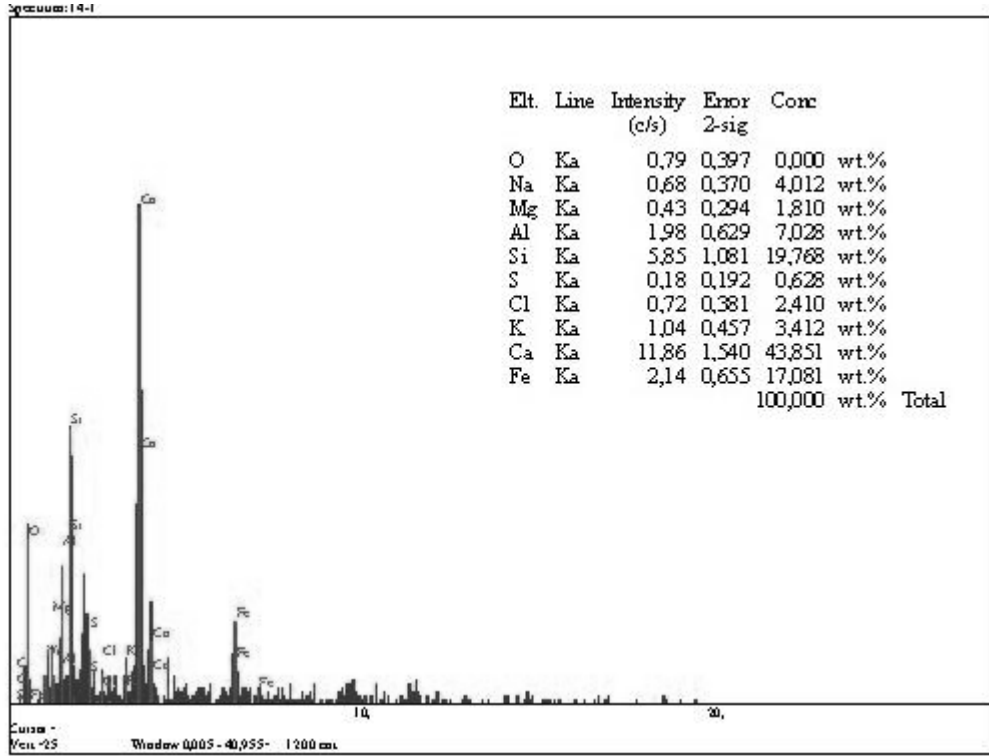
#### 4.3.4. Kiremit Tozu İle Yapılan Çalışma

Kiremit tozunun katılması ile beraber ASR'ye ilişkin bulunan % genleşme değerlerinde ciddi bir azalma görülmüştür. UK ile yapılan deneylerde 16 gün sonunda %0,0112, SD ikame edilmiş numunelerde %0,0625 ve KT ikame edilen numunelerde de değer %0,0367 olarak bulunmuştur. Şekil 4.25'den görüldüğü üzere kullanılan tüm katkı miktarlarında KT oldukça olumlu sonuç vermiştir. KT'nin genleşmeyi azaltıcı etkisinin kimyasal analiz sonuçlarından da görüleceği üzere (Bkz. Çizelge 3.8) SD'ye oranla düşük SiO<sub>2</sub> içeriği ve yüksek Ca değerine bağlı olduğu düşünülebilir.

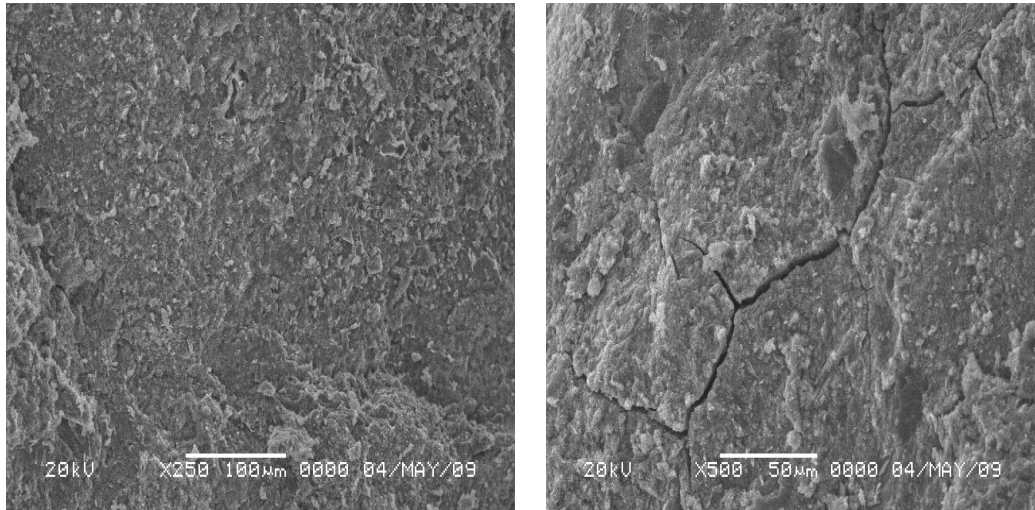


Şekil 4.25. Kiremit Tozunun ASR Üzerine Etkisinin Araştırılması

Şekil 4.26 ve 4.27'de kiremit tozu içeren numunenin EDS ve SEM verileri bulunmaktadır. Gaz beton EDS verisinde Si değeri 8.85 iken bu değer kiremit tozu analizinde 5.85'e düşmüştür (Bkz. Şekil 4.22).



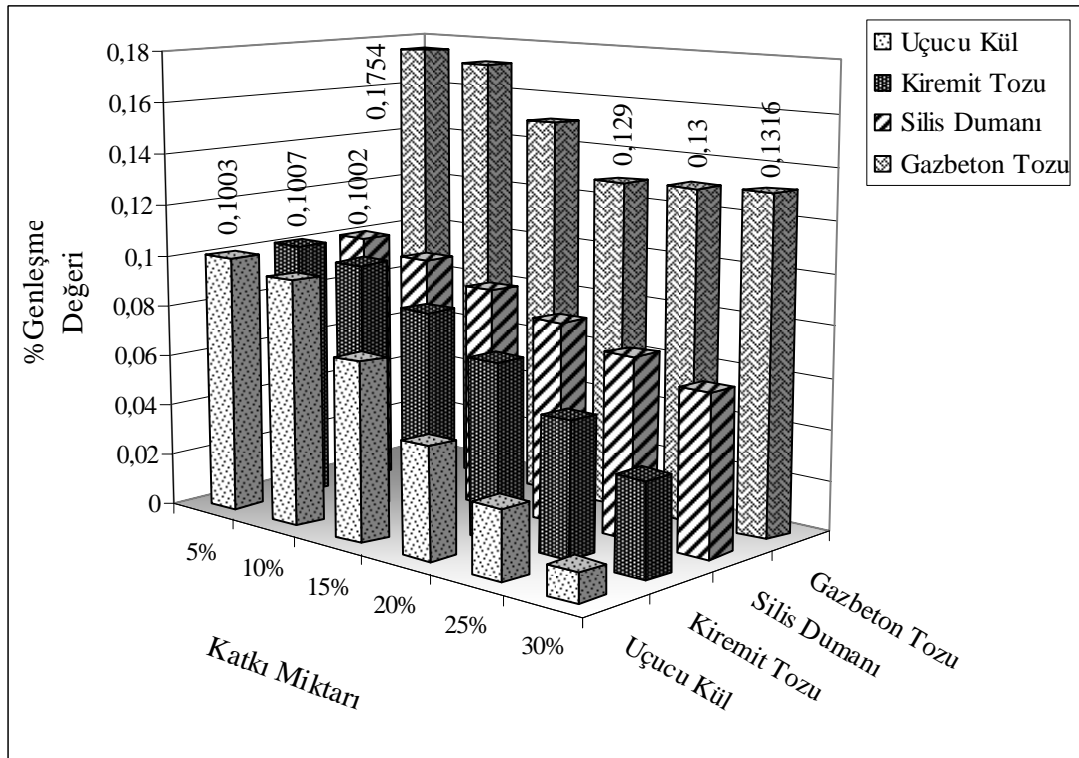
**Şekil 4.26.** %30 Kiremit Tozu İkame Edilmiş Numunede Çimento Pastasına Ait EDS Görünümü



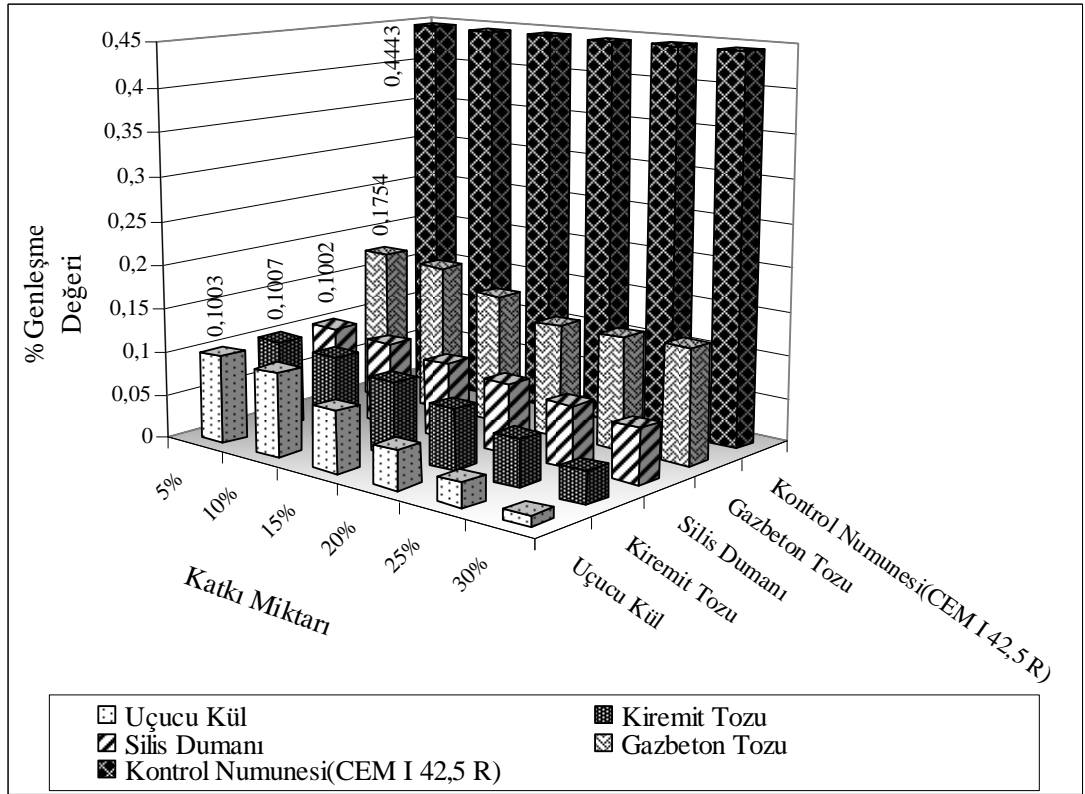
**Şekil 4.27.** %30 Kiremit Tozu İkameli Numunenin SEM Görüntüsü

Şekil 4.27'den görüleceği üzere KT ikame edilmiş olan numunelerin SEM görüntüleri alındığında, katkısız numunelere oranla yüzey pürüzlülüğünün oldukça azaldığı görülmüştür. İnce kılcal çatlaklara rastlanmış ve bunlardan bazılarının genişliği yaklaşık 3µm olarak ölçülmüştür.

Tüm puzolaniklerin bir arada kıyaslandığı Şekil 4.28'de en olumlu etkinin uçucu külden alındığı net bir şekilde görülmektedir. Her ne kadar bu şekilde gazbeton tozu diğerlerine göre daha olumsuz sonuç vermiş gibi görünsede, Şekil 4.29'da kontrol numunesi ile bir arada kıyaslanınca kontrol numunesine oranla düşük bir genleşme değeri sağladığı açıkça görülmektedir.

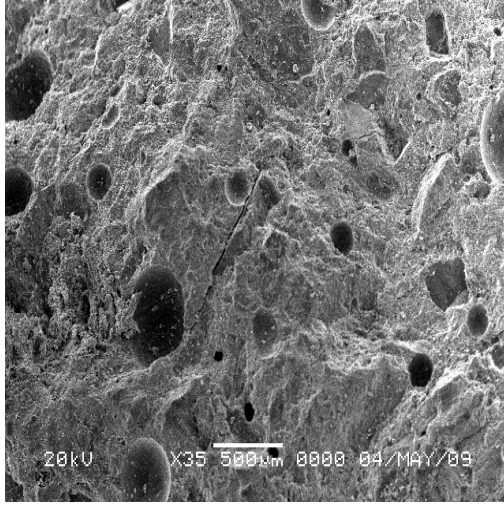


**Şekil 4.28.** 16 Gün Sonunda Puzolanik Katkılarının ASR Açısından Kıyaslanması

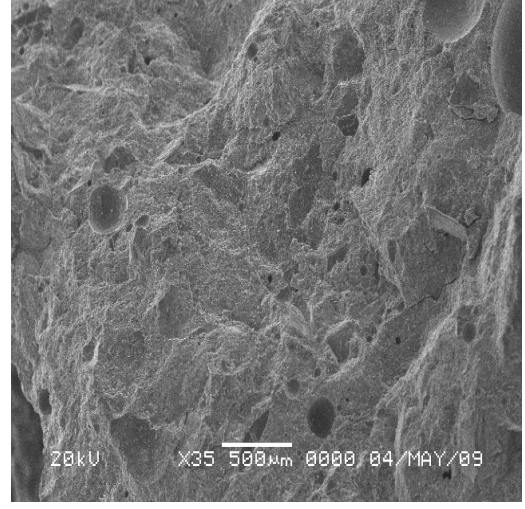


**Şekil 4.29.** 16 Gün Sonunda Puzolanik Katkıları ile Kontrol Numunelerinin ASR Açısından Kıyaslanması

Puzolanik katkılarından, %30 gazbeton tozu ve %30 kiremit tozu ikame edilmiş numunelere ait 35 kat büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri Şekil 4.30'da verilmiştir. Fotoğraflardan da görüldüğü gibi gazbeton tozu içeren numunedeki boşluk oranı ve çatlak oluşumu daha fazladır.



**(a)** %30 Gazbeton Tozu İkameli



**(b)** %30 Kiremit Tozu İkameli

**Şekil 4.30.** %30 Gazbeton Tozu İkame Edilmiş Numune İle %30 Kiremit Tozu İkame Edilmiş Numunenin Kıyaslanması

## 5. SONUÇ

Lityum katkılarının ve puzolanların ASR genleşmeleri üzerine yaptıkları etkilerin araştırıldığı bu çalışmadan elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak genel olarak genleşmeyi azaltıcı bir etkinin varlığından söz edilebilir.

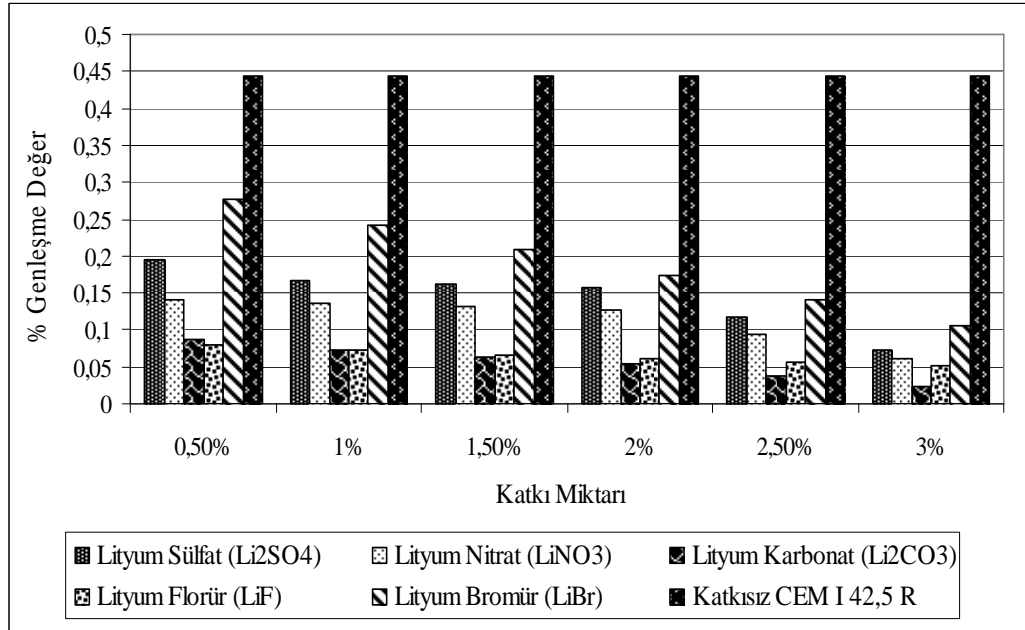
### 5.1. Lityum Katkısı Kullanılarak Yapılan Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar

1. %0,5 ve %1 katkı ikame edilmesi durumunda LiF en olumlu sonucu veren katkı maddesi olmuştur. 16 gün sonunda %5 LiF ikame edilmesi durumunda genleşme %0,0789 iken %1 ikame edilmesi halinde %0,0726'ya düşmüştür. Bu katkı miktarlarında LiF'i takip eden katkı ise  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  olmuştur.

2. %1,5, %2, %2,5 ve %3 katkı oranlarında en olumlu sonuçların alındığı katkı ise  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  olmuştur. Bu katkı oranlarında elde edilen % genleşme değerleri sırasıyla %0,0637, %0,0535, %0,0382, %0,0243 olarak bulunmuştur. Değerlerden de görüldüğü üzere (Bkz. Şekil 4.6) %1,5  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  ikame edilmesi durumunda ölçülen genleşme değeri ile %3  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  ikame edilmesi durumunda bulunan genleşme değeri arasında büyük bir fark vardır. %1,5-%3 ikame durumları arasında, % 0,0394'lük bir düşüş yaşanmıştır.

3.  $\text{Li}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{LiNO}_3$  için ise en olumlu sonuçların alındığı ikame miktarları %3 olmuştur. Elde edilen bu değerler  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  ve LiF içeren harç çubuklarının % genleşme değerlerine oranla oldukça düşük olmasına karşın kontrol numunesi ile mukayese edilince genleşmeyi azaltıcı ve zararsız bölge hatlarının içine alıcı etki gösterdikleri görülmüştür.

4. En olumsuz sonuçlar ise tüm katkı miktarlarında LiBr için gerçekleşmiştir. %0,50 ikame edilmesi durumunda %0,2768'lik %genleşme değeri ölçülürken ikame oranı %3'e çıkarıldığında genleşme değeri % 0,1068'e düşmüştür (Bkz. Şekil 4.10). Fakat ASTM C 1260'da belirtildiği üzere genleşme değeri ancak %0,10'un altına düşmüş ise zararsız bölgede bulunduğu söylenilebilir. Burada ASTM C 1260 standardının agrega için çok agresif ve ağır koşullar yarattığını, dolayısıyla ile gerçekte reaktif olmayan agrega ve koşulların bu deney sonucunda reaktif gibi görünebileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle kullanılacak katkı ve materyaller şantiye koşulları da göz önüne alınarak seçilmelidir. Şekil 5.1'de anlatılan tüm bu değerler ve kıyaslamaların bulunduğu grafik verilmiştir.



**Şekil 5.1.** 16 Gün Sonunda Kimyasal Katkı ve Katkısız Numunelerin ASR Açısından Kıyaslanması

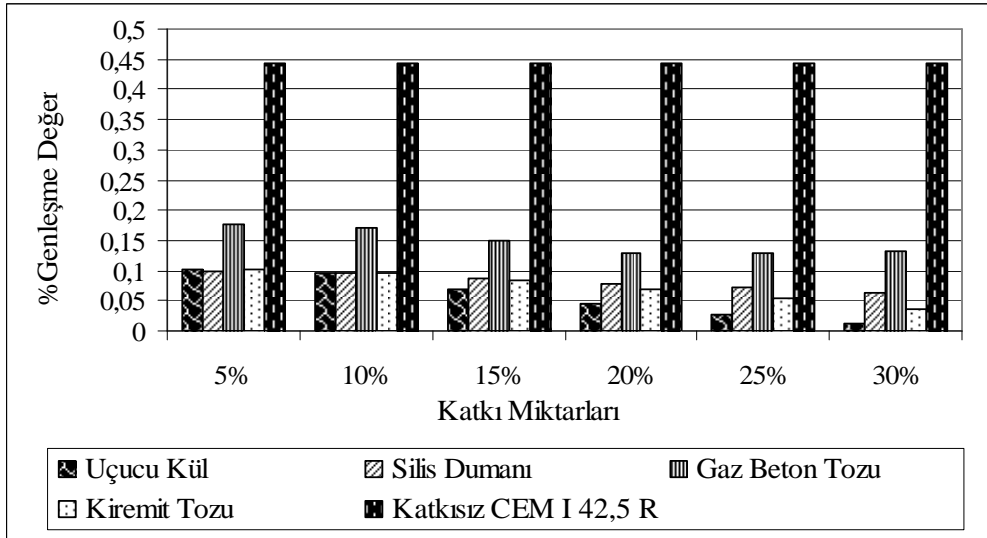


## 5.2. Puzolanik Katkı Kullanılarak Yapılan Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar

1. %5 ve %10 katkı miktarı için en olumlu sonuç SD'nin ikame dildiği numunelerden alınırken en olumsuz sonuçlar GT ikame edilen numunelerden alınmıştır. %5 SD ikame edilmesi durumunda 16 gün sonunda elde edilen genleşme değeri %0,1002 iken %10 ikame edilmesi durumunda bu değer %0,0952'ye düşmüştür.(Bkz. Şekil.4.19)

2. %15,%20,%25ve %30'luk katkı ikame durumlarında ise UK içeren numuneler en az genleşen numuneler olmuştur. Elde edilen %genleşme değerleri sırasıyla %0,0696, %0,0435, %0,0271 ve %0,0112 olmuştur. Zararsız bölge sınırının %0,10 olduğu düşünülecek olursa elde edilen %0,0112 değerinin önemi daha iyi anlaşılacaktır.

3. En olumsuz sonuç ise tüm katkı miktarları için GT ile hazırlanmış numunelerden alınmıştır. Şekil 4.21'den de görülebileceği gibi GT ile hazırlanan harç çubuklarında % genleşme değeri %5 ikame durumu ile %30 ikame durumu arasında, UK ve KT ile hazırlanan numunelerde olduğu kadar düşüş göstermemiştir. Ancak yinede %5 ikameli numune ile %30 ikameli numune arasında % 0,0438 genleşme düşüşü olmuştur. %20'lik GT katılması durumu GT için en olumlu sonuç alınırken katkı oranı artırıldıkça genleşmede de artış başlamıştır. %30'luk katkı ikame edilmesi durumunda bile % 0,10 değerinin altına inilememiş %0,1316'da kalınmıştır. Şekil 5.2'den de görüleceği üzere diğerlerine oranla az olan bu düşüş kontrol numunesi ile kıyaslandığında önemli bir değer arz etmektedir.



**Şekil 5.2.** 16 Gün Sonunda Puzolanik Katkılı ve Katkısız Numunelerin ASR Açısından Kıyaslanması

Katkısız kontrol numunelerine oranla tüm katkıli numunelerde genleşmenin gerçekleşmesi durumu farklı miktarda azalma göstermektedir. Tüm numuneler birbiri ile mukayese edildiğinde en olumlu sonuç %30 uçucu külün ikame edildiği numunelerden alınmıştır. Bu değeri %0,0243 ile %3  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  ikamesi takip etmektedir. Uçucu kül, silis dumanı gibi puzolaniklerde ve kullanılan kimyasallarda genellikle katkı oranı arttıkça genleşmenin artışı azalmaktadır. Ancak katkıler kullanılırken azami dikkat gösterilmeli ve beton yalnızca ASR açısından değil dayanım ve dayanıklılık açısından da değerlendirilmelidir.

Bir çok çalışmadan bilindiği üzere lityum tuzlarının gerekenden az kullanımı halinde ASR'yi tetikleyici durumlar da oluşabilmektedir. Lityum tuzu kullanılması halinde çimento hidratasyonu esnasında lityum iyonlarının bir kısmı hidratasyon ürünlerinin bünyesine katılmaktadır. Bu nedenle yeteri miktardan az kullanılan lityum tuzlarının genleşmeyi artırabileceği ve bunun nedeninin lityumun karışım

suyunda homojen dağılmamış olması olduğu düşünülebilmektedir. Diamond<sup>(70)</sup> tarafından lityumun hidroksit, florit ve klorür tuzlarının pH'ı arttırıcı olumsuz etkisinden kurtulmak için nötral tuzlar kullanılması gerektiği öne sürülmüştür. Lityum tuzlarının OH<sup>-</sup> konsantrasyonunu nasıl etkilediği önceden bilinmeli ve çalışılacak olan miktar ve katkının türü analizler sonucunda tercih edilmelidir. Ancak yapılmış olan bu tez çalışmasında tıpkı Andiç<sup>(4)</sup>'in çalışmasında olduğu gibi bu durum gerçekleşmemiştir. Genel olarak genleşmelerde azalma gözlenmiştir. Demir, Kurt vd.<sup>(71)</sup>'ne ait çalışmada da lityum tuzu miktarı arttıkça genleşmede azalma gözlenmiştir.

Puzolaniklerden silis dumanının harç ve beton numuneler içerisinde her zaman ince bir toz halinde dağılmış olarak bulunmamasından dolayı sertleşmiş betondaki silis dumanının bir kısmının topaklaşarak kaldığı bilinmektedir. Yoğunlaştırılmış silis dumanının hacimsel yoğunluğu çok fazla olduğundan beton içinde yayılması zorlaşmaktadır. Bu topaklarda aynen bir reaktif agrega taneciği gibi davranarak sertleşmiş betonda çimento alkalileri ile reaksiyona girebilmektedir. Andiç'in<sup>(4)</sup> de bahsettiği gibi silis dumanının ASR'yi arttıran bu davranışının yanı sıra; silis dumanı ve uçucu külün artan miktarlarının beraberinde fazla su ihtiyacı gibi problemler getirmesi de göz ardı edilmemelidir.

Kiremit tozunun katılması ile beraber bulunan % genleşme değerlerinde ciddi bir azalma görülmüştür. Kiremit tozunun genleşmeyi azaltıcı etkisinin kimyasal analiz sonuçlarından görüleceği üzere; silis dumanına oranla düşük SiO<sub>2</sub> içeriği ve yüksek Ca değerine bağlı olduğu düşünülebilir. Gazbeton tozu katılması durumunda da genleşmede azalma olmuştur. Ancak ne uçucu kül ve silis dumanı ne de kiremit tozunda olan kadar yüksek oranda düşüş gerçekleşmemiştir. %5'den %20'ye kadar

katkıda miktar artışı olumlu etki gösterirken %25 ve %30 ikame durumunda genleşmede artış ile karşılaşmıştır. Bu durum, SEM'lerden görüleceği üzere oluşan pürüzlü ve porozlu yapısına bağlanabilir. ASR jel ürününün bu boşluklu yapılarda birikmesi ya da dağılması olanakları diğerlerine göre daha fazla olduğu için bu sonucun çıktığı düşünülebilmektedir. Ayrıca gazbeton tozunun kimyasal içeriğinde diğerlerine oranla yüksek miktarda SiO<sub>2</sub> ve CaO bulunmasının da alkali reaktivitesini tetiklemede etken olabileceği düşünülebilir.

Ekonomik açıdan bakıldığında ise lityum tuzları ithal katkı maddeleri olmaları, dolayısıyla yüksek maliyetleri nedeni ile tercih noktasında 2. plana düşmektedir. Mineral katkıları bu açıdan daha uygundur. Üstelik ülkemizden temin edilebilmektedirler.

Tüm bu anlatılanlar göz önüne alınarak; çalışma yapılacak saha, içinde bulunulan koşullar ve kullanılması ihtimal dahilinde olan tüm materyaller dikkatle incelenmeli, ilgili veri ve analizler doğrultusunda malzeme seçilmeli; ASR gibi çok ciddi yapı problemleri oluşmadan önce tedbir alınmalıdır.

Bu çalışmadan elde edilen verilerden faydalanılarak ilerideki araştırmalarda; öncelikle kullanılan bu kimyasal ve puzolaniklerle numunelerin uzun vadede gösterdiği reaksiyonların incelenmesi uygun olacaktır. Çeşitli kimyasal katkıları, mermer tozu, pirinç kabuğu külü, sanayi atıkları ve ASR'ye olan etkileri incelenerek, içerikleri açısından mukayeseye gidilebilir.

## KAYNAKLAR

1. M. Arslan, G.U.Journal of Science, **9**, 615(1996).
2. K. Tosun, H.Yazıcı, B. Baradan, Uçucu Kül ve Silika Tozunun Alkali –Silika Reaksiyonuna Etkisinin İncelenmesi, Türkiye İnşaat Mühendisliği, XVI. Teknik Kongre Bildirileri, Ankara, 2001.
3. M. Arslan, Beton (Dökümü,Kalıpları,Kusurları,Dayanıklılığı), Atlas Yayınevi, İstanbul, 2001.
4. K. Ramyar, H. Dönmez, Ö. Andıç, Alkali-Silis Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkılar Yardımı İle Kontrol Altına Alınması, TÇMB, Çimento Endüstrisi-Üniversite İşbirliği Araştırma Projesi Raporları, Rapor No:9, Ege Üniversitesi, İzmir, 2002.
5. T. E. Stanton, O. J. Portep, L. C. Meder, A. Nicol, ACI Journal, **38**, 209(1942).
6. F. Bektaş, Preventive Measures Against Alkali-Silika Reaction, MSc Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 2002.
7. L. J. Struble, S. Diamond, Journal of the American Ceramic Society, **64**, 611(1981).
8. L. J. Malvar, G.D. Cline, D.F. Burke, R. Rollings, T.W. Sherman and J. Grene, ACI Materials Journal, **99**, 480(2002).
9. D.S.İ, “Betonlarda Alkali-Agrega Reaksiyonu ve Türkiye Çimentolarının Alkalinite Değerleri”, Ankara, 1974.
10. A. M. Neville, Properties of Concrete, John Wiley & Sons Inc., New York, U.S.A, 1997.
11. TS EN 196-2 Çimento Deney Metodları- Bölüm2- Çimentoların Kimyasal Analizi, 2002.
12. M. S. Akman, Cement and Concrete Technology in the 2000s Second International Symposium, 6-10 September, İstanbul, 2000.
13. C. C. Ferraris, Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, USA, 1995.
14. F. P. Glasser, R. N. Swamy, Chemistry of Alkali-Aggregate Reaction – The Alkali-Silica Reaction in Concrete, New York, 1992.

15. B. Baradan, H.Yazıcı, H.Ün, Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), D.E.Ü.Müh.Fak.Yayınları, İzmir, 2002.
16. D. W. Hobbs, Alkali-Silica Reaction in Concrete, Thomas Telford, 183, London, 1988.
17. D. W. Hobbs, Magazine of Concrete Research, **33**, 208(1981).
18. A. Binal, İ.Ü. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, **17**, 119(2004).
19. L. S. D. Glasser, N. Kataoka, Cement and Concrete Research, **11**, 1(1981).
20. R. N. Swamy, The Alkali-Silica Reaction in Concrete, Thomson Litho Ltd., Scotland, UK, 1990.
21. A. Shayan, R. Diggins, D. F. Ritchie, P. Westgate, In Proc. 7th Int. Conf. on Alkali Aggregate Reaction, Ottawa, Canada, 1986.
22. P. J. Nixon, C. L. Page, J. Hardcastle, I. Canham, K. Pettifer, Chemical studies of alkali-silica reaction in concrete with different flint contents, In Proc. 8th Int. Conf. on Alkali Aggregate Reaction, Kyoto, 1989.
23. R. G. Sibbick, C. L. Page, Cement and Concrete Research, **22**, 990(1991).
24. M. Brouxel, Cement and Concrete Research, **23**, 309(1992).
25. M. Davraz, L. Gündüz, Süleyman Demirel Üniv.Pomza Araştırma ve Uygulama Merkezi, Isparta, 1997.
26. G. M. Wood Jonathan, S. Young Jeff, E. Ward David, The Structural Effects of Alkali- Aggregate Reaction on Reinforced Concrete, Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Proceeding of the 7th International Conference, Noyes Publications, New Jersey, 1987.
27. N. Jones, Trevor, B. Poole Alan, Alkali-Silica Reaction in Several UK Concretes The Effect of Temperature and Humidity on Expansion and the Significace of Ettringite Development, Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Proceeding of the 7th International Conference, Noyes Publications, New Jersey,1987.
28. ACI 201.2R Guide to Durable Concrete and ACI 221.1R State of the Report on Alkali-Agregate Reactivity, 1992 and 1998.
29. Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Beton Laboratuvarı Şube Müdürlüğü, Ankara, 2009.

30. ASTM C 295 Standard Test Method for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete, 2003.
31. M. A Berube, B. Fournier, Accelerated Test Methods for Alkali-Aggregate Reactivity, Advances in Concrete Technology, Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada, 1992.
32. ASTM C 289 Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates, 2003.
33. ASTM C 227 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement Aggregate, 2003.
34. P. E. Grattan-Bellew, Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction Held in Kyoto, Japan, 1989.
35. R. E. Oberholster, G. Davies, Cement and Concrete Research, **16**, 181(1986).
36. R. N. Swamy, Testing for Alkali Silica Reaction - The Alkali-Silica Reaction in Concrete, New York, 1992.
37. ASTM C 441 Mineral Admixture Effectiveness in Preventing Excessive Expansion Due to Alkali-Aggregate Reaction, 2002.
38. L. Struble, M. Brockman, Standard Reactive Aggregate Materials for Alkali-Silica Reaction Studies, Alkali-Aggregate Reaction, Elsevier Applied Science, New York, 1989.
39. ASTM C 1293 Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction, 2008.
40. G. Davies, R.E. Oberholster, Cement and Concrete Research, **7**, 97(1987).
41. ASTM C 1260 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates, 2005.
42. D. Stark, B. Morgan, P. Okamoto, Eliminating or Minimizing Alkali-Silica Reactivity, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington DC, 1993.
43. C. Zhang, A. Wang, Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., **23**(1), China, 2008.
44. P.J. M. Monterio, K. Wang, G. Sposito, M.C dos Santos, W.P de Andrade, Cement and Concrete Research, **27**, 1899(1997).

45. H. Ün, Yapay Puzolanlar, PAÜ Ders Notları, Yapı Malzemesi/Yapay Puzolanlar, 2007.
46. A. Yeğınobalı, Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Katkı Maddesi Olarak Kullanılması, TCMB/AR-GE/Y01.01, Ankara, 2003.
47. K. Tosun, B. Felekoğlu, B. Baradan, 3rd International Symposium on Sustainability in Cement and Concrete, TCMA, İstanbul, Turkey, 2007.
48. P. Barnes, J. Bensted, Structure and Performance of Cements, USA Routledge, 2001.
49. S.-H. Sun, J.-T Ma, , X.-M. Pang, Y.-T. Sun, S.-L Wang, Bulletin of the Catalysis Society of India, **4**, 72(2005).
50. TS 453, Gaz ve Köpük Beton Yapı Malzeme ve Elemanları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1988.
51. İnternet,<http://www.miningeng.org.tr/www/7.BYKP/ekutup95/o477/kuvarsit/kuvarsit.htm>.
52. Y. E. Çiçek, Pişmiş Toprak Tuğla, Bimsbeton, Gazbeton ve Perlitli Yapı Malzemelerinin Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002.
53. B.Borhan, Ytong El Kitabı 1, Ytong Teknik Yayınları(1), İstanbul, 1987.
54. A. O. Yılmaz, İ. Alp, H. Deveci, İ. Çavuşoğlu, F.Yalçın, Araklı (Trabzon) Bölgesi Kil Yataklarının Tuğla ve Kiremit Yapımında Kullanılabilirliğinin Araştırılması, II. MBGAK, İstanbul, 2005.
55. U. Köktürk, Endüstriyel Hammaddeler, DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları, 2002.
56. DPT, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Toprak Sanayi Hammaddeleri 2, DPT Yayınları, 2001.
57. DJ. Cook, Natural Pozzolanalar, Calcined Clay, Shale and Other Soils, Rice Husk Ash- Cement Replacement Materials, Surrey University Press, 1986.
58. KC. Mielenz, L.P. Witte, O.J. Glantz, Effect of Calcination on Natural Pozzolana, Symposium on Use of Pozzolanic Materials in Mortars and Concretes, STP-99, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1950.



59. Ö. Abit, Alkali-Silis Reaksiyonunun (ASR) Kimyasal Katkılar ile belirlenmesi, Azaltılması veya Onarılması, T.C. Karayolları-Alkali-Agrega Kurs Programı, T.C.K. Araştırma Dairesi, Ankara, 1998.
60. W. J. Mc Joy, A. J. Caldwell, Journal of American Concrete Institute, **22**, 693(1951).
61. C.L. Collins, J.H. Ideker, G.S. Willis and K.E. Kurtis, Cement and Concrete Research, **34**, 1403(2004).
62. M. Kawamura, H. Fuwa, Cement and Concrete Research, **33**, 913(2003).
63. X. Feng, M.D.A. Thomas, T.W. Bremner, B.J. Balcom, K.J. Folliard, Cement and Concrete Research, **35**, 1789(2005).
64. M. Xiangyin, Cement and Concrete Research, **35**, 499(2005).
65. J. A. Farny and S. H. Kosmatka, Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, Concrete Information, Portland Cement Association, 1997.
66. Jr. Stokowski, J. Steven & Sarson, Janet, Stone Products Consultants, Massachusetts, USA, 2006.
67. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, MTA/224-1/R-2249, Agregası Analizi, 2009.
68. İnternet;[http://www.merckchemicals.co.uk/isbin/INTERSHOP.enfinity/WFS/Merck-GB-Site/en\\_US/-/GBP/ViewProductDetail?PortalCatalogUUID](http://www.merckchemicals.co.uk/isbin/INTERSHOP.enfinity/WFS/Merck-GB-Site/en_US/-/GBP/ViewProductDetail?PortalCatalogUUID), 2009.
69. TÇMB, Ar-Ge Laboratuvarları İnceleme Raporu, Rapor No:659, 2009.
70. S. Diamond, Cement and Concrete Research, **29**(1999).
71. İ. Demir, D. Kurt, H. Yaprak, G. Durmuş, Effects of Lithium Sulfate and Lithium Nitrate on Alkali-Silica Reaction, Chemical Admixtures For Structures 3rd Symposium and Exhibition, Proceedings, Ankara, 2009.

**Ek 1**

**ASTM C 1260 İçin Kullanılan Araç ve Gereçler**



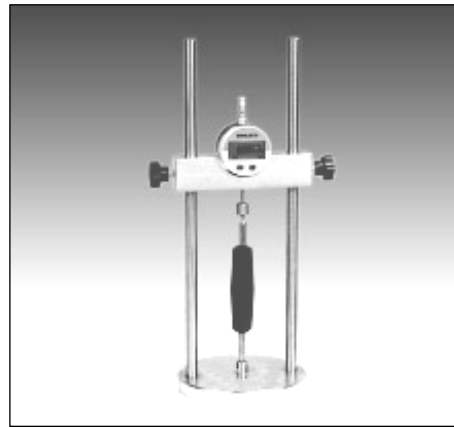
**Ek Şekil 1. Standartta Belirtilen Kalıp**



**Ek Şekil 2. Kullanılan Kalıba Ait Aparatlar**



Ek Şekil 3. Deney İçin Hazırlanmış Olan Numunelerden Bazıları



Ek Şekil 4. Boy Okumaları İçin Dijital Kompratör